

รูปแบบของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

1. ปกนอก
2. รongปก
3. ปกใน
4. บทคัดย่อภาษาไทย
5. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ
6. กิตติกรรมประกาศ
7. สารบัญ
8. สารบัญตาราง
9. สารบัญภาพ / แผนภูมิ / อื่น ๆ (ถ้ามี)
10. บทที่ 1 บทนำ
11. บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
12. บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย
13. บทที่ 4 ผลการวิจัย
14. บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ
15. บรรณานุกรม
16. ภาคผนวก (ผู้ทรงคุณวุฒิ, เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย , แบบสอบถาม หรืออื่น ๆ)
17. ประวัติผู้วิจัย
18. **สันเล่มรายงานการวิจัย (ระบุเลขรหัส ชื่องานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย ปีพ.ศ.ที่ทำเสร็จ)**

หมายเหตุ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK



รายงานการวิจัย

เรื่อง

ผลของขั้วไฟฟ้า ชนิด CdS/CNT/C ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมม
เบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

Effects of Electrodes CdS/CNT/C on performance of PEMFC

พรชัย ชินสา

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2561)

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษาทร ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รองศาสตราจารย์ ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดินของมหาวิทยาลัย เป็นทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ขอขอบคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์และฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ตลอดจนเป็นกำลังใจให้ตลอดมาในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้ทำการวิจัย ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดาของผู้ทำการวิจัย ที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ เวลา จนสำเร็จตาม ความมุ่งหมาย คุณค่าและเกียรติภูมิใด ๆ อันพึงมีในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตเวทิต์คุณแก่บิดา มารดา และบูรพาจารย์ทุกท่าน

คณะผู้วิจัย

2561

หัวข้อวิจัย ผลของข้อไฟฟ้า ชนิด CdS/CNT/C ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ผู้ดำเนินการวิจัย นาย พรชัย ชินสา

ที่ปรึกษา รศ.ดร. เกียรติ พงษ์พานิช ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร. เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

หน่วยงาน สาขาวิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ปี พ.ศ. 2561

บทคัดย่อ

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยองค์ประกอบภายในข้อไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และโครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัมฉาบบนตัวรองรับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และคาร์บอนยังช่วยในการนำไฟฟ้าและทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างส่วนที่นำอิเล็กตรอน (แพลทินัมบนคาร์บอน) และส่วนที่นำโปรตอน (อิเล็กโทรไลต์) บนการสัมผัสทั้งสามเงื่อนไข (three-phase boundary)

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมกับวัสดุตัวรองรับคาร์บอนชนิดใหม่ที่น่าไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน CdS/CNT/C ซึ่งเตรียมมาจาก CNT/C ร้อยละ 1:1 1:1.5 1:2 และ 1:2.5 แล้วนำไปเผาเตรียม (Heat-treated) ที่ 900 °C นำผง CNT/C พ่นลงบนผ้าคาร์บอน เตรียมด้วยวิธี impregnation จากนั้นแช่ในสารละลาย 1,10-phenanthroline (Phen) และแช่ในสารละลาย CdCl₂ เกิดเป็น CdS/CNT/C ศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค TEM SEM และ XRD และลักษณะทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์พอว์ และทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเครื่องทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell test station) พบว่าลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย CNT เท่ากับ 31.55 ± 8.8 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว CNT เท่ากับ 9.06×10^{-5} ตารางเมตร/กิโลกรัม ลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง TEM มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย CdS เท่ากับ 4.34 ± 1.35 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว CNT เท่ากับ 0.00029 ตารางเมตร/กิโลกรัม วิเคราะห์เทคนิค XRD พบว่าขนาดของผลึก CdS มีขนาด 3.98 nm ลักษณะทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์พอล แนวโน้มสภาพต้านทานลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน CNT โดยอัตราส่วน 1:1.5 มีความเหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแกรไฟต์ สอดคล้องกับผลของเทคนิค FT-IR ที่มีปริมาณ CdS

อยู่มากที่อัตราส่วนเดียวกัน สมรรถนะการทำงานของเครื่องทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell test station) พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้า Cds/CNT/C ในอัตราส่วน 1:1.5 ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงพาณิชย์ Pt/C เล็กน้อย

Research Title	Effects of Electrodes CdS/CNT/C on performance of PEMFC
Researcher	Mr.Pornchai Chinnasa
Research Consultants	Assoc. Prof. Dr. Kejvalee Pruksathorn, Department of Chemical Technology, Chulalongkorn University Assoc. Prof. Dr. Ekaphan Swatsitang, Department of Physics, Khon Kean University
Organization	Program in Physics Faculty Science and Technology Rajabhat Maha Sarakham University
Year	2018

ABSTRACT

The performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) is affected by many factors are intrinsic to the electrode. These factors are the catalyst type and structure (e.g. porosity, tortuosity) of the catalyst layer. The catalyst layer was platinum (Pt) particles on carbon supporter. Carbon supporters are used to provide nano-sized catalyst particles on the surface, in order to have large catalyst surface areas whist also providing effective electrical generation and also to help stabilization of three-phase boundary.

In this study a new type of carbon support materials for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) was evaluated CdS/CNT/C. CNT/C were condition ratio 1:1, 1:1.5, 1:2 and 1:2.5 heat-treated CNT/C at 900 °C CdS/CNT/C spray on C supporter by impregnation method. Immersed the CNT/C electrode in 1,10-phenanthroline (Phen) aqueous solution and the subsequent immersion in CdCl₂ aqueous solution for times to grow an appropriate amount of CdS nanoparticles. The as-prepared samples were characterized by transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) and XRD-X-ray Diffractometer (XRD) and Electrical resistivity of the electrode was measured by Van der Pauw and Fuel cell Test station. The results, SEM revealed a three – dimensional CNT particles on carbon supports were in the range of 31.55 ± 8.8 nm and Metallic Surface area 9.06×10^{-05} m²/Kg, TEM CdS particles on CNT/C were in the range of 4.34 ± 1.35 nm and Metallic Surface area 0.00029 m²/Kg. CdS

particles observed to have an average size of 3.98 nm for XRD. Electrical resistivity of the electrode was measured by Van der Pauw the electrode prepared increase CNT electrical conductivity is decreased, the condition CNT/C 1:1.5 had more catalytic site thus gave appropriate. As evidenced from the Fuel cell Test station for the CdS/CNT/C the condition 1:1.5 had more Pt/C catalytic site and thus gave a higher power density.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	3
สมมติฐานการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน	4
องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	7
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst).....	11
ตัวรองรับ.....	22
สภาพต้านทานไฟฟ้า.....	27
โพลาไรเซชัน (Polarization)	30
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	33
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	35
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	37
Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)	38
วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคแวนเดอร์พอร์.....	40
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	47
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	47
วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัย	63
ผลของการศึกษาลักษณะทางกายภาพ	63
ผลของการศึกษาลักษณะทางเคมีและไฟฟ้า	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	83
สรุปผลการวิจัย.....	83
วิจารณ์ผลการวิจัย.....	85
ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก การคำนวณการวิจัย.....	89
ภาคผนวก ข ข้อมูลการวิจัย.....	95
ภาคผนวก ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	99
ประวัติผู้วิจัย	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ชนิดและสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	5
2.2	สรุปคุณสมบัติทั่วไปของคาร์บอนนาโนทิวบ์	27
4.1	ผลการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวของ CNT	68
4.2	ผลการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวของ CdS	70
4.3	คำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้า	79
ก-1	การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt	90
ก-2	การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน	6
2.2	องค์ประกอบขององค์ประกอบของหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดในเซลล์เชื้อเพลิง	8
2.3	โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน	9
2.4	โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน nafion	9
2.5	แสดงการเคลื่อนที่ของโปรตอน อิเล็กตรอนและแก๊สภายในขั้วไฟฟ้า	11
2.6	(ก) การแจกแจงพลังงานของอนุภาคไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา	12
2.7	(ก) การแจกแจงพลังงานของอนุภาคไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา	13
2.8	สมบัติการนำไฟฟ้าของธาตุชนิดต่างๆ	20
2.9	ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท N	20
2.10	ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท P	21
2.12	การไหลของกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำประเภท P	22
2.13	โครงสร้างของเพชร	23
2.14	ลักษณะโครงสร้างแกรไฟต์ (ก) รอมโบฮีดรอล (rhombohedral), (ข) เฮกซะโกนอล (hexagonal)	24
2.15	โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์	25
2.16	โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (ก) zig zag, (ข) chiral และ (ค) armchair	26
2.17	การจัดเรียงตำแหน่งในการวัดด้วยเทคนิค van der Pauw	28
2.18	(L.J.van der Pauw, Philips Res. Rprts, 1958)	29
2.19	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน	31
2.20	ลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	34
2.21	แสดงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	35

2.22	ลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	36
2.23	แสดงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM	37
2.24	เครื่อง XRD	37
2.25	เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)	38
2.26	ชิ้นงานรูปร่างต่างๆ	40
2.27	ห้วงวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค Van der Pauw	44
3.1	นำแกรไฟต์ที่จะนำมาใช้เป็นตัวรองรับ มาผ่านการ คัดขนาด ด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 270	49
3.2	ชั่งน้ำหนักตัวรองรับแกรไฟต์จากขั้นตอนที่ 2 หนักประมาณ 1 กรัม	49
3.3	ชั่งน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอน หนักประมาณ 1 กรัม ใส่ลงไปในปีเกอร์กับแกรไฟต์	50
3.4	ทำให้สารทั้งสองตัวนี้เป็นสารละลายโดยการเติมสารโทลูอินลงไป 60 ml	50
3.5	ให้ความร้อนกับสารทั้งสองตัวก่อนนำไปเผา	51
3.6	CNT/C ก่อนนำไปอบ	51
3.7	CNT/C หลังนำไปอบ	52
3.8	CNT/C เตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	52
3.9	CNT/C หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	52
3.10	สารละลาย 1,10-พีแนซทอรีน (C ₁₂ H ₈ N ₂)	53
3.11	สารละลายเอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ ปริมาตร 4.260 มิลลิลิตร	55
3.12	สารละลาย เนฟิออนปริมาณ 0.149 มิลลิลิตร	55
3.13	พ่น CdS/CNT/C ลงบนผ้าคาร์บอนที่เตรียมไว้	56
3.14	เครื่อง X-ray Diffactometer (XRD) ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น	57
3.15	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	57
3.16	เครื่อง Transmission Electron Microscope(TEM)	58
3.17	เครื่อง Transmission Electron Microscope(TEM)	58
3.18	เทคนิค Van der Pauw ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น	59
3.19	เครื่องอัดรีด DHP 050	60

3.20	MEA ที่อัดเสร็จ	60
3.21	MEA มาประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว	61
3.22	ทดสอบประสิทธิภาพด้วยเครื่อง Fuel cell test station	61
4.1	แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:1) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	64
4.2	แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:1.5) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	65
4.3	แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:2) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	66
4.4	แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:2.5) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	67
4.5	การกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) CdS/CNT/C (1:1) (ข) CdS/CNT/C (1:1.5.) (ค) CdS/CNT/C (1:2) และ (ง) CdS/CNT/C (1:2.5)	68
4.6	ผลการวิเคราะห์ TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ (ก) CdS/CNT/C (1:1) (ข) CdS/CNT/C (1:1.5) (ค) CdS/CNT/C (1:2) และ (ง) CdS/CNT/C (1:2.5)	70
4.7	การกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) CdS/CNT/C (1:1) (ข) CdS/CNT/C (1:1.5) (ค) CdS/CNT/C (1:2) และ (ง) CdS/CNT/C (1:2.5)	71
4.8	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:1)	73
4.9	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:1.5)	73
4.10	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:2)	74
4.11	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:2.5)	74

4.12	แสดงการเกิดพันธะของ CNT/C (Ashok Ch., Venkateswara Rao K. and Shilpa Chakra Ch., 2014)	76
4.13	กราฟ FT-IR ที่พบ CNT และ CdS ของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5	78
4.14	(L.J.van der Pauw, Philips Res. Rpts,1958)	80
4.15	โพลาริเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C เทียบกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่เตรียมจาก Pt/C	81
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส ความต่างศักย์และกำลังไฟฟ้า ที่เตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C และ Pt/C	82
ค-1	แสดงการวัดค่าความต้านทานของแท่งแกรไฟต์	100
ค-2	แสดงการบัดแท่งแกรไฟต์และได้ผงแกรไฟต์ออกมา	100
ค-3	แสดงการตัดแผ่นอลูมิเนียม 6061 ขนาด 1x1 cm ² แล้วแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (5M HCl) นาน 30 นาที	101
ค-4	แสดงการขัดแผ่นอลูมิเนียม 6061 ด้วยกระดาษทรายแล้วเช็ดผิวให้สะอาด จากนั้นนำไปวางในห้องเคลือบ	101
ค-5	แสดงสารที่ใช้ในการเตรียมแกรไฟต์ที่เปอร์เซ็นต์แกรไฟต์ต่างๆและชั่งแกรไฟต์ ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลแบบ 3 ตำแหน่ง	102
ค-6	กวนสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องกวนสารนาน 30 นาที และการฉีดพ่นสารเคลือบ	102
ค-7	แสดงแผ่นอลูมิเนียม 6061 ที่ผ่านการเคลือบด้วยแกรไฟต์ และไม่ผ่านการเคลือบ	103
ค-8	แสดงเครื่องเคลือบแบบฉีดพ่น	103
ค-9	แสดงเครื่องมือการวัดค่าสภาพต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR) ของชิ้นงาน ที่เตรียมจากงานวิจัยนี้	104
ค-10	ชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบ 4 ตำแหน่ง	104
ค-11	แสดงแผ่นชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแบบฉีดเมื่อแช่ในกรด H ₂ SO ₄	105

บทที่ 1

บทนำ

การศึกษาและผลของขั้วไฟฟ้า ชนิด Cds/CNT/C ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มมีที่มาและความสำคัญของปัญหา รวมไปถึงวัตถุประสงค์ในการศึกษาและประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา ดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ทั้งทางด้านการดำเนินชีวิตและทางด้านอุตสาหกรรม ทำให้ปริมาณความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามอัตราการขยายตัวของประชากรและเศรษฐกิจโดยเฉพาะความต้องการแหล่งพลังงาน ดังนั้นอาจก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องหาทางแก้ไข การผลิตพลังงานต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมกับในสภาวะการณ์ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้น หรือปริมาณของมลภาวะที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการให้ความสนใจในการพัฒนากระบวนการผลิตพลังงานแนวทางเลือกใหม่ เพื่อใช้ทดแทนพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานไฮโดรเจน ซึ่งพลังงานที่ได้กล่าวมาล้วนแต่เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลพิษทางอากาศ ทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่า เครื่องยนต์การเผาไหม้ 1-3 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงมีด้วยกันหลายชนิด แต่เซลล์เชื้อเพลิงที่นิยมใช้ คือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) เพราะมีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ มีหลักการทำงานโดยอาศัยเชื้อเพลิง คือ ไฮโดรเจน (H_2) จะถูกปล่อยไปในด้านแอโนดโดยใช้ความดัน เมื่อก๊าซไปสัมผัสกับตัวเร่ง

ปฏิกิริยา ก็จะเกิดการแตกตัวออกเป็น โปรตอนและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยัง วงจรภายนอกส่วนโปรตอนนั้น จะผ่านช่องของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ซึ่งจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่รับมาจากวงจรภายนอก รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนซึ่งแตกตัวโดยการเร่ง ของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้นมา ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้ จะนำไปใช้เป็นไฟฟ้า กระแสตรงได้จากกระบวนการดังกล่าวจะได้แรงดันไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ มีค่าโดยประมาณ 1.16 โวลต์ (เครือข่ายพัฒนาพลังงานไฮโดรเจน, กระทรวงพลังงาน) ซึ่งถ้าต้องการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า ก็ นำมาต่ออนุกรมกัน(Fuel Cell Stack) จะต้องใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วมากั้นระหว่างเซลล์ แผ่น นำกระแสไฟฟ้าสองขั้วส่วนมากนิยมทำมาจากแกรไฟต์ เพราะมีค่านำกระแสไฟฟ้าสูงและทนต่อการ กัด แต่แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วนี้ จะมีน้ำหนักมาก คิดเป็นร้อยละ 80 ของน้ำหนัก ของเซลล์ เชื้อเพลิง และต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชุด จะขึ้นอยู่กับต้นทุนการผลิตแผ่นนำ กระแสไฟฟ้าสองขั้วด้วย

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์ ประกอบด้วยอิเล็กโทรด 2 ตัว คือตัวหนึ่งเป็นบวก (Anode) อีกตัวหนึ่งเป็นลบ (Cathode) และมีเคมีเป็นอิเล็กโทรไลต์ ที่จะพากระแสไฟจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง และยังประกอบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่จะเร่งปฏิกิริยาของอิเล็กโทรดให้เกิดกระแสไฟฟ้ามาก ขึ้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นวัสดุพิเศษที่ช่วยให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ดี ปฏิกิริยาทาง เคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบขึ้นด้วยสองปฏิกิริยา คือ การเกิดออกซิเดชันที่แอโนดและการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด โดยปกติการเกิดปฏิกิริยาทั้งสองนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ด้วย อุณหภูมิต่ำๆ ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ดังนั้นในแต่ละอิเล็กโทรดที่ถูกเคลือบอยู่ด้านหนึ่งของชั้น สารเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นตัวช่วยในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนและไฮโดรเจน โดยส่วนใหญ่สาร เร่งจะสร้างขึ้นจากผงแพลตินัมเคลือบอยู่บนเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งจะมีลักษณะขรุขระเพื่อเพิ่ม พื้นที่ในการสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนและไฮโดรเจน เนื่องจากปัจจุบันแพลตินัมมีราคาสูงกว่าทองคำ 2-3 เท่า

เพื่อเป็นการลดต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์ ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมตัวเร่ง ปฏิกิริยาบนตัวรองรับ คือตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจาก CdS/CNT/C ซึ่งอยู่ในอนุภาค ระดับนาโน คือ มีขนาดเล็ก อัตราส่วนต่อพื้นผิวต่อปริมาตรสูงช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างสารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น กว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้อยู่ในระดับนาโน เพื่อทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ ใช้ Pt/C (ใช้ในเชิงพาณิชย์) ซึ่งมีราคาสูง และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ Pt/C

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ด้วยวิธีอิมพริเกชัน(impregnation) แบบวิธีฉีดพ่น
2. ศึกษาผลของสมบัติทางกายภาพและการนำไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย CdS/CNT/C
2. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีอิมพริเกชัน(impregnation) แบบวิธีฉีดพ่น
3. ศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง
4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM, TEM, XRD
5. ศึกษาลักษณะทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy, เทคนิคแวนเดอร์พอร์, Fuel cell test station
6. ศึกษาอัตราส่วน CNT/C ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5, 1:2, และ 1:2.

1.4 คำจำกัดความ

สมรรถนะ คือ ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบกระบวนการทำตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C
2. ได้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมมาจาก CdS/CNT/C มีราคาที่ถูกกว่าและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงเมื่อเทียบกับเชิงพาณิชย์ Pt/C ที่นำไปใช้ในขั้วไฟฟ้า
3. ได้ตัวเร่งที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน
4. แนวทางในการนำไปพัฒนาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น
5. มีความรู้ความเข้าใจในการเตรียมขั้วไฟฟ้าและตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่อง ผลของขั้วไฟฟ้า ชนิด CdS/CNT/C ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์ ผู้วิจัยจึงขอเสนอองค์ความรู้ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นต่อไปนี้

2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cells) หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่ง คือ (polymer electrolyte membrane fuel cells) ซึ่งเรียกย่อๆ ว่า (PEMFC) เป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแก่ยานพาหนะ หรือตามสถานที่ต่างๆ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีจุดเด่นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ อีกทั้งยังมีความพิเศษในส่วนของเยื่อพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนโปรตอน

สารตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนใช้ แก๊สไฮโดรเจน และออกซิเจน(หรือ อากาศ) โดยแก๊สไฮโดรเจนจะแตกตัวบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ด้านแอโนดให้ผลิตภัณฑ์ คือ โปรตอน และอิเล็กตรอน ตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เนฟออนเป็นเยื่อเลือกผ่านนี้ เฉพาะไอออนที่มีประจุบวกเท่านั้นจึงจะผ่านได้ ดังนั้นในที่นี้โปรตอนจึงถูกเลือกให้เคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านภาระทางไฟฟ้า หรือ โหลด (load) และเป็นที่รู้กันดีว่าไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นเราก็จะได้แสงสว่างจากไฟฟ้าที่ผลิตได้ หากโหลดนั้นคือหลอดไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดถือว่าครบวงจร จากนั้นอิเล็กตรอน โปรตอน และแก๊สออกซิเจน ตามปฏิกิริยารีดักชัน ก็จะรวมตัวกัน กลายเป็นน้ำ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ตาราง 2.1 ชนิดและสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (อภิรัตน์ เลาห์บุตรี และ นัทธมน คุณแสง, 2547)

ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิ (°C)	เชื้อเพลิง
Alkaline fuel cell (AFC)	Potassium hydroxide (KOH)	50-200	Pure hydrogen or hydrazine
Direct methanol fuel cell (DMFC)	Polymer	60-200	Liquid methanol
Phosphoric acid fuel cell (PAFC)	Phosphoric acid	160-210	Hydrogen from hydrocarbons and alcohol
Sulphuric acid fuel cell (SAFC)	Sulphuric acid	80-90	Alcohol or impure hydrogen
Proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC)	Polymer, proton exchange membrane	50-80	Less pure hydrogen from hydrocarbons or methanol
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	Molten salt such as nitrate, sulphate, carbonates	630-650	Hydrogen, carbon monoxide, natural gas, propane, marine diesel
Solid oxide fuel cell (SOFC)	Stabilised zirconia and doped perovskite	600-1000	Natural gas or propane
Solid polymer fuel cell (SPFC)	Solid sulphonated polystyrene	90	Hydrogen

ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงถูกแบ่งออกเป็น 8 ประเภทโดยแต่ละประเภท ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์และสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2.1 ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

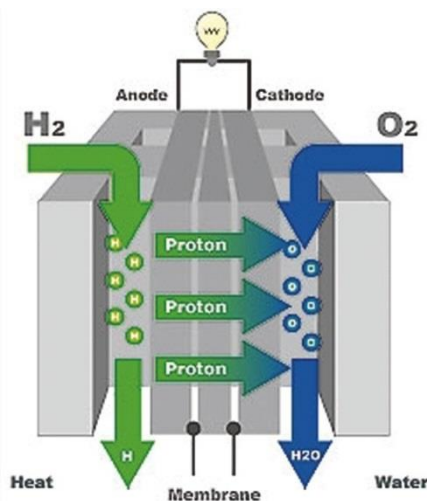
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่กำลังเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง และมีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ อยู่ในช่วง 50-80 °C

2.1.1 หลักการทำงาน

แอโนด(anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าลบออกไปทางขั้วไฟฟ้า เมื่อต่อสายไฟกับขั้วไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะไหลออกไป ส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกดึงอิเล็กตรอนออกไป จะแสดงประจุบวก เรียกว่า โปรตอน

แคโทด(cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุบวกกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ต่อเข้ากับสายไฟภายนอก รับอิเล็กตรอนมารวมกับอะตอมของแก๊สออกซิเจนกับไฮโดรเจนกลายเป็นโมเลกุลของน้ำ

อิเล็กโทรไลต์(electrolyte) ทำจากวัสดุต่าง ๆ เช่น สารละลายและแผ่นพลาสติก มีหน้าที่คือ ยอมให้ประจุบวกหรือโปรตอนเคลื่อนที่ผ่าน



รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน
ที่มา (Josh Miller, 2558)

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วคือขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และขั้วแคโทด (ขั้วบวก) รอบสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ที่ขั้วแอโนด ให้แก๊สไฮโดรเจนเข้าไป แก๊สไฮโดรเจนแพร่ผ่านแอโนด แก๊สไฮโดรเจนถูกเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนไอออนกับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนถูกส่งผ่านเข้าไปในสายไฟ เกิดกระแสไฟฟ้า จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ดังสมการ 2.1



ที่ขั้วแคโทด ให้แก๊สออกซิเจนจากอากาศเข้าไปที่ขั้วแคโทด เมื่อไฮโดรเจนไอออนกับอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่มายังขั้วแคโทดทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนจากอากาศที่ให้เข้าไปเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำจากแพลทินัม จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้ำบริสุทธิ์ออกมา ดังสมการ 2.2



แรงดันไฟฟ้าที่ได้ต่อหนึ่งเซลล์มีค่าประมาณ 1 โวลต์และได้กระแสออกมาประมาณ 10 แอมแปร์ ซึ่งถ้านำมาต่ออนุกรมกัน (fuel cell stack) 12 เซลล์ ก็จะได้แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ เหมือนกับแบตเตอรี่ ปฏิกิริยารวมของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดเป็นน้ำ ดังสมการ 2.3

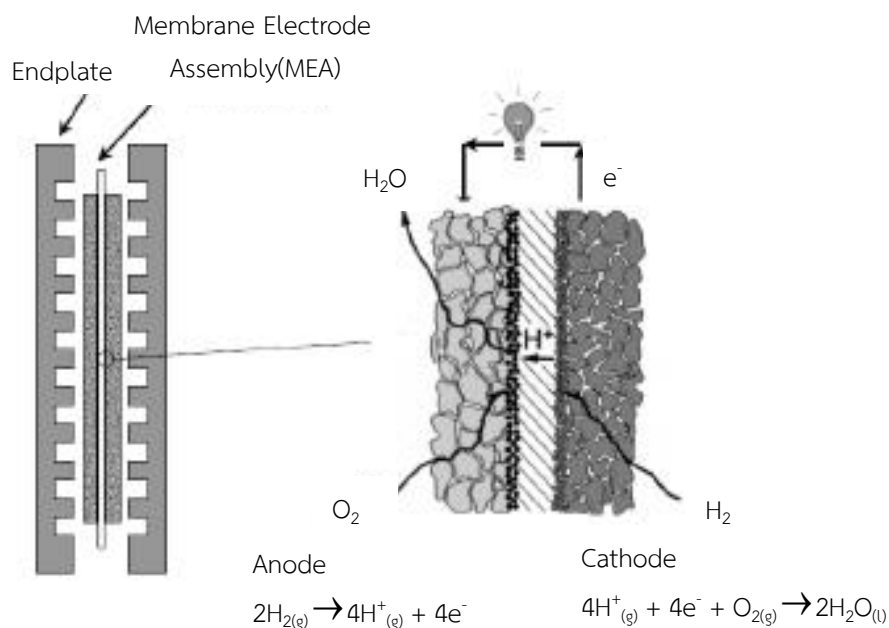


2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

องค์ประกอบทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วย

2.2.1 องค์ประกอบของหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด (Membrane electrode assembly, MEA)

ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีความสำคัญที่สุด คือ MEA ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าและเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยขั้วไฟฟ้าประกบกับเยื่อแผ่นในลักษณะแซนด์วิช (sandwiched) ดัง **รูปที่ 2.2**



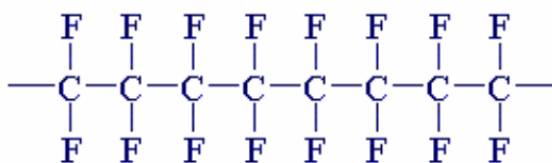
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบขององค์ประกอบของหน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรด ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

ที่มา (วินิตย์ บุญเกียรติ, 2557)

2.2.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน(Membrane)

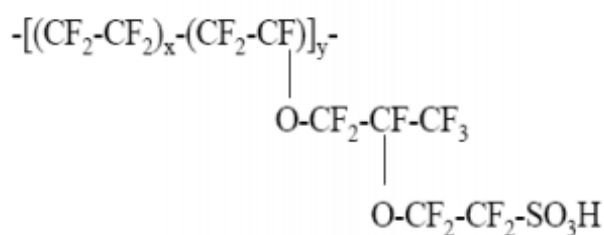
เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน จัดเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นของแข็งและมีโครงสร้างหลักเป็นสายโซ่พอลิเมอร์จำพวกซัลโฟเนตฟลูออโรพอลิเมอร์ (sulphonated fluoropolymers) หรือ ฟลูออโรเอทิลีน (fluoroethylene)

การเตรียมพอลิเมอร์ทำได้โดยการให้ฟลูออรีนแทนที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนในโมเลกุลของเอทิลีนเรียกกระบวนการนี้ว่า เพอร์ฟลูออรีเนชัน (perfluorination) ได้โครงสร้างเรียกว่า เตตระฟลูออโรเอทิลีน (tetrafluoroethylene) เมื่อโมเลกุลเรียงต่อกันจะได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิตะตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) หรือ PTFE ดังแสดงใน**รูปที่ 2.3** ความแข็งแรงของพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนทำให้พอลิเมอร์มีความทนทาน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน
ที่มา (วินิตย์ บุญเทียร, 2557)

การเตรียมอิเล็กโทรไลต์ทำโดย การเพิ่มการเพิ่มในส่วนของซัลโฟเนต (sulfonate) ซึ่งได้มาจากกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในกระบวนการทางเคมีเป็นอย่างมากตัวอย่างเช่นในกระบวนการทำผลิตภัณฑ์เพื่อทำความสะอาด โมเลกุลกรดซัลโฟนิกจะสร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ในส่วนปลายช่วงนี้เป็นช่วงที่ชอบน้ำ (hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำไว้ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน คือ เนฟฟิออน ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดัง **รูปที่ 2.4**



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน nafion
ที่มา (วินิตย์ บุญเทียร, 2557)

เมื่อมีการดูดซึมโมเลกุลน้ำไว้ทำให้แรงพันธะในการยึดกันระหว่างหมู่ SO_3^- กับ H^+ ลดลง ทำให้ H^+ สามารถเคลื่อนที่ได้

เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้ (สุภาภรณ์, 2543)

1. มีค่าการนำไอออนสูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
2. มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
3. มีขนาดที่แน่นอน (ไม่มีการบวม)
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ
6. มีค่าความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหรือมีความต้านทานต่อการเกิดดีไฮเดรชัน

(Dehydration)

7. มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน และไฮโดรไลซิส (hydrolysis)
8. มีค่าการถ่ายเทแคทไอออน (cation) สูง
9. พื้นผิวของเยื่อแผ่นต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดีมีความเป็น

เนื้อเดียวกัน (homogeneity)

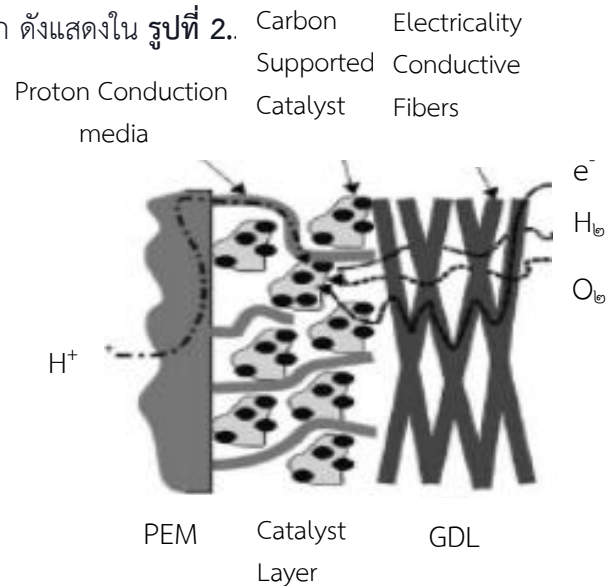
2.2.3 ขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด (Electrode)

ขั้วไฟฟ้าหรือขั้วอิเล็กโทรด (electrode) ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบด้วย 2 ขั้วคือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยทั่วไปแล้วขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ต้องมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

ขั้วไฟฟ้าจะประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst layer) และแผ่นรองรับ (gasdiffusion layer) ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ ขณะที่แผ่นรองรับ (GDL) นิยมใช้เป็นกระดาษคาร์บอน (carbon paper) เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดกระบวนการเคลื่อนที่ของสาร (transport processes) บนขั้วไฟฟ้ามี่ 3 ขั้นตอน (Litster and Mclean, 2004) คือ

1. การเคลื่อนที่ของโปรตอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ด้านแอโนด และโปรตอนเคลื่อนที่จากเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ด้านแคโทด
2. การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านแผ่นรองรับไปยังแผ่นสะสมกระแสที่ด้านแอโนด ผ่านวงจรภายนอกแล้วผ่านแผ่นสะสมกระแส (Bi-polar current collector Plate) ไปยังแผ่นรองรับและเคลื่อนที่ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกครั้งด้านขั้วแคโทด แผ่นสะสมกระแสมีหน้าที่สำคัญในการเชื่อมต่อเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นสะสมกระแสจะกั้นระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละอันที่นำมาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

3. การเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงจากช่องทางเดินแก๊สขาเข้าผ่านแผ่นรองรับไปที่ขั้วตัวเร่งปฏิกิริยา และแก๊สผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่จากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านแผ่นรองรับออกจากช่องทางเดินแก๊สขาออก ดังแสดงใน **รูปที่ 2.**

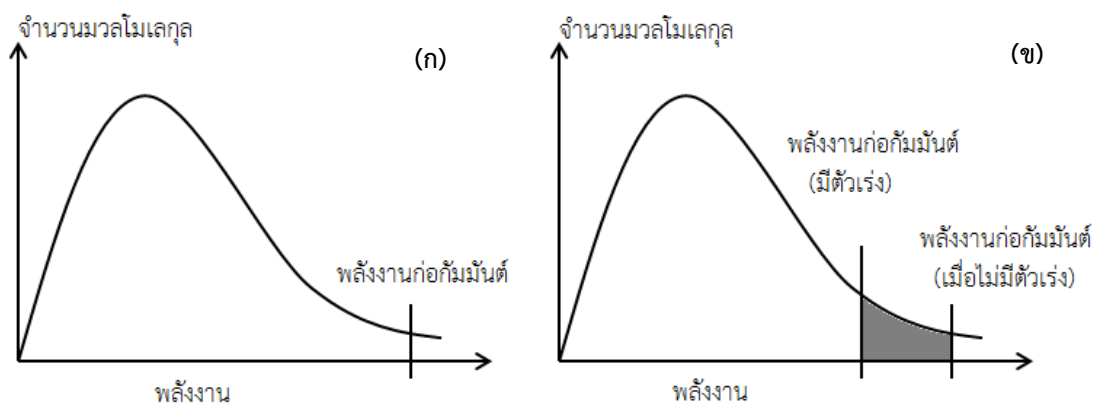


รูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของโปรตอน อิเล็กตรอนและแก๊สภายในขั้วไฟฟ้า
ที่มา (Litster and McLean, 2004)

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในบางกรณี การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเพิ่มอุณหภูมิ หรือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นอาจไม่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ลงไป เช่น การเตรียมแก๊สออกซิเจน (O_2) จากการเผาโพแทสเซียมคลอเรต ($KClO_3$) จะได้ O_2 ค่อนข้างช้า ถ้าเราเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ลงไปด้วย MnO_2 จะช่วยเร่งให้เกิด O_2 ได้เร็วขึ้น แต่สุดท้ายแล้วมันเองจะไม่มีเปลี่ยนแปลง มีเพียง $KClO_3$ เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ คือ KCl และ O_2 เราจึงให้ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นโดยที่ สารตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็น สารมัธยันตร์ (intermediate) แต่ก็กลับคืนรูปเดิมได้ในปฏิกิริยาบ่อยครั้งต่อไป

การอธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ก็ยังคงต้องใช้ ทฤษฎีการชน และกราฟการกระจายอนุภาคของแมกซ์เวลล์-โบลซ์มันน์ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ ดังนี้



รูปที่ 2.6 (ก) การแจกแจงพลังงานของอนุภาคไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา
ที่มา (สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้, 2007)

รูปที่ 2.6 (ก) และ **รูปที่ 2.6** (ข) เป็นกราฟการแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา จะสังเกตเห็นว่ามีอย่างเปลี่ยนแปลงไป สิ่งที่เปลี่ยนแปลงก็คือ ตำแหน่งของพลังงานก่อกัมมันต์เลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น จำนวนอนุภาคทางขวาของพลังงานก่อกัมมันต์มีมากขึ้น จึงเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

โปรดระวังว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้เป็นตัวลดหรือทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ลดลง แต่เป็นวิถี (pathway) หรือเส้นทางเลือกซึ่งมีพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำกว่าพลังงานก่อกัมมันต์เดิม ที่กล่าวเช่นนี้ได้ก็เพราะอนุภาคที่มีพลังงานสูง(อยู่แล้ว)ก็ยังสามารถชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะเดิมที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ถ้าพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป จะเป็นดังตัวอย่างต่อไปนี้

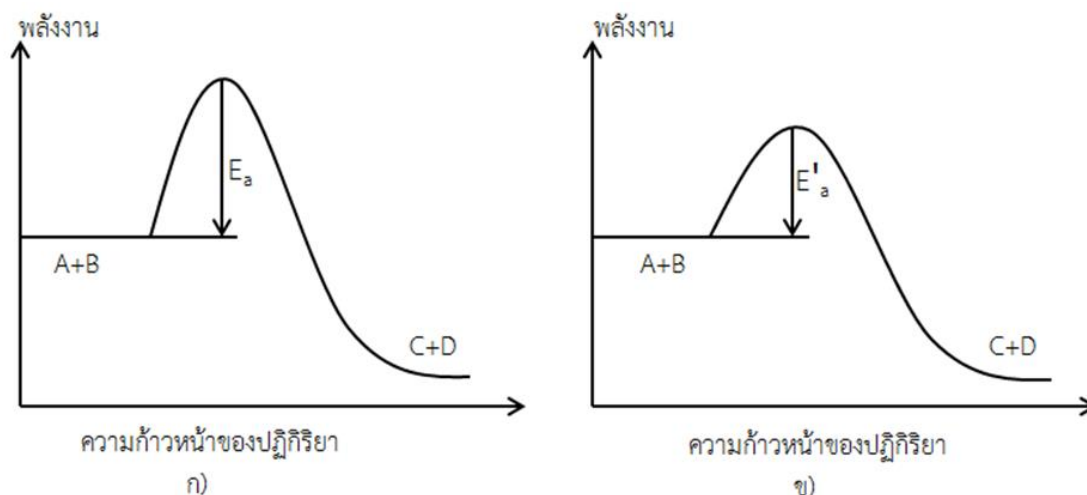
สมมติว่าปฏิกิริยามีค่าคงที่อัตราเป็น k และมีพลังงานก่อกัมมันต์เป็น E_a ดังสมการ 2.4



ถ้าใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปด้วย จะได้ค่าคงที่อัตราเป็น k_c ซึ่งเรียกว่า ค่าคงที่อัตราเมื่อถูกเร่ง (catalytic rate constant)



อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกเร่งจะสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่ง เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มเส้นทางที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นแต่พลังงานรวมของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงใน รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา ก) เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ข) เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา
ที่มา (สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้, 2007)

จากกราฟเราจะเห็นได้ว่า พลังงานก่อกัมมันต์ E_a ลดลงเป็น E'_a และพลังงานก่อกัมมันต์ลดลงทั้งปฏิกิริยาที่เกิดไปข้างหน้าและย้อนกลับ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาที่เกิดไปข้างหน้าและปฏิกิริยาที่เกิดย้อนกลับ

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาดของพื้นผิว การกระจายตัวของขนาดและปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับ และระดับการกระจายตัวของโลหะในกรณีที่มีการฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ และระดับการกระจายตัวของโลหะในกรณีที่มีการฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ เป็นต้น เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีรูพรุนมากขึ้นโดยสามารถทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวมากถึง 1500 ตารางเมตร/กรัม แต่อย่างไรก็ตาม มีตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solids) วิธีการเพิ่มพื้นผิวสามารถทำได้ โดยใช้วิธีการบดของแข็งที่ไม่มีรูพรุนนั้นให้มีขนาดเล็กลงในกรณีเช่นนี้ เราสามารถเพิ่มพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ได้โดยการฉาบบนตัวรองรับ (support) ซึ่งจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ อยู่บนตัวรองรับเหล่านั้น

2.3.1.1 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะขึ้นกับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พลังงานของพื้นผิวและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (functional group) เนื่องจากปฏิกิริยาเชิงเร่งแบบวิวิธพันธุ์ ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของแข็งมักจะเกิดขึ้นบนพื้นผิว ดังนั้น พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเราอาจคาดคะเนประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยพิจารณาจากขนาดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น

พื้นผิวของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก S_g จะเรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ในกรณีที่อนุภาคที่มีลักษณะทรงกลม ค่า S_g จะคำนวณได้จากสมการ 2.6

$$S_g = \frac{6}{\sigma d_s} \quad (2.6)$$

σ = ความหนาแน่นของอนุภาคโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

d_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เซนติเมตร)

แต่โดยความเป็นจริงแล้วอนุภาคของของแข็งมักจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ บ้างก็ไม่ใช่ทรงกลม บ้างก็มีรูพรุน การหาพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีการดูดซับ (adsorption method) และ วิธีการส่งผ่าน (transmission method)

วิธีแรกเป็นวิธีการหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทำให้แก๊สหรือของเหลวดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น และทำการคำนวณหาพื้นที่ผิวจากปริมาณการดูดซับของโมเลกุล(หรืออะตอม) ของแก๊สที่ใช้เป็นตัวถูกดูดซับโดยทั่วไปนิยมเรียกวินิจฉัยวิธีการหาพื้นที่ผิวแบบนี้ว่า วิธี BET เนื่องจากเป็นวิธีที่คิดค้นโดย Brunauer Emmett Teller

ส่วนวิธีที่สองเป็นวิธีการหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้แก๊สหรือของเหลวส่งผ่านเบตของตัวเร่งปฏิกิริยาและคำนวณหาพื้นที่ผิวจากอัตราเร็วในการส่งผ่าน วิธีนี้ทำได้ง่ายแต่ไม่ถูกต้องแม่นยำเท่ากับวิธีการดูดซับ

2.3.1.2 ปริมาตรช่องว่างและความหนาแน่นของของแข็ง ปริมาตรช่องว่าง (void volume) หรือ ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถหาได้อย่างคร่าวๆ โดยการต้มตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักในขณะที่แช่อยู่ในของเหลว เช่น น้ำ หลังจากที่อยู่อากาศภายในรูพรุนถูกแทนที่ด้วยของเหลวแล้ว ตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งเฉพาะที่ผิว (superficially dried) และนำไปชั่งน้ำหนัก เมื่อน้ำหนักส่วนที่เพิ่มขึ้นด้วยความหนาแน่นของของเหลว นั้น ก็จะทราบปริมาตรของรูพรุน แต่วิธีนี้ไม่ถูกต้องแม่นยำเท่าใดนักวิธีที่ถูกต้องแม่นยำกว่า คือ วิธี Helium-mercury

วิธีการนี้จะวัดปริมาตรของฮีเลียมซึ่งถูกแทนที่ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะนำเอาฮีเลียมออกจากระบบ และวัดปริมาตรของปรอทที่ถูกแทนที่ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอีกครั้งเนื่องจากปรอทจะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนส่วนใหญ่ของตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะบรรยากาศได้ในขณะที่ฮีเลียมจะแพร่เข้าไปได้ ดังนั้นปริมาตรของปรอทที่ถูกแทนที่ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่วัดได้จะมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรในส่วนที่เป็นของแข็งของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลต่างระหว่างปริมาตรทั้งสองจะเท่ากับปริมาตรเท่ากับปริมาตรในส่วนที่เป็นของแข็งของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เราสามารถหาสัดส่วนของช่องว่างหรือรูพรุนในอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเขียนแทนด้วย ϵ_p ได้ดังสมการ 2.7

$$\epsilon_p = \frac{\text{ปริมาตรของรูพรุนในอนุภาค}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาค}} \quad (2.7)$$

2.3.1.3 การกระจายตัวของปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับ เนื่องจากพื้นผิวภายในรูพรุนจะมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการเร่งปฏิกิริยามากกว่าพื้นผิวนอก แต่การใช้พื้นผิวภายในรูพรุนให้เกิดประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพนั้นไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของรูพรุนเท่านั้นแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของรูพรุนนั้นด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องการทราบการกระจายตัวของปริมาตรรูพรุนตามขนาดของรูพรุนต่างๆ ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากเพราะว่าช่องว่างภายในอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะมีขนาด รูปร่าง และความยาวไม่สม่ำเสมอและโดยปกติมักจะเชื่อมต่อกัน

ประเภทของรูพรุนบนตัวรองรับ แบ่งตามขนาดรูพรุนได้ดังนี้

1. รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนที่มีขนาดเช่นนี้ จะมีผลทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถแพร่ผ่านจากพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าสู่ภายในรูพรุนได้อย่างรวดเร็ว เรียกรูพรุนที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 50 นาโนเมตร นี้ว่า macropore

2. รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-50 นาโนเมตร เรียกว่า mesopores

3. รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8-2 นาโนเมตร เรียกว่า mesopores

4. รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.8 นาโนเมตร ซึ่งจะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของสาร จะเรียกรูพรุนที่มีขนาดเช่นนี้ว่า sub-micropores

การวัดการกระจายตัวของปริมาตรของรูพรุนสามารถวัดได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. วิธีการแทนที่ด้วยปรอท (mercury-penetration) ซึ่งหลักการของวิธีนี้ คือ เนื่องจากปรอทมีแรงตึงผิวมากจึงไม่ทำให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเปียก ดังนั้นถ้าต้องการที่จะทำให้ปรอทไหลเข้าสู่ภายในของรูพรุนได้จะต้องการใช้ความดันในการอัด ซึ่งความดันที่ต้องใช้นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีของรูพรุน ความดันจะแปรผกผันกับรัศมีของรูพรุน (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้อัดปรอทเข้าสู่รูพรุนและขนาดรัศมีของรูพรุน คือ แรงเนื่องจากแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นแรงที่พยายามทำให้ปรอทไหลออกจากรูพรุน) จะเท่ากับแรงที่ต้องใช้ในการดันให้ปรอทไหลเข้าสู่รูพรุน

2. วิธีการ Nitrogen-desorption โดยวิธี Nitrogen-desorption มีหลักการ คือ ทำการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำอย่างต่อเนื่องจากความดันต่ำจนกระทั่งความดันสูงขึ้นเรื่อยๆ โมเลกุลของไนโตรเจนจะถูกดูดซับบนพื้นผิวโดยการเรียงซ้อนกันมากขึ้น จนกระทั่งเต็มรูพรุน และเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนที่ควบแน่นแล้ว จะค่อยๆ ลดความดันลงเป็นช่วงๆ ทีละน้อย ทำให้ไนโตรเจนเกิดการระเหยโดยไนโตรเจนระเหยมะเหยออกจากรูพรุนที่มีขนาดใหญ่สุดก่อน หลังจากนั้นไนโตรเจนก็จะเริ่มระเหยออกจากรูพรุนที่มีขนาดเล็กลงมา ด้วยเหตุนี้ เมื่อวัดปริมาณ Nitrogen-desorption ที่อัตราส่วนความดันไปที่ค่าต่างๆ แล้ว จะทำให้สามารถทราบค่าปริมาตรของรูพรุนที่รัศมีต่างๆนั้นได้

2.3.1.4 ระดับการกระจายตัวของโลหะ ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะที่ฉาบบนตัวรองรับ การกระจายตัวของโลหะจะมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความไว (activity) ในการเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือ ถ้าโลหะมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ไม่เพียงแต่จำนวนพื้นที่ที่ว่องไว (active site) ที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังมีผลให้อะตอมที่ส่วนมุม (corner) และขอบ (edge) ของอนุภาคโลหะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังอาจเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาและค่าการเลือก (selectivity) ของปฏิกิริยาเนื่องจากผลของอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโลหะและตัวรองรับนั้น

เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะฉาบบนตัวรองรับ ส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตร (nm) ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมในการหาระดับการกระจายตัว คือ วิธีการดูดซับแก๊ส โดยวิธีนี้เป็นวิธีหาระดับการกระจายตัวของโลหะ โดยการวัดปริมาณการดูดซับแก๊สต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะที่ฉาบบนตัวรองรับและให้ 1 อะตอมที่พื้นที่ผิวโลหะสามารถดูดซับโมเลกุล (อะตอม) ของแก๊สได้ 1 โมเลกุล (อะตอม)

2.3.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน คือ วิธี impregnation วิธีตกตะกอนร่วม (co-precipitation) วิธีตกตะกอน (precipitation) วิธีคลุกเคล้า (kneading) วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นต้น ในงานวิจัยจะขอกล่าวถึงวิธีการเตรียมแบบ impregnation เพียงวิธีเดียว เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.3.2.1 วิธี impregnation เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับวิธีหนึ่งที่ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยแช่ตัวรองรับลงในสารละลายเกลือของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการทำให้ตัวรองรับชุ่มด้วยสารละลายนั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 วิธี คือ

1. วิธีดูดซับ (adsorption) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้ ตัวรองรับที่ใช้สามารถดูดซับสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไอออนของโลหะได้เล็กน้อยเพียงใด หลังจากนั้นจึงทำการดูดซับภายใต้สภาวะที่จะทำให้ปริมาณการดูดซับต่ำกว่าการดูดซับอิมมัตว เพื่อให้มั่นใจว่าปริมาณของสารทั้งหมดถูกดูดซับจนหมด

2. วิธี pore filling การเตรียมวิธีนี้ผู้เตรียมต้องทำการวัดปริมาณของรูพรุนภายในตัวรองรับก่อน หลังจากนั้นก็จะเติมสารละลายเกลือของตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาตรเท่ากับปริมาตรของรูพรุน ซึ่งตัวรองรับก็จะดูดเอาสารละลายเหล่านั้นเข้าไปในรูพรุน

3. วิธี incipient wetness วิธีนี้เป็นวิธีการเตรียมแบบทำให้ตัวรองรับเปียกชุ่มไปพร้อมๆ กับการวัดปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับนั้น กรรมวิธี คือ กวนตัวรองรับไปพร้อมๆ กับหยดสารละลายเกลือของตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับ จนกระทั่งตัวรองรับนั้นเปียกอย่าทั่วถึง แต่ไม่เหลือมากจนเกินไป ปริมาณการฉาบตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย

4. วิธีการระเหยจนแห้ง วิธีนี้เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง โดยการแช่ตัวรองรับลงในสารละลายเกลือของตัวเร่งปฏิกิริยาและนำขึ้นวางบนอ่างน้ำร้อน ทำการกวนไปพร้อมๆ กับให้ความร้อน ตัวทำละลายจะถูกระเหยจนกระทั่งส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นแห้งติดอยู่บนตัวรองรับ วิธีนี้เหมาะสำหรับใช้ในกรณีที่ต้องการให้ปริมาณการฉาบมีจำนวนมากๆ แต่ข้อเสียวิธีนี้คือ ยากที่จะทำให้การกระจายตัวของส่วนประกอบเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

5. วิธีฉีดพ่น (spray) วิธีการนี้จะทำโดยการใส่ตัวรองรับเข้าไปในเครื่องระเหย แล้วทำการกวนไปพร้อมๆ กับระบายแก๊สออกจากเครื่องระเหยนั่น และทำการฉีดพ่นสารละลายเกลือของตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับไปพร้อมๆ กับการอบแห้ง

จะเห็นได้ว่าวิธี impregnation เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่อนข้างง่ายและสามารถควบคุมปริมาณการฉาบของสารได้ ข้อควรระวังคือการปนเปื้อนของสิ่งเจือปนซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้และเมื่อทำการเผาก็จะทำให้เกิดเป็นสิ่งปนเปื้อนหลงเหลืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้เพื่อไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อนหลงเหลืออยู่จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง

2.3.2.2 กรรมวิธีหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การทำให้แห้ง (drying) เป็นกระบวนการที่กระทำเพื่อกำจัดน้ำในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำในตู้อบหรือทิ้งไว้ในอากาศ แต่นิยมทำในตู้อบที่ 100 °C ประมาณ 24 ชั่วโมง

2. การเผาที่อุณหภูมิสูง (calcination) การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการ ดังนี้

เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ เช่น ไอออนบวก/ไอออนลบที่ไม่เสถียร และสารที่ระเหยได้ง่ายที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเปลี่ยนรูปเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยการเลือกใช้อุณหภูมิขึ้นกับโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และถ้าโลหะออกไซด์นั้นถูกรีดิวซ์อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้เกิดเป็นโลหะขึ้น

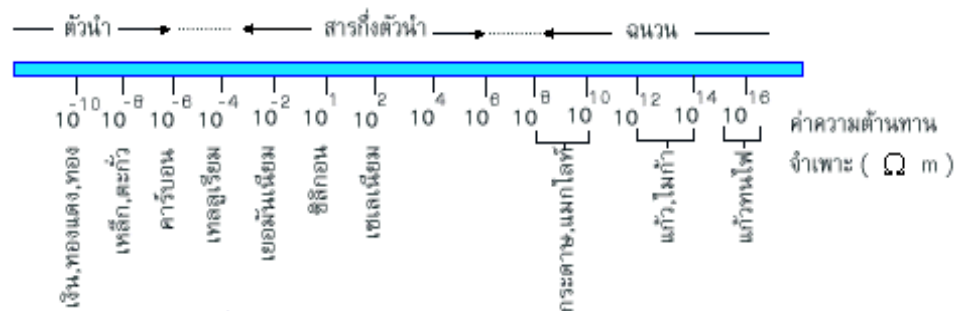
อุณหภูมิที่ใช้ควรสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพการเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (excessive sintering) ซึ่งถ้าเกิดการรวมตัว (sintering) จะทำให้พื้นที่ผิว (surface area) ลดลง มีผลทำให้ตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (active site) ลดลง และอาจเป็นสาเหตุของการจำกัดการแพร่ (diffusional limitation) เพราะขนาดของรูพรุนที่เล็กลง

ปริมาณและการแจกแจง (dispersion) ของเกลือโลหะบนพื้นผิวภายในของตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ปริมาณและการแลกเปลี่ยนขึ้นอยู่กับลักษณะการดูดซับของเกลือเข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับ ในขั้นต้นแรก การแจกแจงของเกลือโลหะยังไม่สม่ำเสมอ ซึ่งในตอนแรกปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย และเมื่อการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวแล้วความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อการดูดซับ เมื่อการดูดซับอิ่มตัวแล้ว จะนำตัวเร่งปฏิกิริยามาอบแห้ง เพื่อเป็นการกำจัดตัวทำละลาย การอบจะมีการให้ความร้อนอย่างช้าๆ เพื่อให้การระเหยเป็นไปอย่างช้าๆ (เนื่องจากตัวรองรับมีขนาดรูพรุนต่างกัน เมื่อทำการระเหยสารละลายที่มีขนาดเล็ก)

2.3.3 แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นสารกึ่งตัวนำ องค์ประกอบของสารสารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เช่น ซิลิกอน เยอรมันเนียม และเทลลูเรียม เป็นต้น สารดังกล่าวเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ คือ มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อยจึงไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมาก ฉะนั้นลำพังสารนี้อย่างเดียวแล้วไม่สามารถทำประโยชน์อะไรได้มากนัก ดังนั้น เพื่อที่จะให้ได้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากเราจึงต้องมีการปรุงแต่งโดยการเจือปนอะตอมของธาตุอื่นลงไปเนื้อสารเนื้อเดียวเหล่านี้ หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นโดยวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสารที่ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไดโอดชนิดต่าง ๆ

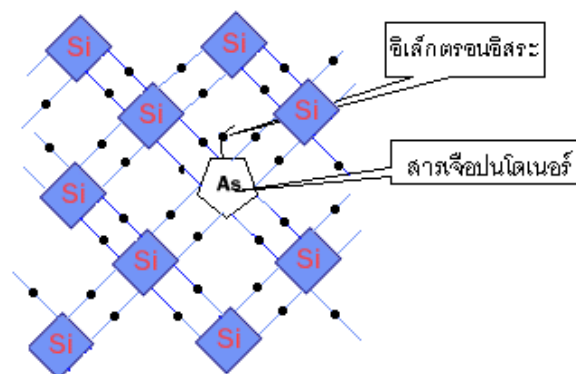
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีเฉพาะอะตอมของธาตุชนิดเดียว คือไม่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นปนอยู่เลยแสดงดัง **รูปที่ 2.8**



รูปที่ 2.8 สมบัติการนำไฟฟ้าของธาตุชนิดต่างๆ
ที่มา (นรินทร์ เนาวประทีป, 2559)

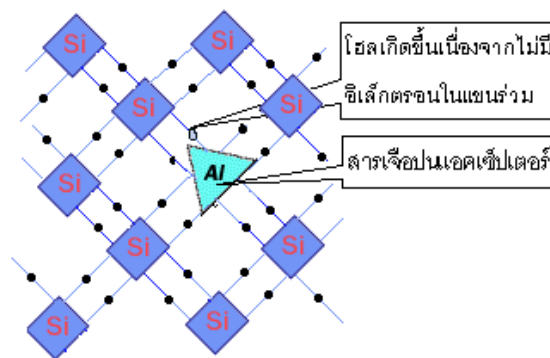
สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำแท้ เช่น ซิลิกอน หรือเยอรมันเนียม เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-type) และสารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-type)

2.3.3.1 สารกึ่งตัวนำประเภท เอ็น (N-type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของสารหนู ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในก้อนผลึกนั้นจึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้เช่นเดียวกับตัวนำทั่วไป

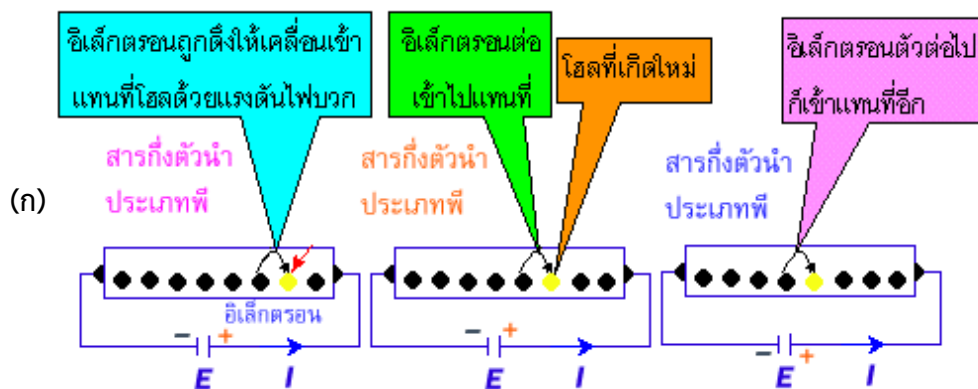


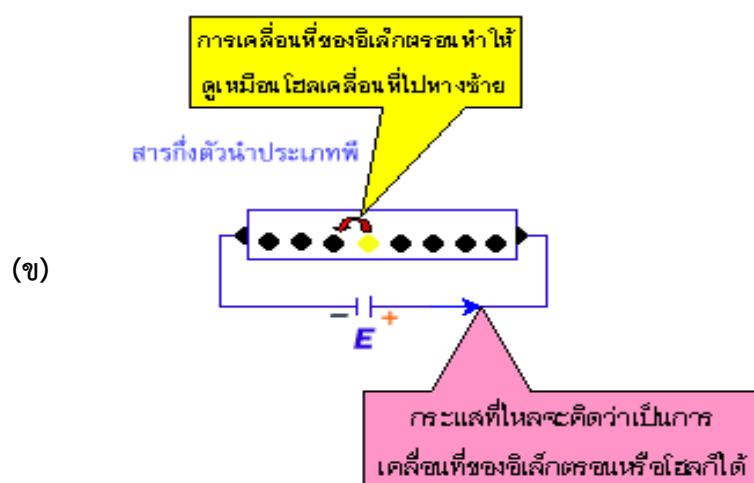
รูปที่ 2.9 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท N
ที่มา (นรินทร์ เนาวประทีป, 2559)

2.3.3.2 สารกึ่งตัวนำประเภท พี (P-type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของอะลูมิเนียม ทำให้เกิดที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) ขึ้นในแขนร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮลทำให้ดูคล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้ดัง รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 พลิกสารกึ่งตัวนำประเภท P
ทิมมา (นรินทร์ เนาวประทีป, 2559)





รูปที่ 2.11 การไหลของกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำประเภท P
ทึม (นรินทร์ เนาวประทีป, 2559)

ข้อสังเกต จาก รูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าโพลีจะเคลื่อนที่จากศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำ

2.4 ตัวรองรับ (Patrick, 1995)

ตัวรองรับ เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวต่ำและมีราคาแพง อาจอยู่ในรูปของเม็ด (pellet) หรือผง (powder) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ Al_2O_3 (alumina), SiO_2 (silica) และ C (carbon)

หน้าที่ของตัวรองรับ (Support)

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ (metal dispersion)
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวที่โครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตำแหน่งว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (active site)
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานภาวะ การรวมตัวกันเนื่องจากความร้อน

(agglomeration)

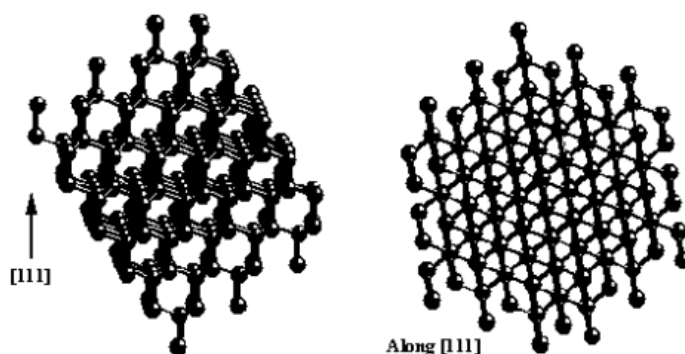
การเลือกตัวรองรับ (support)

- เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ

- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการเช่น ทนต่อการกัดสีและแรงกด มีความแข็งแรง เป็นต้น
- ควรมีพื้นที่ผิวมาก แต่ต้องคำนึงถึงขนาดของโมเลกุล
- มีรูพรุน ประกอบด้วยขนาดรูพรุนเฉลี่ยและการกระจายตัวของรูพรุน
- ราคาถูก

2.4.1 คาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแบบ $1s^2 2s^2 2p^2$ ซึ่งสามารถสร้างพันธะได้มากถึง 4 พันธะ และสามารถสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนได้ (catenation) ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวของออร์บิทัลแบบ sp^3 เป็นลักษณะพันธะของโครงสร้างเพชร และ sp^2 เป็นลักษณะพันธะของแกรไฟต์ คาร์บอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะตามโครงสร้างของผลึก คือ โครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) มีลักษณะของผลึกที่แข็งแรงหรือก็คือโครงสร้างของเพชรนั่นเอง ดังรูปที่ 2.14 และโครงสร้างของแกรไฟต์



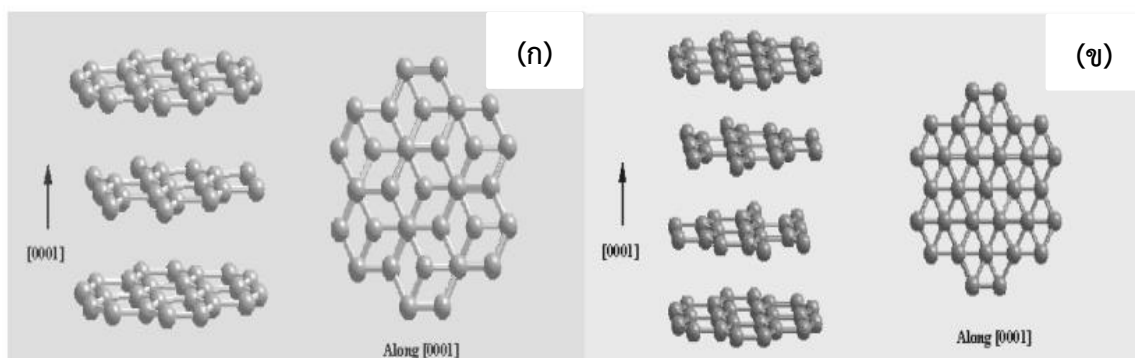
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเพชร

ที่มา (วินิตย์ บุญเทียร, 2547)

2.4.1.1 แกรไฟต์ (graphite) แกรไฟต์เป็นรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ประกอบไปด้วยโครงสร้างเป็นชั้นๆ ภายในชั้นเดียวกันคาร์บอนแต่ละอะตอมสร้างพันธะโควาเลนต์กับอะตอมคาร์บอนข้างเคียงอีก 3 อะตอมในแนวระนาบ (plane) ในลักษณะสมมาตร อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน จากการวัดความยาวพันธะแต่ละพันธะภายในชั้นของแกรไฟต์ยาว 142 พิโกเมตร (pm) อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปได้ทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเร

โซแนนซ์ (resonance) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอมดิสเพลสเมนต์ (displacement)

โครงสร้างของแกรไฟต์มีลักษณะเป็นชั้นที่สร้างขึ้นจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นวง 6 เหลี่ยม เรียงซ้อนกันอยู่ โครงสร้างของแกรไฟต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) ดัง รูปที่ 2.13 (ข) เป็นโครงสร้างที่มีการซ้อนกันของชั้นที่สร้างขึ้นจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นวง 6 เหลี่ยมในลักษณะ ABABAB ซึ่งชั้น A จะวางสลับกับชั้น B โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 335.4 พิกโกเมตร (pm) และอีกหนึ่งโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อยกว่า คือ รอมโบฮีดรอล (rhombohedral) มีการเรียงตัวของชั้นที่สร้างขึ้นจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นวง 6 เหลี่ยมในลักษณะ ABCABCABC ดัง รูปที่ 2.13 (ก)



รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างแกรไฟต์ (ก) รอมโบฮีดรอล (rhombohedral), (ข) เฮกซะโกนอล (hexagonal)

ที่มา (วินิตย์ บุญเทียร, 2547)

จากโครงสร้างของแกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้เนื่องจากภายในชั้นที่สร้างขึ้นจากการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นวง 6 เหลี่ยมอะตอมคาร์บอนมีโครงสร้างเป็นเรโซแนนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทั่วไปภายในชั้นเดียวกัน แกรไฟต์จึงนำไฟฟ้าได้ดีเฉพาะในทิศทางที่ขนานกับชั้นเท่านั้น

ในการเตรียมตั้งเร่งปฏิกิริยาแกรไฟต์ที่นำมาใช้นั้นมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน เกิดจากการจัดเรียงตัวของที่บกพร่องของผลึก ส่งผลให้โครงสร้างที่ได้มีความแตกต่างจากโครงสร้างเดิมอย่างเห็นได้

ขีด ปริมาณออกซิเจนบนพื้นผิวของคาร์บอนเป็นตัวกำหนดสมบัติของพื้นผิวคาร์บอน เช่น สมบัติการดูดซับ (adsorption) การติดแน่น (adhesion) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เราสามารถแบ่งประเภทของพื้นผิวคาร์บอนได้ตามลักษณะของออกซิเจนบนพื้นผิวคาร์บอนได้เป็น 2 พวกคือ พื้นผิวที่แสดงสมบัติเป็นกรด สามารถทำได้โดยนำคาร์บอนไปให้ความร้อนที่ 600-900 เคลวิน ในบรรยากาศปกติหรือบรรยากาศที่มีออกซิเจน ส่วนพื้นผิวคาร์บอนที่แสดงสมบัติเป็นเบสทำได้โดยนำคาร์บอนมาเผาที่อุณหภูมิ 875 เคลวิน ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน (Ar) แล้วค่อยๆทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิ 300 เคลวิน ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน หลังจากนั้นจึงปล่อยให้สัมผัสบรรยากาศปกติ

2.4.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT)

คาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ วัสดุสังเคราะห์โครงสร้างนาโนรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับสังเคราะห์โครงสร้างนาโนรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผมของมนุษย์พบว่ามีความเล็กกว่าถึง 50,000 เท่าลักษณะการจัดเรียงอะตอมของธาตุคาร์บอนเป็นแบบแผ่น เชื่อมโยงเป็นตาข่ายที่มีรูรูปหกเหลี่ยมและมันวนตัวเข้าหากันเป็นทรงกระบอกดัง **รูปที่ 2.14** อะตอมของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษที่ดีหลายประการ ปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างมากที่สุดในกลุ่มนักวิจัยทั่วโลก

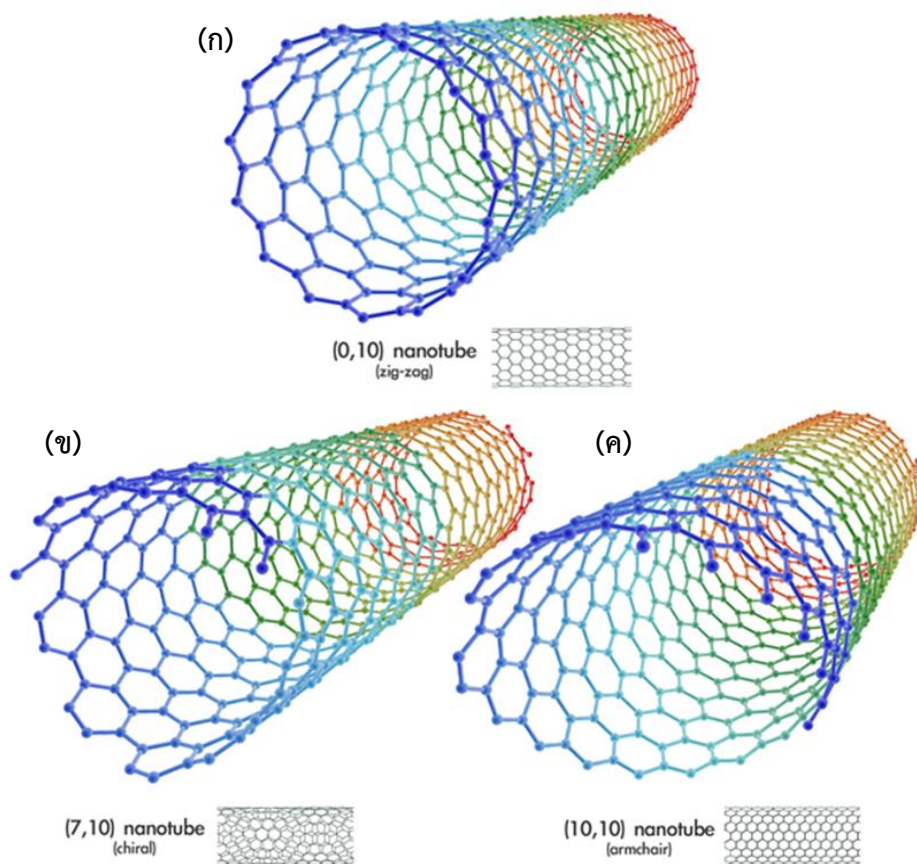


รูปที่ 2.14 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์

ที่มา (สถาบันนวัตกรรมและการพัฒนากระบวนการเรียนรู้, มหิดล)

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถสังเคราะห์โครงสร้างของท่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.4-4.0 นาโนเมตร และมีความยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร การ

สังเคราะห์อาจแบ่งได้ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. แบบผนังชั้นเดียว (single wall carbon nanotube) และ 2. แบบผนังหลายชั้น (multi wall carbon nanotube) และแต่ละลักษณะยังสามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีก 3 แบบ ตามการม้วนของแผ่นตาข่าย ได้แก่ 1. zig zag, 2. chiral และ 3. armchair ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (ก) zig zag, (ข) chiral และ (ค) armchair

ที่มา (สภาพร คำหอม, 2558)

ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้ง 3 แบบ ดังกล่าว และรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนมีความยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติที่พิเศษที่โดดเด่นออกมามากมาย เช่น มีความแข็งแรงที่มากกว่าเพชรและแกรไฟต์ การเปรียบเทียบกับ

สิ่งใกล้ตัวให้ชัดเจนกว่านี้สามารถบอกได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความแข็งแรงมากกว่ามากกว่าเหล็กกล้าถึง 10-100 เท่า รวมทั้งมีความยืดหยุ่นสูงถึง 1 TPa ในขณะที่เพชรมีค่าความยืดหยุ่นเป็น 1.2 TPa จึงพบว่าทั้งสองมีค่าต่างกันเล็กน้อย นอกจากสมบัติทางกลที่ดีแล้วคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนที่ดีไม่แพ้กัน นั่นคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 2,800°C ที่สภาวะสูญญากาศ และมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีกว่าเพชร อีกทั้งมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี คือมีค่าความจุการนำไฟฟ้าสูงกว่าทองแดงถึง 1,000 เท่า สมบัติที่ดีเหล่านี้ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้รับความนิยมในวงกว้างทั้งในด้านอุตสาหกรรม สุขภาพ และพลังงาน ซึ่งจะได้แสดงตารางสรุปคุณสมบัติทั่วไปของคาร์บอนนาโนทิวบ์ดัง ตาราง 2.2

ตาราง 2.2 สรุปคุณสมบัติทั่วไปของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (สภาพร คำหอม, 2558)

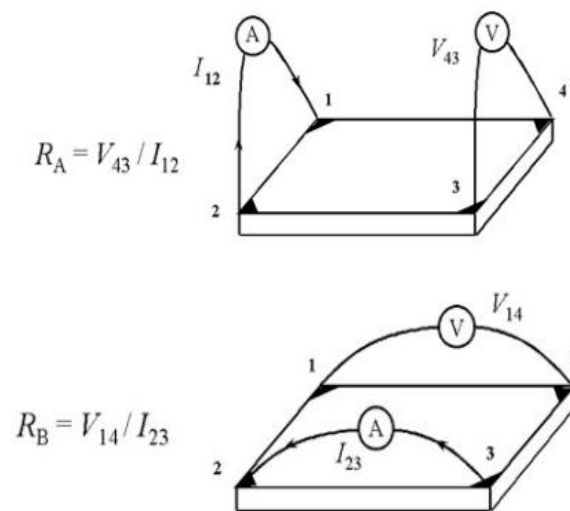
Properties of Carbon Nanotubes	
Specific Density	1.3 – 2
Elongation (TPa)	1
Strenght (GPa)	10 – 60
Strain at Break (%)	10
Thermal Conductivity (W/m.K)	>3,000
Electrical Conductivity	106 - 107

เมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติที่พิเศษอย่างนี้ นักวิจัยจึงได้ศึกษาเชื่อมโยงคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปยังสิ่งอื่นๆ เพื่อคาดหวัดว่าจะเป็นการพัฒนาสิ่งใหม่ๆ ขึ้นมาบนโลกนี้จากพื้นฐานของการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังจะเห็นได้ว่าในช่วงประมาณ 23 ปีที่ผ่านมา งานวิจัยทางด้านนี้ได้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปี จึงมีความเป็นไปได้ถึงอนาคต ว่าคงไม่นานทุกคนจะได้เห็นนวัตกรรมใหม่ๆ ออกมาบนโลกใบนี้

2.5 สภาพต้านทานไฟฟ้า

เทคนิค van der Pauw เป็นวิธีการสำหรับวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสะดวกและสามารถวัดสภาพความต้านทานของชิ้นงานที่มี

รูปร่างไม่เฉพาะเจาะจง (arbitrarily shaped) และมีลักษณะบาง การวัดสภาพต้านทานด้วยวิธีนี้มีการจัดวางตำแหน่งของชิ้นงานในการวัดโดยให้หัววัดอยู่ที่ตำแหน่งของชิ้นงานทั้ง 4 ด้านแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.16 การจัดเรียงตำแหน่งในการวัดด้วยเทคนิค van der Pauw ที่มา (Nordlund, 2002)

กระแส (I_{12}) จะถูกป้อนผ่านตำแหน่ง 1 และ 2 แล้วทำการวัดความต่างศักย์ (V_{43}) ที่ตำแหน่ง 4 และ 3 จากนั้นนำมาหาค่าความต้านทานดังสมการ 2.8

$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad (2.8)$$

แล้วทำการป้อนกระแส (I_{23}) ผ่านตำแหน่ง 2 และ 3 และทำการวัดความต่างศักย์ (V_{14}) ที่ตำแหน่ง 1 และ 4 จากนั้นนำมาหาค่าความต้านทานดังสมการ 2.9

$$R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.9)$$

แล้วนำค่า R_A และ R_B แทนค่าในสมการ 9.10

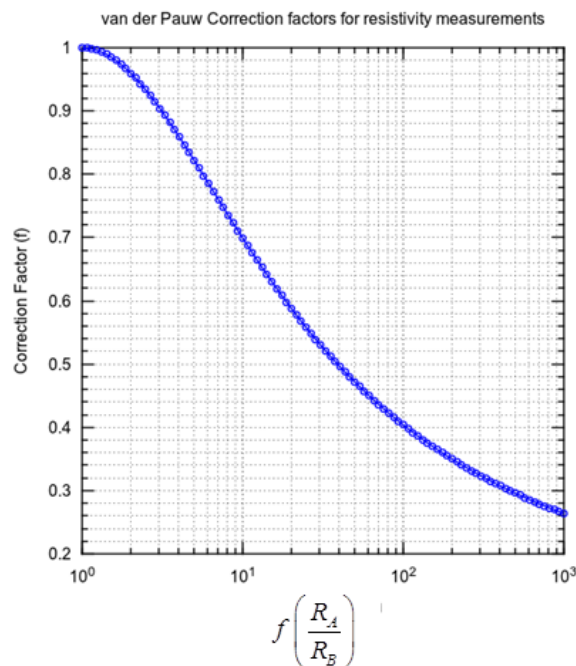
$$\exp\left(-\frac{\pi R_A}{R_s}\right) + \exp\left(-\frac{\pi R_B}{R_s}\right) = 1 \quad (2.10)$$

R_s = ความต้านทานของชิ้นงาน (โอห์ม)

นำค่าความต้านทานของชิ้นงาน นำมาคำนวณหาสภาพความต้านทาน (ρ) ดังสมการ 2.11

$$\sigma = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_A + R_B)}{2} f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \quad (2.11)$$

d = ความหนาของชิ้นงาน (เซนติเมตร)



รูปที่ 2.17 $f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)$ (L.J.van der Pauw, Philips Res. Rpts,1958)

ที่มา (L.J.van der Pauw, Philips Res. Rpts,1958)

โดยที่ $f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)$ ซึ่งหาได้จากกราฟใน รูปที่ 2.19

2.6 โพลาริเซชัน (Polarization) (EG&G Services Parsoon Inc, 2003)

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีจะประมาณ 1.23 โวลต์ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับค่าความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (overpotential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงที่เกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.12

$$E_{cell} = E_{cell}^0 - |\mathcal{E}_c| - |\mathcal{E}_a| - IR \quad (2.12)$$

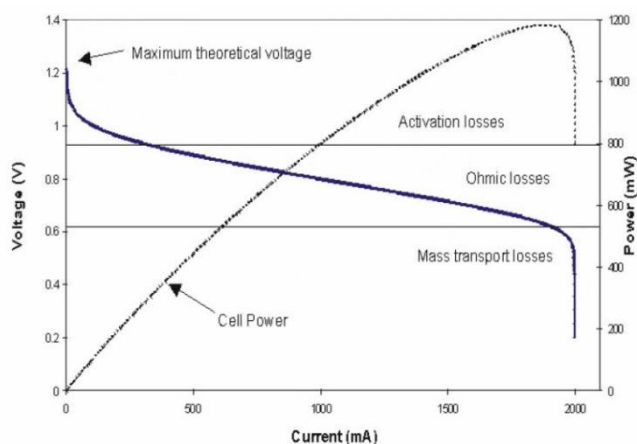
โดยที่ (E_{cell}) คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)

\mathcal{E}_c คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (โวลต์)

\mathcal{E}_a คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (โวลต์)

IR คือ เทอมของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟ โพลาริเซชันจะได้ดังแสดงใน รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน
ที่มา (Hoogers, 2003)

ที่ค่าความหนาแน่นเท่ากับศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี โดยที่เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (open-circuit potential) ซึ่งเกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะมี การเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทด ส่งผลให้เกิดกระแสภายใน (internal current) ทำให้เกิด ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็เกิด ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง จาก รูปที่ 2.18 เมื่อ ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น พลว่ามี การลดลงของศักย์ไฟฟ้า เป็นผลมาจากการเกิดโพลาริเซชัน โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาริเซชันออกเป็น 3 ช่วง คือ โพลาริเซชันทางเคมี (chemical polarization) โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (resistance polarization) โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (concentration polarization)

โพลาริเซชันทางเคมี (chemical polarization) หรือ activation polarization จะเกิด ในช่วงแรกของการลดลงของความต่างศักย์คร่อมเซลล์เชื้อเพลิง เกิดเนื่องจากผลของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องมาจากอัตราเร็วของปฏิกิริยา ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออก

จากเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำ จะเกิดโพลาริเซชันในทางเคมีมากทำให้กราฟที่เกิดขึ้นมีความชันมาก

วิธีแก้ไข คือ เพิ่มพลังงานโมเลกุลของสารตั้งต้นให้มากขึ้น เช่น เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น หรือในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตรอน จะอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลตตินัม เพื่อช่วยลดกำแพงพลังงานศักย์ลง

โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (resistance polarization) เกิดจากการต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วไฟฟ้าและที่บริเวณแผ่นสะสมกระแส รวมถึงความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตรอนผ่านเยื่อเมมเบรน โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดในช่วงกลางของกราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงใน รูปที่ 2.18 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความหนาแน่นกระแส (current density)

วิธีแก้ไข คือ เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสะสมกระแสให้มีค่าความต้านทานต่ำ และเลือกอิเล็กโทรไลต์ที่มีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนสูง เพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอนและทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น

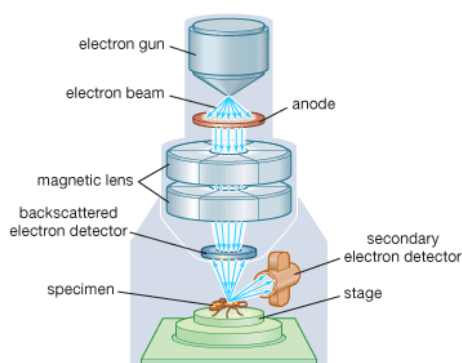
โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (concentration polarization) เกิดในช่วงท้ายสุดของกราฟโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง เมื่อเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นลดลง เนื่องจากสารไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นต่างๆ เข้าไปที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยา เป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตาม สมการของ Nernst (Bockris and Srinivasan, 1969) ในเชิงทฤษฎีบ่งบอกให้ทราบว่าค่าความแตกต่างของความต่างศักย์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันต่างกันซึ่งแสดงได้ด้วยกราฟโพลาริเซชัน จะมีค่าคงที่เสมอแต่ในเชิงปฏิบัติค่าความต่างศักย์จะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อความหนาแน่นกระแสมากขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดของการแพร่ของแก๊ส โดยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความดันสูงกว่าแก๊สจะสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าระบบที่มีความดันต่ำกว่า ในกรณีที่ใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่พบปัญหานี้เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์จะเกิดปัญหานี้ขึ้น เนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า ดังนั้น เมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดซ์จำเป็นจะต้องมีออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุด ทางด้านไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชัน เนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกันโดยเกิดกับกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง

(reforming) ซึ่งมีการปนเปื้อนด้วยแก๊สอื่น ดังนั้น ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าลดลง เป็นเหตุให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

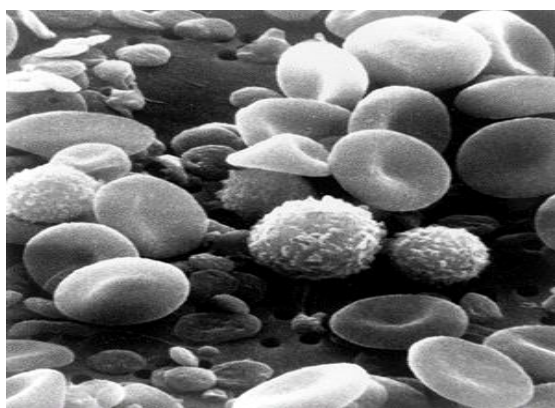
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น





รูปที่ 2.19 ลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่มา (Introduction to Nanotechnology, 2552)

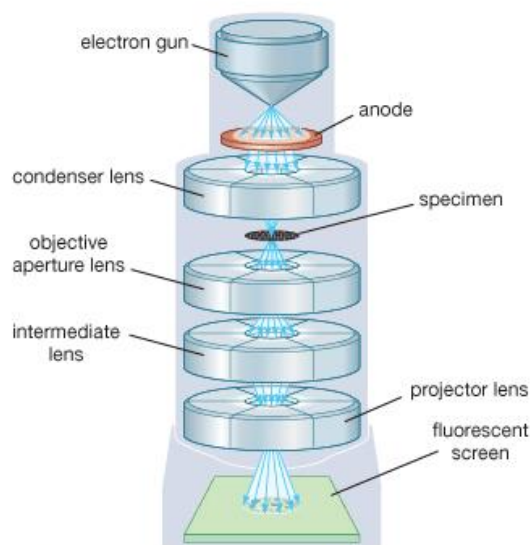
หลักการทำงานของเครื่อง SEM ดัง **รูปที่ 2.19** จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตระทัศน์ได้เลย



รูปที่ 2.20 แสดงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่มา (Introduction to Nanotechnology, 2552)

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

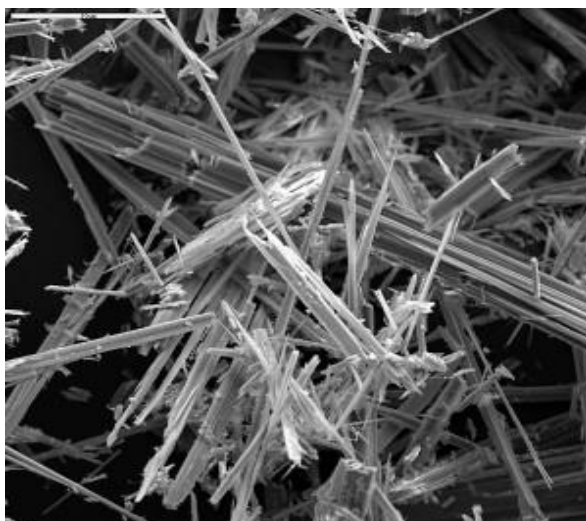
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Transmission electron microscope (TEM)



รูปที่ 2.21 ลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่มา (Microscopes and ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2015)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านดัง รูปที่ 2.21 นั้น จะอาศัยลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับวัตถุที่ต้องการจะส่อง โดยอาศัยการป้อนพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดที่เป็นขั้วแคโทด เมื่อพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา แต่เนื่องจากตัวอิเล็กตรอนมันเป็นขั้วประจุไฟฟ้า มันก็จะวิ่งเข้าไปหาอนุภาคที่มีขั้วประจุต่างกันเช่นในอากาศ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถวิ่งเข้าไปชนเป้าชิ้นตัวอย่างหรือ sample ได้ ดังนั้นภายในกล้องจุลทรรศน์จะต้องทำให้เป็นระบบสุญญากาศ และจะมี condenser เป็นตัวเพิ่มความเข้มแสง ซึ่งจะใช้เป็นขดลวดพันรอบแท่งเหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้ทิศทางของลำอิเล็กตรอนอยู่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะให้เกิดความเข้มของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น

เมื่ออนุภาคหรือลำแสงอิเล็กตรอนสามารถวิ่งไปชนวัตถุหรือชิ้นงาน แสงก็จะถูกดูดกลืนและลำแสงส่วนที่เหลือก็สามารถทะลุผ่านชิ้นวัตถุไปยัง เลนส์วัตถุ objective Len หลังจากนั้นทางด้านล่างของเลนส์วัตถุจะมีระบบเลนส์ต่างๆเพื่อแยกการมองออก เป็นสองเส้นทาง ทำให้ได้ภาพเป็นสองมิติ โดย fluorescence screen จะเป็นฉากรับภาพ



รูปที่ 2.22 แสดงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่มา (Microscopes, 2015)

2.9 XRD-X-ray Diffactometer เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.23 เครื่อง XRD

ที่มา (สรินทร์ ลิ้มปนาท, 2543)

ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย คำนวณหาขนาดของผลึกจากสมการของแบรกก์จากสมการ (2.13)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.13)$$

2.10 Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)



รูปที่ 2.24 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)

ที่มา (ภาคอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน องค์กรมหาชน, 2559)

เครื่อง infrared spectrometer ดัง รูปที่ 2.26 จะใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงของอินฟราเรดแล้วทำการวัดค่า ความเข้มแสงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นหรือเลขคลื่น (frequency -domain spectrum) ซึ่งก็จะได้ออกมาเป็นสเปกตรัม แต่สำหรับ FT-IR จะใช้การวัด ความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กันอย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบกับเวลา (time - domain spectrum) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสเปกตรัมของความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นโดยการ Fourier Transform ด้วยคอมพิวเตอร์ก็จะได้ออกมาเป็น fourier transform spectrum ด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้นพร้อมทั้ง resolution ก็ดีขึ้นด้วย

2.10.1 องค์ประกอบของเครื่อง FT-IR

1. แหล่งกำเนิด laser เพื่อใช้แสง laser ในการปรับระยะของ mobile mirror
2. Mobile mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อน รังสีอินฟราเรดและสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
3. Fixed mirror เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดเช่นเดียวกับ MobileMirror แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้
4. Beam splitter เป็นส่วนที่จะทำการแยกอินฟราเรดที่ผ่านเข้ามาให้เป็นสองส่วนคือสามารถให้แสงทะลุผ่านได้ 50 % และจะสะท้อนกลับ 50 %
5. เป็นกระจกเงาที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใช้ในการบังคับทิศทางการเดินทางของรังสีอินฟราเรด ให้ไปตามทิศทางที่ต้องการ
6. Sample compartment เป็นส่วนที่จะใช้ในการบรรจุ sample เข้าไปเพื่อการวิเคราะห์
7. Detector ใช้วัดความเข้มแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

2.10.2 การทำงานของเครื่อง FT-IR

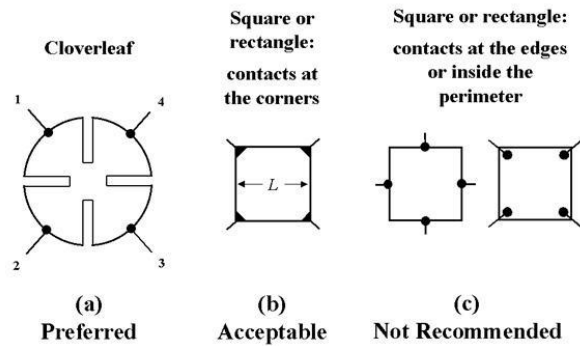
1. แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์

2. Beam splitter ซึ่ง Beam splitter จะปล่อยให้ทะลุผ่านไปที่ Fixed mirror 50% และสะท้อน กลับมาที่ Mobile mirror 50%
3. Fixed mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam splitter
4. Mobile mirror จะสะท้อนกลับมาที่ Beam splitter
5. อินฟราเรดที่สะท้อนมาจาก ทั้ง Mobile mirror และ Fixed mirror จะมารวมกันและเกิดการแทรกสอดกันขึ้น แต่จากการที่ Mobile mirror สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ โดย laser เมื่อ Mobile mirror เคลื่อนที่ก็จะทำให้ระยะทางการสะท้อนกลับของ รังสีอินฟราเรด ของ Mobile mirror และ Fixed mirror ไม่เท่ากันซึ่งก็จะส่งผลให้ รังสีอินฟราเรดที่ได้มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปอันเกิดจาก การแทรกสอด แบบเสริมกัน หรือหักล้างกัน เรียกว่า interferogram
6. อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะสะท้อนไปที่ sample compartment ผ่าน sample ซึ่งจะมีการดูดกลืนอินฟราเรด เอาไว้บางส่วนในบางความยาวคลื่น ส่วนอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะผ่านเข้าสู่ detector สัญญาณที่ได้คอมพิวเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณ Interferogram ด้วยสมการ fourier transform ผลที่ได้จะเป็นสเปกตรัม การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่างๆ

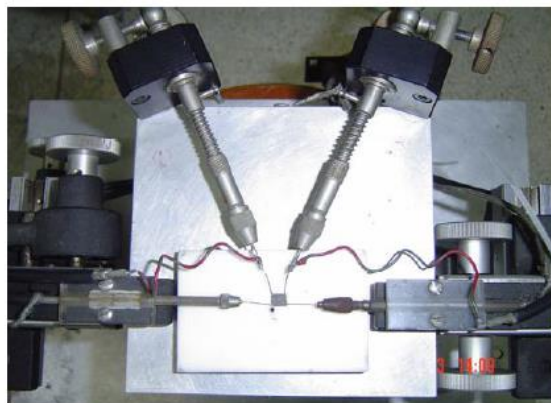
2.11 วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคแวนเดอร์พอว์ (Van der Pauw 1958)

แวนเดอร์พอว์ได้เสนอวิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่มีรูปร่างใดๆ ดังตัวอย่าง **รูปที่ 2.27** ได้เป็นผลสำเร็จในปี ค.ศ. 1958 โดยทำขั้วไฟฟ้าเล็กๆที่ขอบของวัสดุทั้งสี่จุดในการวัดสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า สามารถวัดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงรูปแบบของการไหลของกระแสไฟฟ้า ถ้าชิ้นงานมีลักษณะดังนี้

จะต้องต่อขั้วไฟฟ้าที่ขอบของชิ้นงาน ขั้วไฟฟ้าจะต้องมีขนาดเล็ก ชิ้นงานจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอและพื้นผิวหน้าของชิ้นงานจะต้องเรียบ



รูปที่ 2.25 ชิ้นงานรูปร่างต่างๆ
ที่พามา (Van der Pauw, 1958)



รูปที่ 2.26 หัววัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค Van der Pauw
ที่พามา (วินิตย์ บุญเกียรติ, 2547)

การวิเคราะห์สภาพต้านทานของขั้วไฟฟ้า

1. นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มาวางตรงตำแหน่งของหัววัด
2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเปิดโปรแกรมควบคุมกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10000 มิลลิแอมป์ และป้อนค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า จากนั้นเครื่องก็จะทำการวัดและคำนวณค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจนา พงษ์ศักดิ์ (2547) ศึกษาหาสภาวะในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อปรับปรุงสมรรถนะตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าแอโนด ให้มีความทนทานแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ปนเปื้อนเข้ามาที่กระแสเชื้อเพลิง ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เนื่องจากโลหะแพลทินัมสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดี แต่เมื่อมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ปนเปื้อนเข้ามาในกระแสเชื้อเพลิง แม้ในปริมาณที่น้อยมากๆ สามารถทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงอย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้ใช้โลหะผสมแพลทินัมสองและสามชนิดบนตัวรองรับคาร์บอนใจแกนติก โลหะที่ใช้คือ รูทีเนียม พาลลาเดียม ดีบุก และโมลิบดีนัม ซึ่งเตรียมโดยวิธีเตรียมแบบฝังโดยตรง และปรับปรุงคุณภาพตัวเร่งด้วยการเผาในบรรยากาศเฉื่อยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และรีดิวส์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมตรวจสอบสมบัติและโครงสร้างด้วย TPR การดูดซับทางเคมีของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชันและเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน หน่วยเยื่อแผ่นและอิเล็กโทรดเตรียมโดยวิธี กัดอัดด้วยความร้อนโดยใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 ส่วนในล้านส่วน เพื่อทดสอบความทนทานคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมแบบสามชนิด ให้ผลดีกว่าสองชนิดและดีกว่าแพลทินัม โดยขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติและสัดส่วนของโลหะผสม มีผลต่อความสามารถในการทนทานคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิง และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสม PtRuSn/C และ PtRuMo/C ในอัตราส่วน 1:1:0.22 โดยอะตอมให้ผลความทนทานแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมชนิดและสัดส่วนอื่นๆ

ปานจันทร์ ศรีจรูญและคณะ (2551) การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน คือ การศึกษาพัฒนาเกี่ยวกับส่วนประกอบ PEMFC โดยหนึ่งในส่วนประกอบหลักนั้นคือ แผ่นสองขั้ว ซึ่งในปัจจุบันแผ่นสองขั้วมักจะทำจากแกรไฟต์ ซึ่งมีราคาแพงและมีน้ำหนักสูง งานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาการสร้างแผ่นสองขั้วจากวัสดุผสมของแกรไฟต์ผงกับพอลิเมอร์ได้แก่ พอลิพรอพิลีน, พอลิเมธิลเมธาไครเลต และพอลิเอทิลีนเทรฟธอลเลต เพื่อศึกษาผลของชนิดของพอลิเมอร์และปริมาณของแกรไฟต์ผงที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุผสม โดยในการทดลองจะ

ทำการศึกษาผลของจำนวนรอบของการผสม ที่มีต่อการลักษณะพื้นผิวของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง แกรไฟต์ผงและพอลิเมอร์ ภายหลังจากอัดขึ้นรูป เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการผสม นอกจากนี้ยังได้ ทำการศึกษาผลของน้ำมันผสมที่มีต่อการขึ้นรูปวัสดุผสมด้วย โดยขึ้นงานที่ได้จะนำไปทดสอบ คุณสมบัติทางกล, ทางไฟฟ้า, ทางความร้อน และความหนาแน่น จากการศึกษาพบว่า จำนวนรอบที่เหมาะสมสำหรับการผสมวัสดุคอมโพสิตแกรไฟต์ผงและพอลิเมอร์คือ 2 รอบการผสม และเมื่อ เปรียบเทียบการขึ้นรูปที่มีการเติมน้ำมันผสมและไม่มีการเติมน้ำมันผสม พบว่าเมื่อเติมน้ำมันผสมจะ ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตสูงขึ้น โดยวัสดุคอมโพสิตแกรไฟต์ผงและพอลิเอทิลีนเทรฟธอลเลต จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ 50.18 MPa และค่ามอดูลัสความต้านทานการโค้งงอสูงที่สุด คือ 6,942.11 MPa ที่ปริมาณแกรไฟต์เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ แกรไฟต์ผงเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมจะลดลงแต่ค่าการนำความร้อนค่าการนำไฟฟ้า และความ หนาแน่นจะเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ที่ให้ค่าการนำความร้อน ค่าการนำ ไฟฟ้าสูงสุด และเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาต่อไป คือ แกรไฟต์ผงและพอลิเอทิลีนเทรฟธอลเลต โดย ให้ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.1884 W/m.K, ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.663 S/cm และมีความ หนาแน่นเท่ากับ 1.974 g/cm³ ที่ปริมาณแกรไฟต์ผงเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

มรกต ขาญสำรวจ (2552) การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ต้นแบบชนิด PEMFC ขนาด 11 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นขนาดใช้งานได้จริง สำหรับการนำไปใช้ ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแบบต่างๆ ตามที่คณะกรรมการการวิทยาศาสตร์ ของวุฒิสภาต้องการ และเพื่อ นำไปสร้างรถที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC ขนาดใช้งานได้ทั่วไป ได้แก่ รถยนต์ นั่งส่วนบุคคล รถปิคอัพ หรือรถ mini bus ขนาด 20 ที่นั่ง ที่คณะอนุกรรมการจะได้จัดการให้คณะ ผู้ประกอบการดำเนินการต่อไป

ในการดำเนินการวิจัยได้ดำเนินการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด active area ของ MEA 330 ตารางเซนติเมตร โดยสร้างส่วนประกอบ ได้แก่ membrane electrode assembly (MEA) ซึ่ง ประกอบด้วย gas diffusion layer ผลิตจากกระดาษคาร์บอน เคลือบ PTFE แล้วทา catalyst ซึ่ง ผลิตจาก platinum ตกสะสมด้วยวิธีทางเคมีลงบนอนุภาค carbon black มี proton exchange membrane ผลิตจากวัสดุ โคพอลิเมอร์ของ perfluorosulfonic acid/PTFE, ประเก็น gasket สร้าง จากวัสดุ PTFE, bipolar plate สร้างจากวัสดุแกรไฟต์ ด้านหนึ่งกัตรงตรงสำหรับอากาศไหลผ่าน (non-pressurized) อีกด้านหนึ่งกัเป็นร่องรูปเขาวงกต (serpentine) สำหรับไฮโดรเจนไหลผ่าน, end plate ปิดด้านหัวและท้ายสร้างจากวัสดุ engineering plastic เซลล์เชื้อเพลิงประกอบเข้า

ด้วยกันโดยใช้โต๊ะประกอบและใช้สลักเกลียวยึด เซลล์เชื้อเพลิงนี้หนึ่ง stack ประกอบด้วย 106 เซลล์ หลังจากนั้นทำการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงด้วยโต๊ะทดสอบ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิ ที่เซลล์ทำงานได้ดี ต่อไป ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อไม่มีโหลด ได้ค่า 92.2 โวลต์ และกำลัง 12.11 กิโลวัตต์ เมื่อต่อโหลดซึ่งคือ มอเตอร์ขนาด 11.4 แรงม้า (8.5 กิโลวัตต์) ความเร็วรอบ 2,800 รอบ/นาที ซึ่งต่อกับเพลลาที่อัตราทด 1:12.315 วัดแรงดันไฟฟ้าของ เซลล์เชื้อเพลิงได้ 26 โวลต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 66.3 โวลต์ในเวลา 10 นาที และกระแส 55.9 แอมแปร์ มอเตอร์วิ่งเต็มที่ ต่อมา เมื่อต่อเซลล์กับโหลดโดยมีบัฟเฟอร์ เริ่มแรก วัดแรงดันได้ 63.6 โวลต์ เมื่อต่อ โหลด แรงดันลดลงมาที่ 49.9 โวลต์ชั่วขณะ และกลับมาคงที่ที่ 55.6 โวลต์ ตลอดไป

เมื่อนำเซลล์เชื้อเพลิง 1 ชุด มาทดสอบการทำงานการขับเคลื่อนรถพ่วงขนาด 20 ที่นั่งบน ถนน พบว่า สามารถทำงานขับเคลื่อนได้ดี

วินิตย์ บุญเทียร (2547) สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ขึ้นกับหลายปัจจัยองค์ประกอบภายในขั้วไฟฟ้าก็เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งประกอบด้วยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และโครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัมฉาบบนตัวเร่งปฏิกิริยา และคาร์บอนยังช่วยในการนำไฟฟ้าและทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างส่วนที่นำอิเล็กตรอน(แพลทินัมบนคาร์บอน) และส่วนที่นำโปรตอน(อิเล็กโทรไลต์) บนขั้วไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวรองรับคาร์บอนแต่ละชนิด คือ แกรไฟต์, คาร์บอนใจแกนติก, คาร์บอนทีพีโอ และ Vulcan XC-72 ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส ไนโตรเจนพบว่ามีความแตกต่างกันในด้านพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนโดยมีพื้นที่ผิวเรียงตามลำดับ ดังนี้ คาร์บอนใจแกนติก > Vulcan XC-72 > คาร์บอนทีพีโอ > แกรไฟต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมด้วยวิธี impregnation ที่ปริมาณแพลทินัมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก, ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคเฉลี่ยของแพลทินัมอยู่ในช่วง 2.75 – 3.23 นาโนเมตร ขณะที่ขั้วไฟฟ้าถูกเตรียมด้วยวิธี เฝ้นติง และวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและสภาพต้านไฟฟ้า พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของตัวรองรับและความหนาของขั้วไฟฟ้าสมรรถนะการทำงาน ของขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจะทดสอบด้วยการทำ cyclic voltammetry และโพลาริเซชัน และพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากแพลทินัมร้อยละ 20 โดยน้ำหนักบนตัวรองรับ Vulcan XC-72 ที่ผ่านการเผาที่ 300 องศาเซลเซียสให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงกว่าตัวอื่นๆ

สุชาติ พงษ์ชัย (2555) ผลงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ โดยวิธีการถ่ายโอนรูปลูกขั้วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์อิงก์เจ็ตของหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาและการถ่ายโอนรูปลูกของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบ พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากการถ่ายโอนรูปลูกขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้สมรรถนะที่ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตของหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร์แก๊สโดยมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ เท่ากับ 421.4 และ 385.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ จากการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีแอโนด 2 ชั้น โดยมีแพลทินัมรูทีเนียม/คาร์บอนเป็นชั้นนอก และแพลทินัม/คาร์บอนอยู่ชั้นใน สามารถฟื้นฟูสมรรถนะภายหลังการสัมผัสคาร์บอนมอนอกไซด์ใกล้เคียงกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีแอโนดเป็นแพลทินัมรูทีเนียม/คาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่ความเข้มข้นสูงถึง 60 พีพีเอ็ม โดยมีความหนาแน่นกระแสสัมพัทธ์ที่ 0.6 โวลต์ที่ฟื้นฟูได้เท่ากับ 85.63% และ 86.49% ตามลำดับ

Sang-Sun Parka et.al. (2014) บทความวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับคาร์บอนรูปแบบใหม่ที่แนะนำให้ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็ลล์ (PEMFC) ที่นำ คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (CNF) ที่ปลูกบนแอคติเวตเตดคาร์บอนไฟเบอร์ (ACF) หรือ CNF/ACF โดย CNF จะถูกสังเคราะห์จากแก๊สมีเทน (CH_4) และนิกเกิล (Ni) ปลูกบน ACF ทั้งนี้ได้นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) และสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ภาพที่ได้จะออกมาเป็นภาพ 3 มิติของคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (CNF) ที่ปลูกบนแอคติเวตเตดคาร์บอนไฟเบอร์ (ACF) การให้อุณหภูมิที่สูงแก่ CNF/ACF ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าและความทนทานของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ในการทำงานของ PEMFC และทดสอบการกัดกร่อน (ADT) ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสถียรของ Pt รวมทั้งการสูญเสียของ ECSA ที่เกิดจากการรักษาความร้อนในระดับ 900 °C ของ Pt/CNF/ACF ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 39.1% แต่การสูญเสียของ ECSA จะสูงถึง 56.3% หากความร้อนของวัสดุเหล่านั้นรักษาความร้อนไม่ได้ ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นมากจากคาร์บอนที่มีการกัดกร่อนแบบคาร์ไฟต์เพิ่มเมื่อรักษาอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ CNF/ACF ทั้งนี้โครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์ของ CNF ที่เพิ่มขึ้นใน ACF นั้นยังจะช่วยให้รักษาเสถียรภาพของอนุภาค Pt ได้อีกด้วย และเป็นอย่างที่คาดไว้ว่าผลที่ได้จากการรักษาความร้อนของ CNF/ACF นั้นมาจากคาร์บอนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ PEMFC

San Jose Lab et.al. (2015) งานสัมมนานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำชีวไฟฟ้า โดยใช้ การจัดเรียงแบบแนวตั้งตรงเป็นชั้นๆของเส้นใยนาโนที่ประกอบไปด้วยปรอทซัลไฟด์ (PB) คือ สารเคลือบ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT) กับอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่ตำแหน่งแกน-เปลือกจะ อยู่ในรูปแบบ PB/CdS/CNT.

Pt/CdS/CNT. ที่ถูกสร้างขึ้นนี้เห็นได้ชัดเกี่ยวกับ พลังงานโฟตอน, พลังงานไอออนิก, และ พลังงานเคมี ตามลำดับ จากรังสีที่มองเห็นได้มีการปล่อย K^+ และมีการลดลงของไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์(H_2O_2)ในสารละลายไดโพรแทสเซียมซัลเฟต(K_2SO_4) 0.2 โมล และการลดลงทางสมบัติ เคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(H_2O_2) 1.5 mM ที่ PB/CdS/CNT.

PB/CdS/CNT มีความหนาแน่นของกระแสสูงถึง 1.91 mA/cm^2 ประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมนี้ จะเชื่อมโยงกับหลากหลายวัสดุ และส่วนที่ประกอบเป็นโครงสร้างนาโน เป็นชั้นๆนั้นจะมีอยู่ 3 ส่วน ซึ่งประกอบอยู่ใกล้ชิดกัน มีผลในการลดลงทางสมบัติเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์(H_2O_2) โดยสารปรอทซัลไฟด์ (PB) ซึ่งผ่านกลไกปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า-เคมี-เคมีไฟฟ้า การจัด โครงสร้างแบบ PB/CdS/CNT. เป็นทางที่ง่ายที่สุดสำหรับการแพร่กระจายมวลและรับ-ส่ง อิเล็กตรอน และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการลดลงทางเคมีไฟฟ้า เพื่อลดความเข้มข้น และความเป็นแม่เหล็กทางเคมีไฟฟ้า และจึงมั่นใจว่าจลนศาสตร์มีผลต่อความเร็วของชีวไฟฟ้าที่ เกิดปฏิกิริยา

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการศึกษา ผลของข้อไฟฟ้า ชนิด Cds/CNT/C ต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดพีอีเอ็ม ประกอบด้วย เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือพื้นฐาน สารเคมี พร้อมทั้งเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ และวิธีดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการดำเนินการ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย สามารถจำแนกออกเป็นส่วนๆของเครื่องมือพื้นฐาน เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ทางด้านเคมี ดังต่อไปนี้

3.1.1 เครื่องมือพื้นฐาน

1. ตะแกรงร่อน เบอร์ 270 (ขนาดอนุภาค $<75 \mu m$)
2. โถดูดความชื้น
3. บีกเกอร์ ขนาด 80 ml, 200 ml และ 400 ml
4. ปีเปต ขนาด 1 ml
5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตรอน
6. ขวดใส่สารเคมี
7. ถังมือและผ้าปิดจมูก
8. กระจกทึบ

3.1.2 เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์

1. เครื่องฉีดพ่น OP08 SERIES MINI AIR COMPRESSOR
2. ตู้อบไฟฟ้า MEMMERT รุ่น UF110
2. เต้าเผา รุ่น Gsl
3. เครื่องซั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. เครื่องกวนสาร
5. เต้าแผ่นให้ความร้อน (Hot plate stirrer) Vistion รุ่น 130sH
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องอัลตราโซนิก

8. กล้องดิจิตอล (Nikon D3300)
9. Scanning Electron Microscope (SEM)
10. Transmission Electron Microscope (TEM)
11. X-ray Diffractometer (XRD)
12. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
13. Versa lab เครื่องวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)
14. Fuel cell test station (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)

3.1.3 สารเคมี

1. แกรไฟต์ (C)	ประเทศไทย
2. ท่อนาโนคาร์บอนแบบมัลติวอลล์ (MWNTs)	ประเทศไทย
3. โทลูอิน ($C_6H_6CH_3$)	ประเทศไทย
4. 1,10-พีแนนซ์ทอรีน ($C_{12}H_8N_2$)	ประเทศอินเดีย
5. แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$)	ประเทศอินเดีย
6. โซเดียมไซไฟ (Na_2N)	ประเทศอินเดีย
7. เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์	ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เนฟิออน	ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นที่ 1 การศึกษาข้อมูล

1. ศึกษาคุณลักษณะของ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวรองรับ
2. ศึกษาคุณลักษณะของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์

ขั้นที่ 2 การเตรียมตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำแกรไฟต์ที่จะนำมาใช้เป็นตัวรองรับ มาผ่านการคัดขนาด ด้วยตะแกรงร่อน เบอร์ 270 (ขนาดอนุภาค <75 ไมโครเมตร) ได้ปริมาณตามต้องการ



รูปที่ 3.1 นำแกรไฟต์ที่จะนำมาใช้เป็นตัวรองรับ มาผ่านการ
คัดขนาด ด้วยตะแกรงร่อน เบอร์ 270 (ขนาดอนุภาค <math><75</math>

ไมโครเมตร)

2. เก็บแกรไฟต์ที่เตรียมได้ไว้ในโถดูดความชื้น

ขั้นที่ 3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

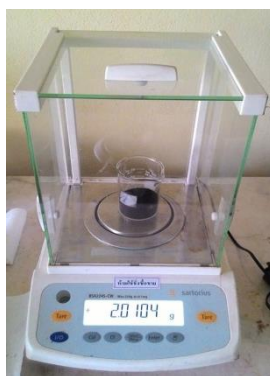
1. ชั่งน้ำหนักตัวรองรับแกรไฟต์จากขั้นตอนที่ 2 หนักประมาณ 1 กรัม

ใส่ลงในบีกเกอร์



รูปที่ 3.2 ชั่งน้ำหนักตัวรองรับแกรไฟต์จากขั้นตอนที่ 2 หนักประมาณ 1 กรัม

2. ชั่งน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอน หนักประมาณ 1 กรัม ใส่ลงไปใน
ปิกเกอร์กับแกรไฟต์



รูปที่ 3.3 ชั่งน้ำหนักของท่อนาโนคาร์บอน หนักประมาณ 1 กรัม
ใส่ลงไปในปิกเกอร์กับแกรไฟต์

3. ทำให้สารทั้งสองตัวนี้เป็นสารละลายโดยการเติมสารโทลูอีนลงไป
60 ml



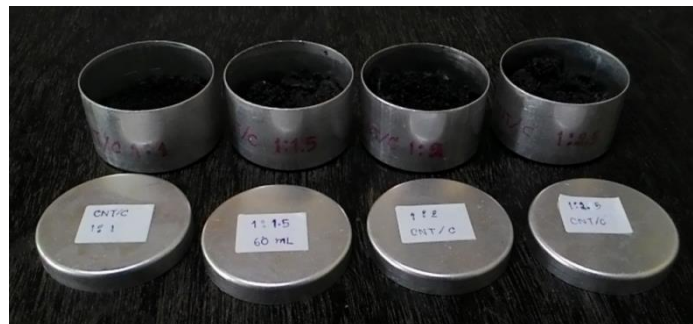
รูปที่ 3.4 ทำให้สารทั้งสองตัวนี้เป็นสารละลายโดยการเติมสารโทลูอีนลงไป 60 ml

4. นำสารที่ได้มาให้ความร้อนเพื่อให้โทลูอีนระเหยออก ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ดัง รูปที่ 3.5

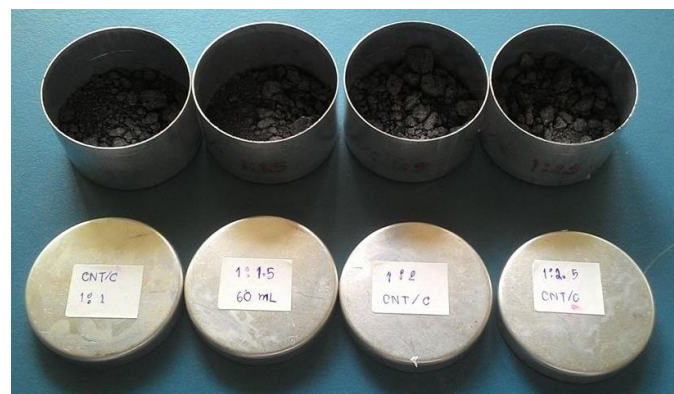


รูปที่ 3.5 ให้ความร้อนกับสารทั้งสองตัวก่อนนำไปเผา

5. จากนั้นนำสารไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ได้ตัวอย่างดัง รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 CNT/C ก่อนนำไปอบ

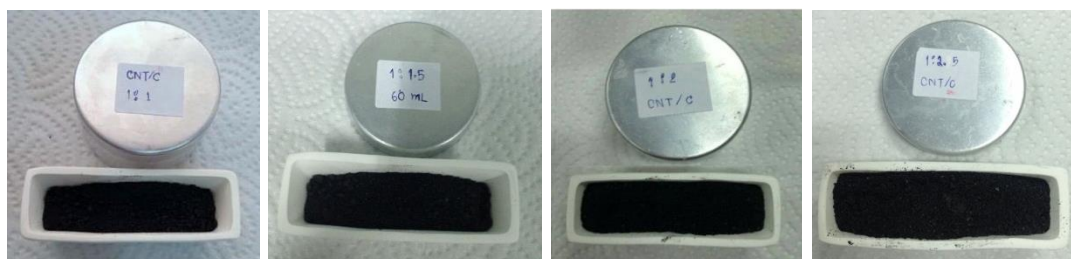


รูปที่ 3.7 CNT/C หลังนำไปอบ

6. จากนั้นนำไปเตาเผาแบบท่อภายใต้เงื่อนไขการป้อนแก๊สอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (sang-sun at all, 2014) เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดัง รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 CNT/C เตาเผาแบบท่อที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



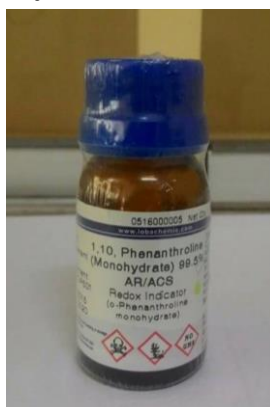
รูปที่ 3.9 CNT/C หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 แต่เปลี่ยนอัตราส่วน CNT/C จาก 1:1 เป็น 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 ตามลำดับ

ขั้นที่ 4 เตรียม CdS/CNT/C

การทำให้เกิดอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่บนท่อนาโนคาร์บอนที่ปลุกบนแกรไฟต์ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. ใส่ CNT/C ที่เตรียมได้จากขั้นที่ 3 ลงในสารละลาย 1,10-ฟีแนนซ์ทอรีน ($C_{12}H_8N_2$) มีความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมล 45 (San jose lab at all, 2015)เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีการดูดซับ 1,10-ฟีแนนซ์ทอรีน ให้อยู่บนพื้นผิว CNT/C จะอยู่ในรูปแบบ Phen/CNT/C



รูปที่ 3.10 สารละลาย 1,10-ฟีแนนซ์ทอรีน ($C_{12}H_8N_2$)

2. นำสารจากข้อที่ 1 ลงในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) ที่มีความเข้มข้น 15.0 มิลลิโมล (San jose lab at all, 2015) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.11 สารละลายแคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$)

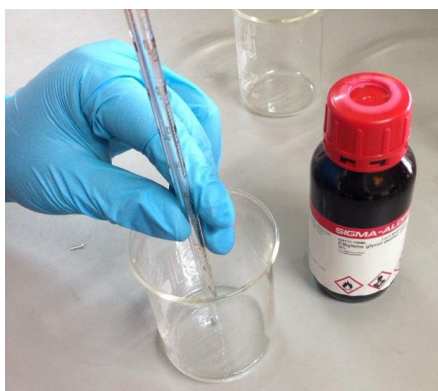
3. ใช้สารละลาย โซเดียมซัลไฟ (Na_2S) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดโครงสร้าง $CdS/CNT/C$

4. นำสารที่ได้จากข้อที่ 3 ไปอบที่ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C ตามต้องการ

ขั้นที่ 5 การเตรียมตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C

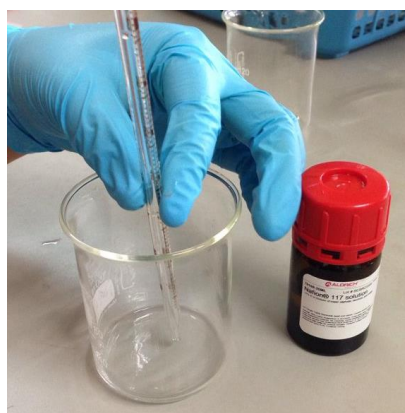
1. Cds/CNT/C ปริมาณ 24.5 มิลลิกรัม (catalyst loading ที่ 0.5 mg/cm² เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงพาณิชย์ Pt/C catalyst loading ที่ 0.5 mg/cm²) ลงในบีกเกอร์

2. หยดสารละลายเอทิลีนไกลคอลไดเมธิลอีเทอร์ ปริมาตร 4.260 มิลลิลิตร บนตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วปิดบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟรอยให้สนิท แล้วนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

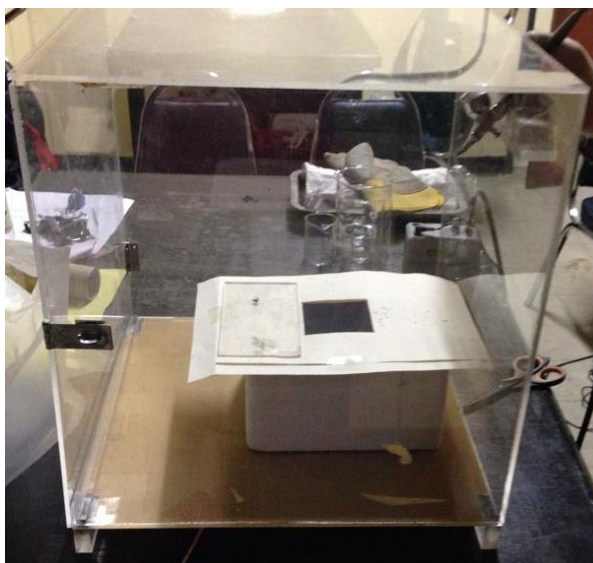


รูปที่ 3.12 สารละลายเอทิลีนไกลคอลไดเมธิลอีเทอร์ ปริมาตร 4.260 มิลลิลิตร

3. หยดสารละลาย เนฟิออนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 0.149 มิลลิลิตร (วินิตย์ บุญเทียร, 2547) ลงบนตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 2 แล้วปิดบีกเกอร์ให้สนิท และแช่ในอ่างอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.13 สารละลาย เนฟิออนปริมาณ 0.149 มิลลิลิตร
5. ฉีดพ่นลงบนผ้าคาร์บอนที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.14 พ่น CdS/CNT/C ลงบนผ้าคาร์บอนที่เตรียมไว้

6. นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปอบที่ 80 องศาเซลเซียส

ตอนที่ 2 ศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ขั้นที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ CNT/C

- คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ CNT/C มีการตรวจสอบ XRD สังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ CNT/C



รูปที่ 3.14 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- ตรวจสอบการเกาะ CNT ที่เพิ่มขึ้นในพื้นที่ผิว C โดยตรวจจากเครื่อง FT-IR



รูปที่ 3.15 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

ขั้นที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ CdS/CNT/C

1. ศึกษาโครงสร้างของ CdS/CNT/C โดยตรวจจาก SEM และ TEM



รูปที่ 3.16 เครื่อง Transmission Electron Microscope(TEM)



รูปที่ 3.17 เครื่อง Transmission Electron Microscope(TEM)

- เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)
2. คุณสมบัติทางกายภาพของ CdS จะมีการตรวจด้วยเครื่อง เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)
 3. ทดสอบสภาพต้านทานทางไฟฟ้า CdS/CNT/C ด้วยเทคนิค Van der Pauw



รูปที่ 3.18 เทคนิค Van der Pauw ที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น

4. ตรวจสอบการเกาะ CNT ที่เพิ่มขึ้นในพื้นที่ผิว C โดยตรวจจากเครื่อง FT-IR

ขั้นที่ 3 การเตรียม MEA และการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิด

PEM

1. MEA ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้น CdS/CNT/C ประกบเข้ากับเมมเบรน EC-CCM-50-2 โดยใช้วิธีการอัดด้วยความร้อน 120 องศา นาน 90 วินาที



รูปที่ 3.19 เครื่องอัดร้อน DHP 050



รูปที่ 3.20 MEA ที่อัดเสร็จ

ขั้นที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

- นำ MEA ที่เราอัดแล้วจากขั้นที่ 3 มาประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว



รูปที่ 3.21 MEA มาประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว

- นำเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบเสร็จจากข้อที่ 1 ไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยเครื่อง Fuel cell test station จะได้กราฟ I-V และกราฟ I-V-P
- เงื่อนไขในการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงภายใต้ความดัน 1 atm ความชื้น 100% อุณหภูมิ 50 องศา อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด 150 sccm และ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแคโทด 150 sccm (ออกซิเจนจากอากาศ)



รูปที่ 3.22 ทดสอบประสิทธิภาพด้วยเครื่อง Fuel cell test station

- นำกราฟ I-V จากข้อที่ 3 มาเทียบกับกราฟ I-V ที่ได้จาก Pt/C ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

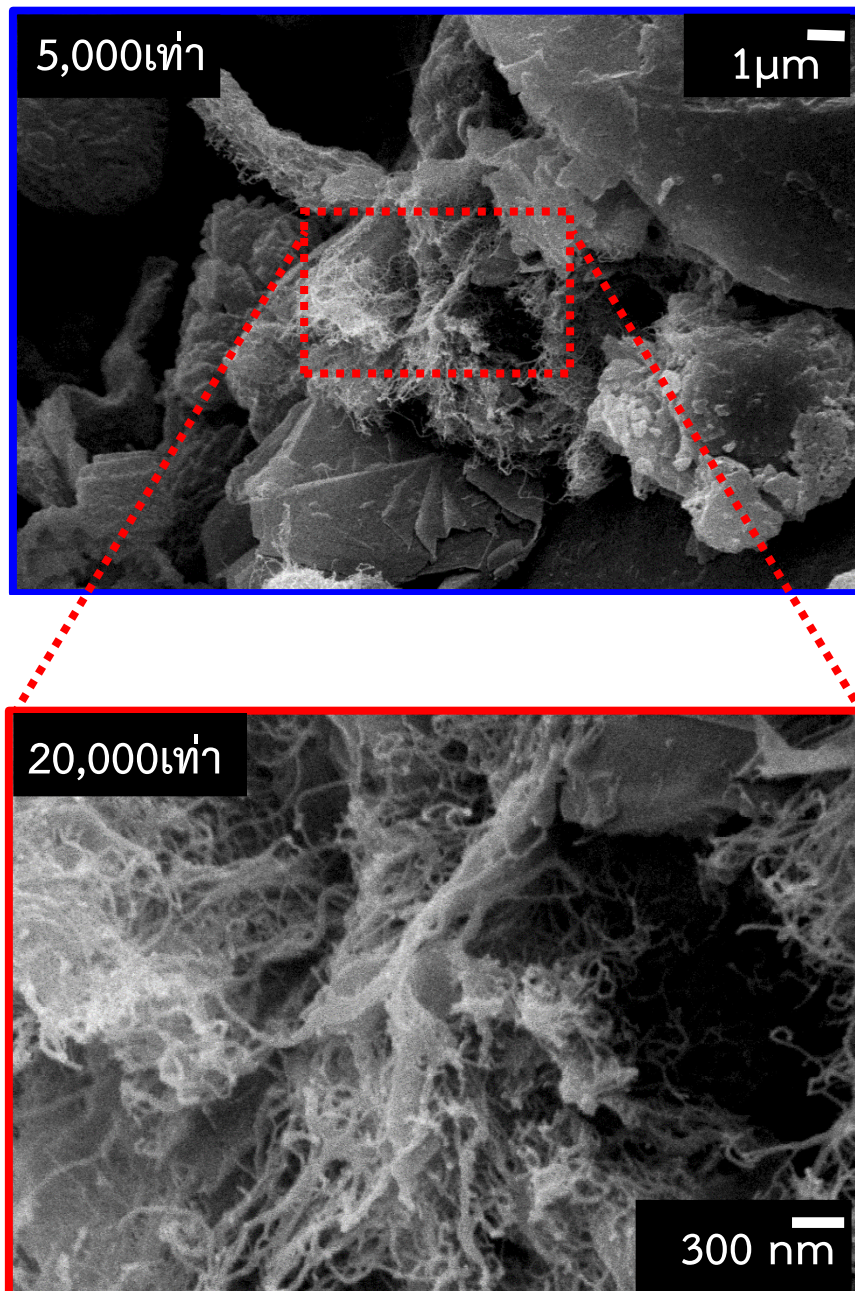
ผลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ซึ่งเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยศึกษาผลของตัวรองรับ ทางกายภาพด้วยเทคนิค SEM, TEM และ XRD ลักษณะทางเคมีและไฟฟ้าด้วยเทคนิค FT-IR เทคนิคแวนเดอร์พอล และทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ด้วยเครื่อง fuel cell test station พบว่า

4.1 ผลของการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

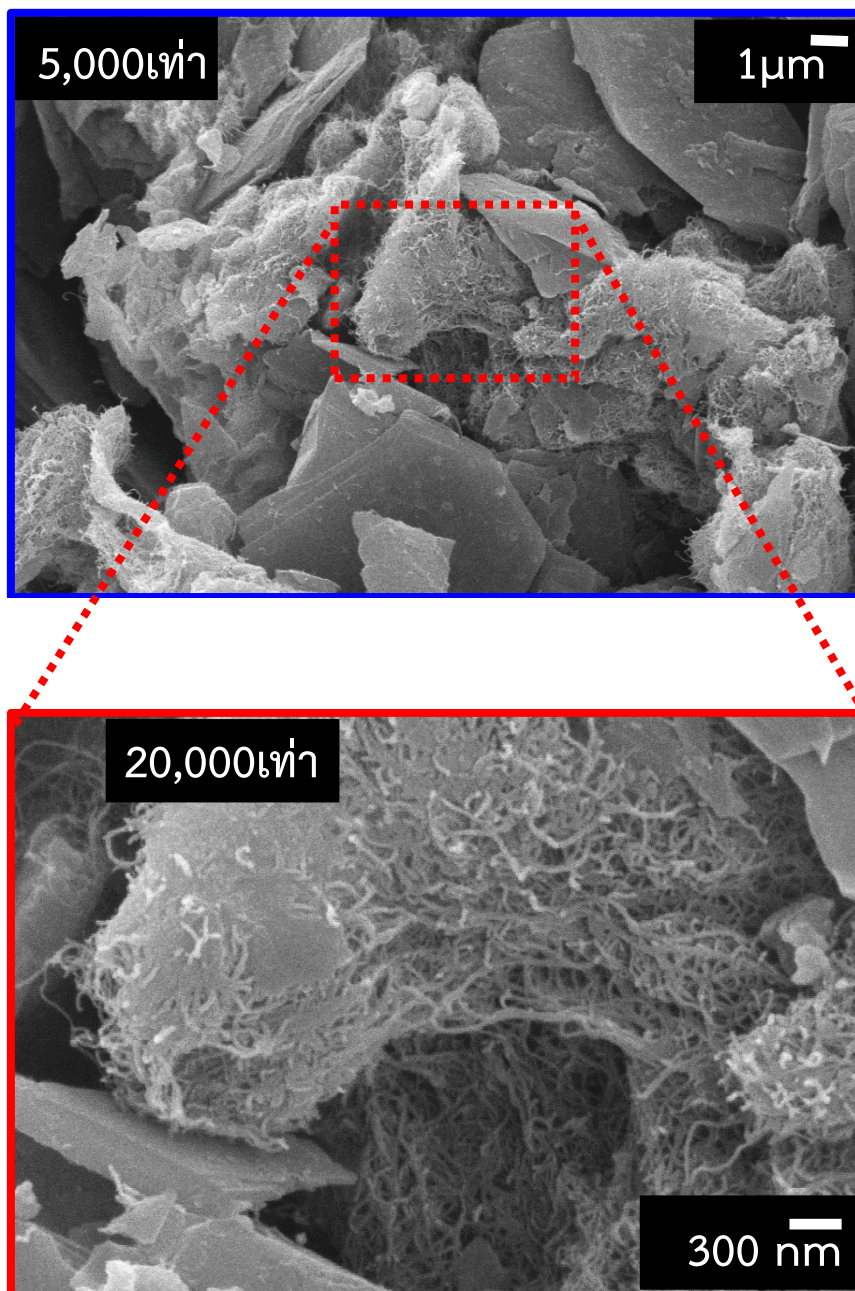
4.1.1 ผลของการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM

การทดลองได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการทดลองจากภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.1 – 4.4 พบว่าในทุกๆเงื่อนไขของการเตรียมขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C ท่อนาโนคาร์บอน (CNT) แทรกตัวอยู่ระหว่างคาร์บอน แต่การกระจายตัวของ CNT มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร โดยมีลักษณะรวมกันอยู่เป็นก้อนแทรกอยู่ระหว่างแผ่นแกรไฟต์ จากภาพถ่าย SEM ไม่ปรากฏว่าพบ CdS อยู่ที่บริเวณผิวของ CNT/C ทั้งนี้เนื่องจาก ขนาดอนุภาคของ CdS มีขนาดเล็ก ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า จึงไม่สามารถที่จะสังเกตเห็น CdS ได้ จึงทำการวิเคราะห์หา CdS ต่อด้วยเทคนิค TEM, XRD และ FT-IR

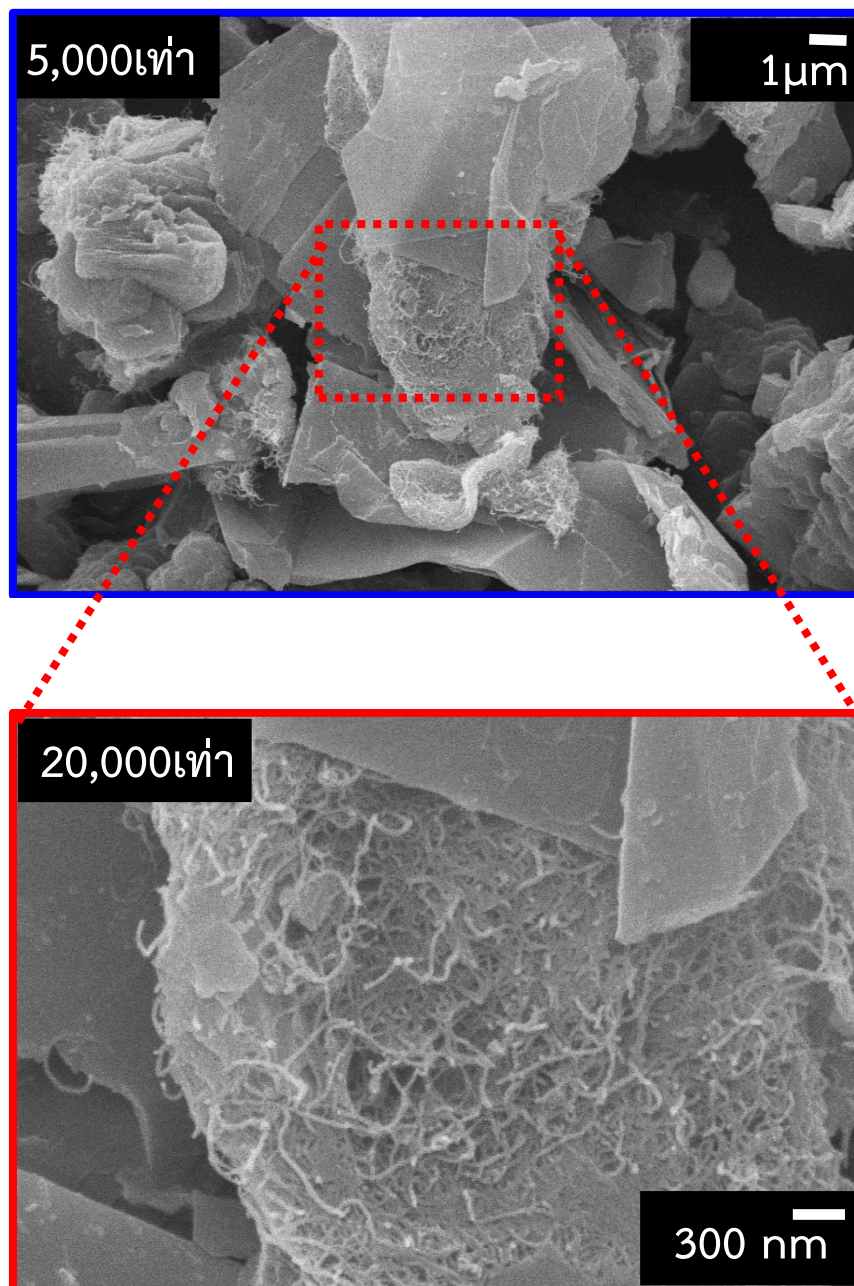
เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวในภาพถ่ายที่ได้จาก SEM รูปที่ 4.1 – 4.4 สังเกตเห็น CNT จุดเล็กๆ กระจายตัวกันอยู่บนแกรไฟต์ เมื่อทำการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยโปรแกรม nano VB พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวโลหะของ CNT เท่ากับ 31.54863 ± 8.7975 (San jose lab at all, 2015) นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว CNT เท่ากับ 9.05631×10^{-05} ตารางเมตร/กิโลกรัม ดัง ตารางที่ 4.1



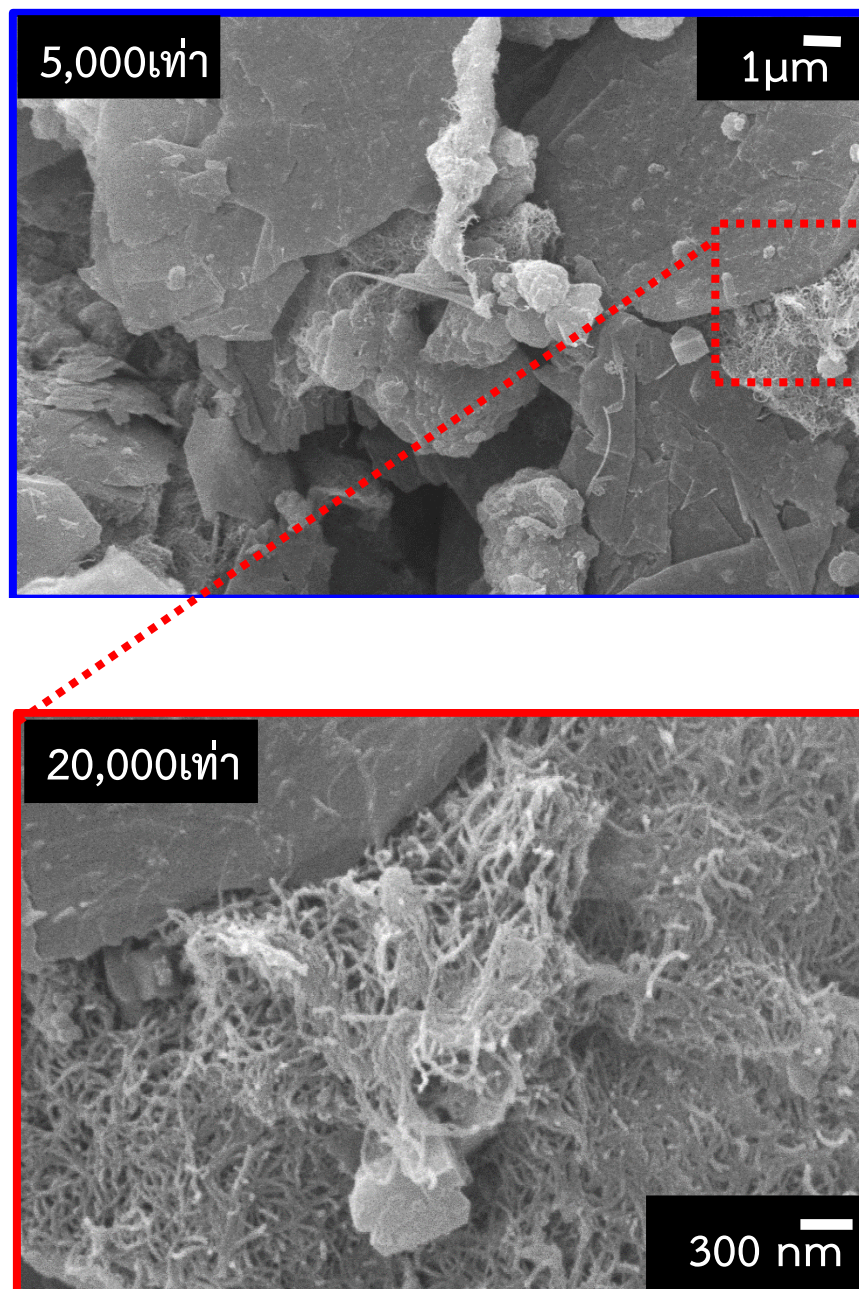
รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด Cds/CNT/C (CNT:C=1:1) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:1.5) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:2) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า



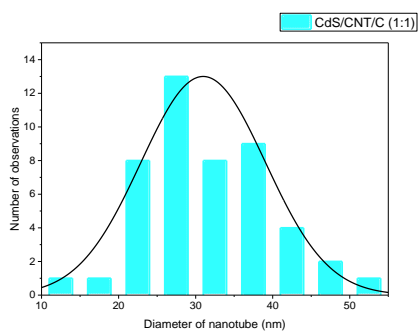
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C (CNT:C=1:2.5) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวของ CNT

Catalyst อัตราส่วน CdS/CNT/C	Mean CdS particle size (d, nm)	Metallic Surface area (nm ² /kg)
1:1	31.73850	9.06201×10 ⁻⁵
1:1.5	34.29551	8.95760×10 ⁻⁵
1:2	33.45756	9.02990×10 ⁻⁵
1:2.5	42.06426	9.17853×10 ⁻⁵
ค่าเฉลี่ย	31.54863	9.05631×10 ⁻⁵

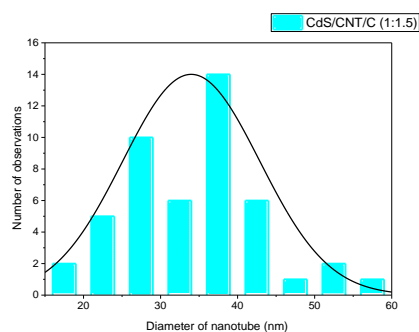
จาก รูปที่ 4.5 เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของ CNT ด้วยกราฟการเบี่ยงเบน พบว่าการกระจายตัวของ CNT ลดลงตามอัตราส่วนของ CNT/C 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 ดัง รูปที่ 4.5 โดยตัวเร่งปฏิกิริยา CNT/C มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร

(ก)

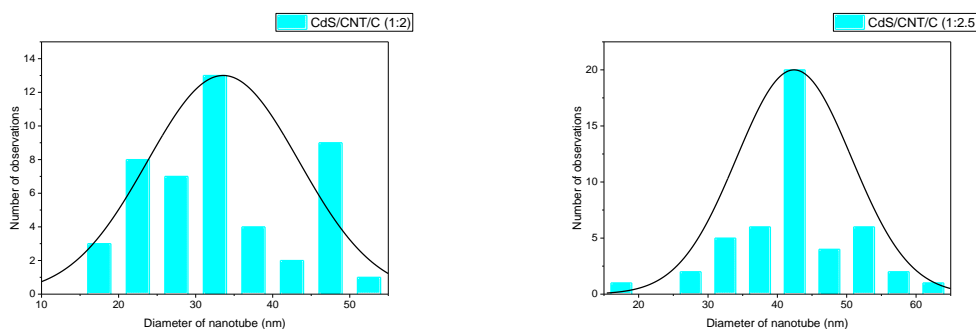


(ค)

(ข)



(ง)

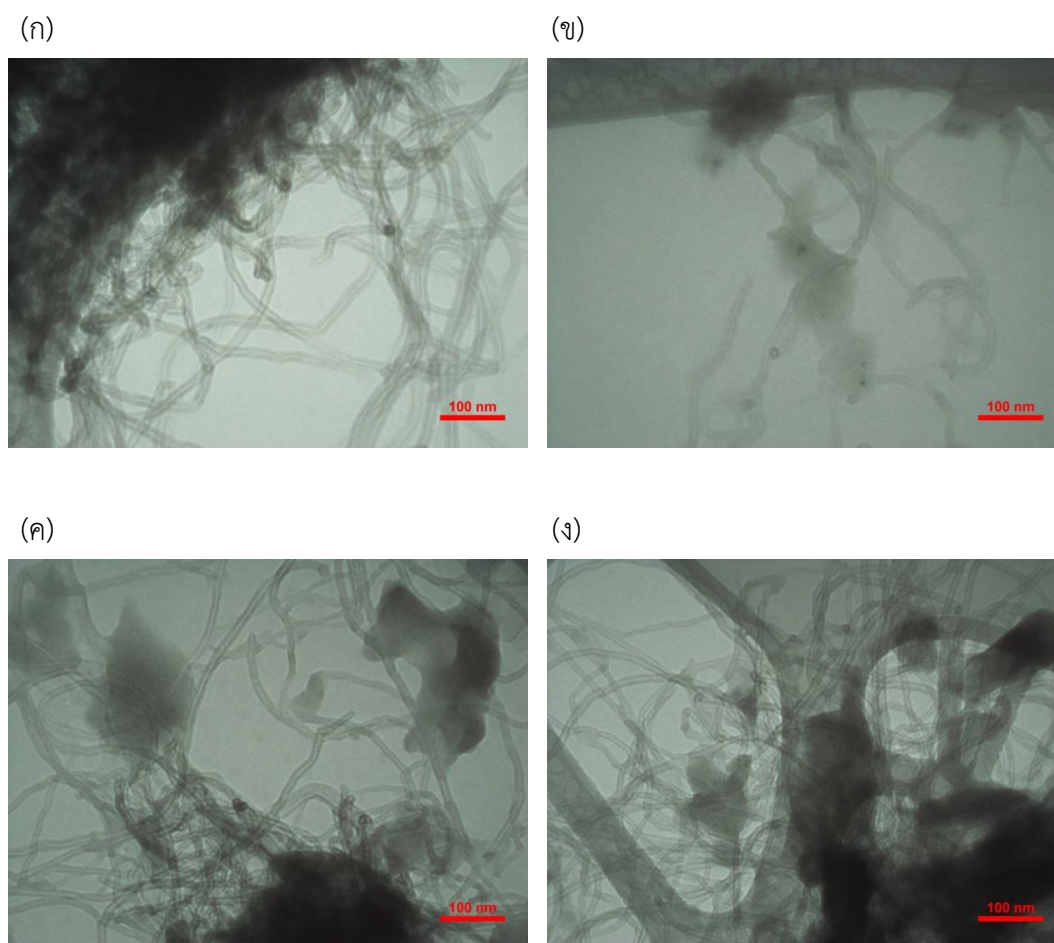


รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) CdS/CNT/C (1:1) (ข) CdS/CNT/C (1:1.5.) (ค) CdS/CNT/C (1:2) และ (ง) CdS/CNT/C (1:2.5)

4.1.2 ผลของการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง TEM

การทดลองได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) ผลการทดลองจากภาพถ่าย TEM **รูปที่ 4.6** พบว่าในทุกๆเงื่อนไขของการเตรียมขั้วไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) แทรกตัวอยู่ระหว่าง CNT เป็นจุดสีดำขนาดเล็ก มีกระจายตัวของ CdS ใน CNT ไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร มีลักษณะอยู่เป็นก้อนแทรกอยู่ใน CNT ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า โดยที่จุดสีดำที่ได้จากภาพถ่ายจาก TEM ที่ได้รับการทดลองยังไม่แน่ใจว่าเป็นผลึกของ CdS จึงทำการวิเคราะห์และตรวจสอบ CdS ด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR เพื่อยืนยันจุดสีดำบน CNT ที่ได้จากภาพถ่าย TEM เป็นผลึก CdS จริง

เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวในภาพถ่ายที่ได้จาก TEM **รูปที่ 4.6** สังเกตเห็น CdS เป็นจุดเล็กๆ กระจายตัวกันอยู่บน CNT เมื่อทำการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยโปรแกรม nano VB พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิว CdS เท่ากับ 4.3425 ± 1.45 (San jose lab at all, 2015) นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว Cds เท่ากับ 0.000286 ตารางเมตร/กิโลกรัม ดัง **ตารางที่ 4.2**

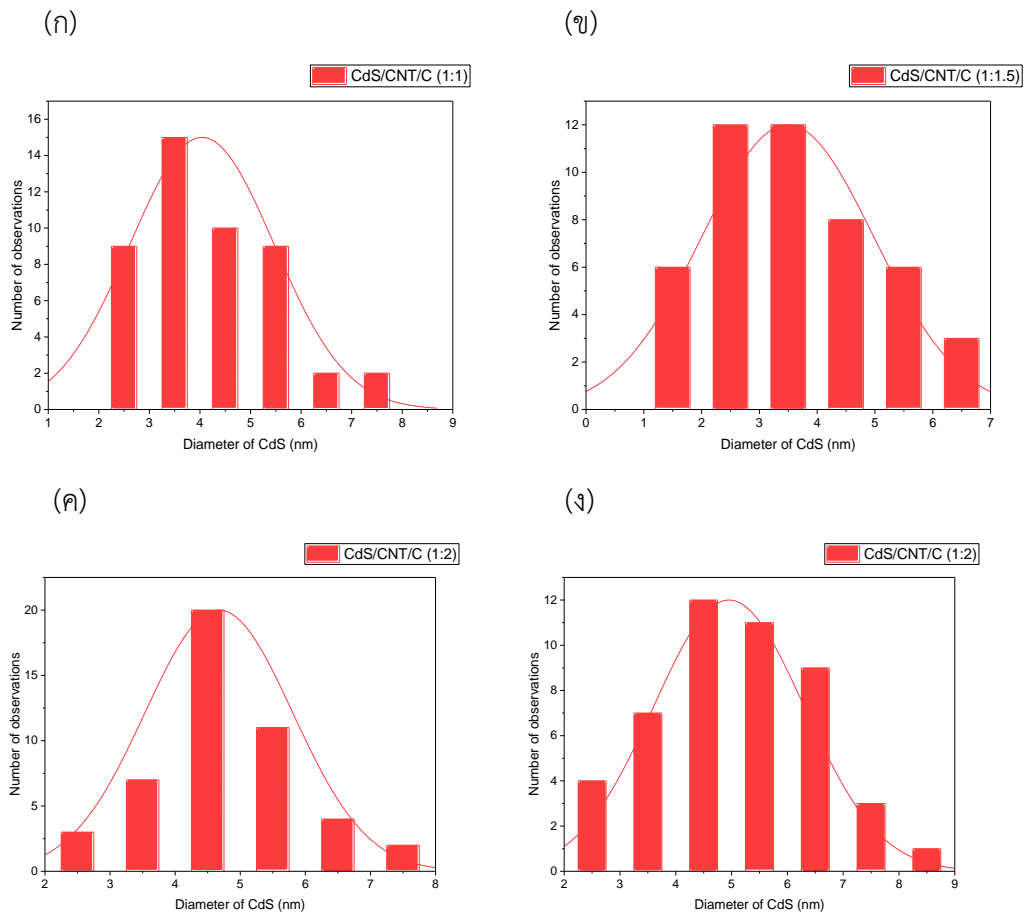


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ (ก) CdS/CNT/C (1:1)
(ข) CdS/CNT/C (1:1.5) (ค) CdS/CNT/C (1:2) และ (ง) CdS/CNT/C (1:2.5)

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวของ CdS

Catalyst อัตราส่วน CdS/CNT/C	Mean CdS particle size (d, nm)	Metallic Surface area (nm ² /kg)
1:1	4.1500	0.000300
1:1.5	3.5800	0.000347
1:2	4.6900	0.000265
1:2.5	4.9500	0.000251
ค่าเฉลี่ย	4.3425	0.000286

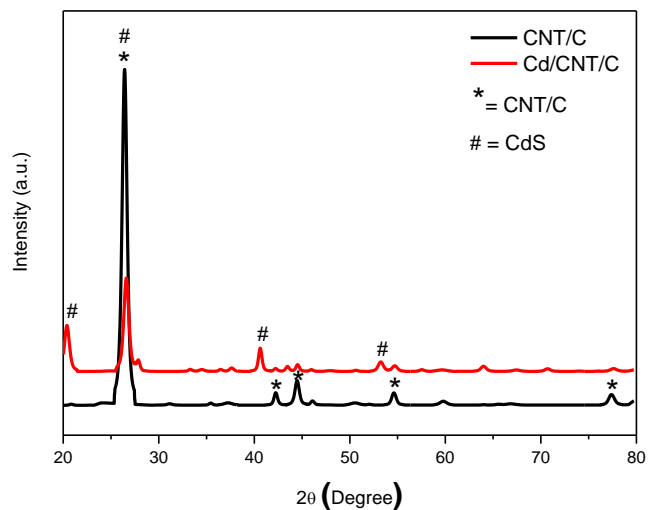
จาก **รูปที่ 4.7** เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของ CdS ด้วยกราฟการเบี่ยงเบน พบว่าการกระจายตัวของ CdS มีการกระจายตัวของ CdS/CNT/C 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 ดัง **รูปที่ 4.7** โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Cds มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2-7 นาโนเมตร



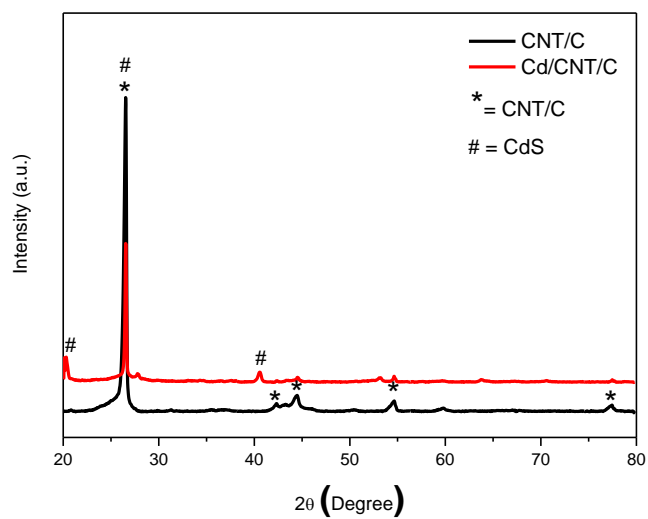
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) CdS/CNT/C (1:1) (ข) CdS/CNT/C (1:1.5) (ค) CdS/CNT/C (1:2) และ (ง) CdS/CNT/C (1:2.5)

4.1.3 ผลของการศึกษาลักษณะทางทางเคมีด้วยเครื่อง XRD

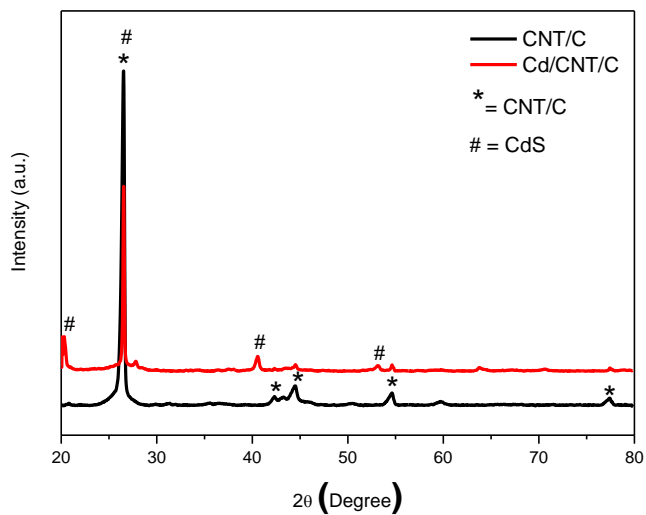
หลังจากที่มีการเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) บริเวณผิวของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) ผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD pattern) จะถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันว่ามีแคดเมียมซัลไฟด์เกาะอยู่ที่บริเวณผิวของท่อนาโนคาร์บอนจริง ดังแสดงใน รูปที่ 4.8 – 4.11 พบว่า ผลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิวไฟฟ้าชนิด CNT/C (กราฟเส้นสีดำด้านล่าง) แสดงให้เห็นว่า ที่ตำแหน่งมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2θ) เท่ากับ 26.4 42.2 44.5 54.5 และ 77.5 เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS No. 41-1487 สามารถระบุระนาบของผลึกของ CNT/C ได้เป็นระนาบ (002) (100) (101) (004) และ (110) ตามลำดับ (K. Gong, 2015; T. Peng et al, 2011; H. Sun et al, 2010) สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิวไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C แสดงดังในรูปที่ 1-4 (กราฟเส้นสีแดงด้านบน) แสดงให้เห็นว่า ที่ตำแหน่งมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2θ) เท่ากับ 20.1 26.4 และ 40.7 เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS No. 02-0454 และ 80-0019 สามารถระบุระนาบของผลึก CdS ได้เป็นแบบ face-centered cubic ที่มีระนาบ (220) (111) และ (440) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามี CdS อยู่ที่ผิวของ CNT/C จริง แต่สำหรับที่มุมการเลี้ยวเบนของซิวไฟฟ้าชนิด CdS/CNT/C เท่ากับ 26.4 อาจจะไม่สามารถแยกได้ชัดเจนว่าเป็นระนาบ (002) ของ CNT/C หรือ (111) ของ CdS เพราะทั้งสองระนาบสามารถเกิดที่มุมเดียวกัน ดังนั้นในที่นี้จึงไม่ได้คำนวณหาขนาดของผลึกอันเนื่องมาจากมุมเลี้ยวเบนเท่ากับ 26.4 กล่าวโดยสรุป ผลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยืนยันได้ว่ามี CdS อยู่ที่ผิวของ CNT/C และการคำนวณหาขนาดของผลึก CdS ตามสมการที่ 2.13 ที่ระนาบ (002) มุมการเลี้ยวเบนที่ 26.4° พบว่าขนาดของผลึก CNT มีขนาด 35.49 nm และระนาบ (111) มุมการเลี้ยวเบนที่ 26.4° พบว่าขนาดของผลึก CdS มีขนาด 3.98 nm (San jose lab at all, 2015) ซึ่งสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนของผลึก CdS บน CNT บนแกรไฟต์ ได้สำเร็จ



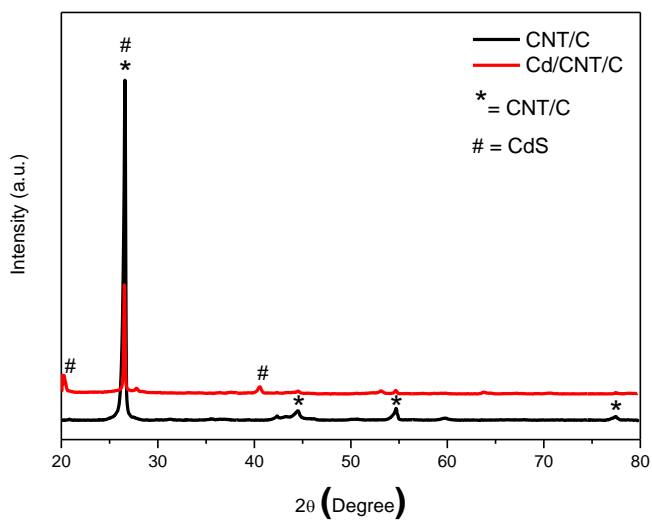
รูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:1)



รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:1.5)



รูปที่ 4.10 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:2)

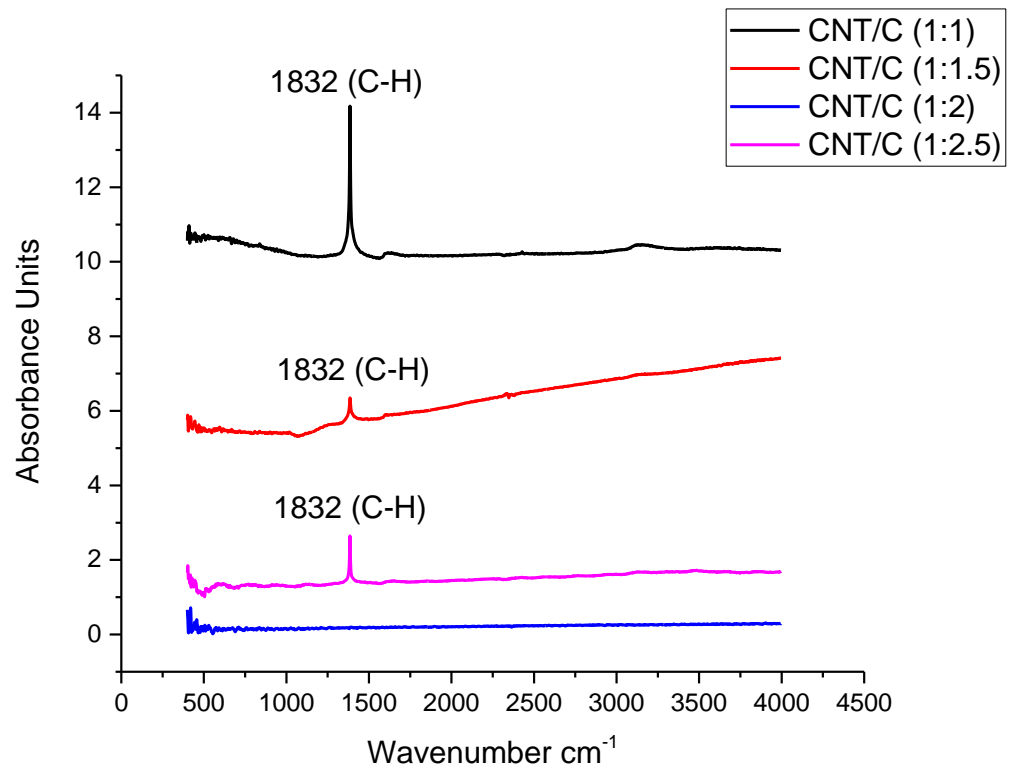


รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของขั้วไฟฟ้าชนิด CNT/C และ CdS/CNT/C (CNT:C=1:2.5)

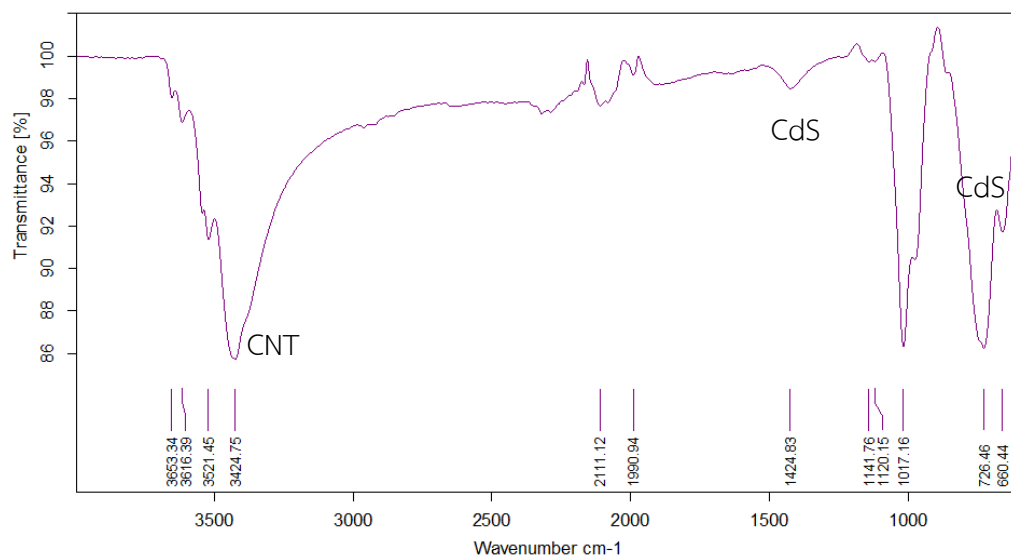
4.2 ผลของการศึกษาลักษณะทางเคมีและไฟฟ้า

4.2.1 ผลของการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR

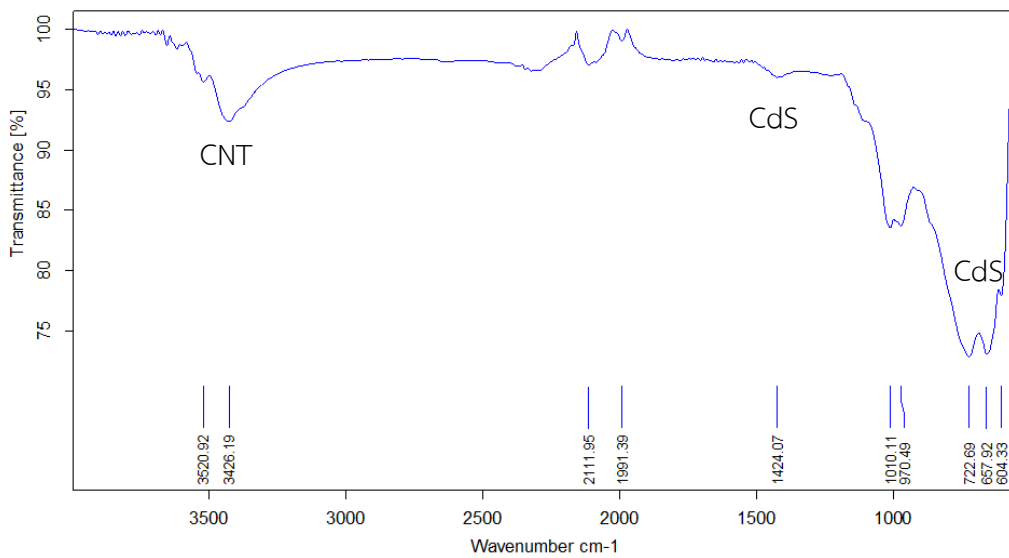
การทดลองได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ผลการทดลองจากภาพถ่าย FT-IR รูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.4 พบว่าผลของการดูดกลืนแสงในช่วงความถี่ต่างๆ พบว่าสาร CNT กับ แกรไฟต์ (C) จะมีการดูดกลืนแสงในตำแหน่งเลขคลื่น (Wavenumber) ที่ 1382 cm^{-1} ซึ่งจากงานวิจัย Kuanping Gong, Jurnal of Colloid and Interface Science. 449 (2015) 80_86 พบว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันกลุ่ม C – H in-plane bending ใน CNT. ซึ่งอยู่ในช่วง Middle infrared region สำหรับการใช้อินฟราเรดวัดการดูดกลืนออกมาแสดงว่าการเกิดพันธะระหว่าง C – H ซึ่งจะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของพันธะ C กับ H อยู่ประมาณ 0.027 eV และความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงนี้จะมีค่าลดลง เมื่อมีการเจือแกรไฟต์ (C) เข้ามาเพิ่มนั้นในอัตราส่วนของ CNT ต่อ C เป็น 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 ตามลำดับ จากกราฟ การดูดกลืนของ CNT/C ในอัตราส่วนต่างๆ กับช่วงเลขคลื่นที่เกิดขึ้นสามารถยืนยันได้ว่า พบการดูดกลืนในช่วงของพันธะ C – H โครงสร้างของ CNT แบบ Multiwall carbon nanotube ดังนั้น การเพิ่มแกรไฟต์ (C) มากขึ้นทำให้พันธะ C – H ของ CNT มีจำนวนลดลง สังเกตได้จากความสามารถในการดูดกลืนแสงของตำแหน่งที่ลดลงด้วยนั่นเอง



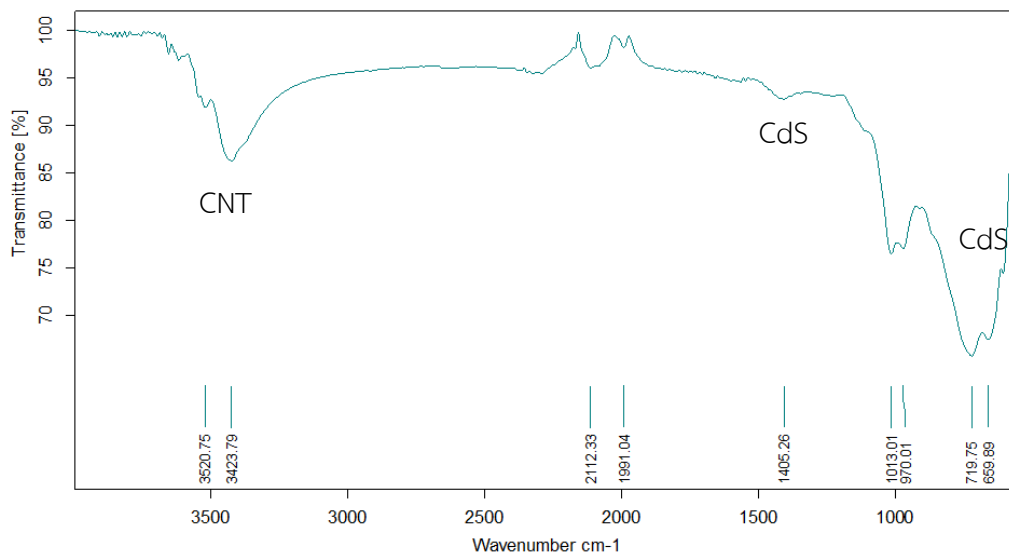
รูปที่ 4.12 แสดงการเกิดพันธะของ CNT/C (Ashok Ch., Venkateswara Rao K. and Shilpa Chakra Ch., 2014)



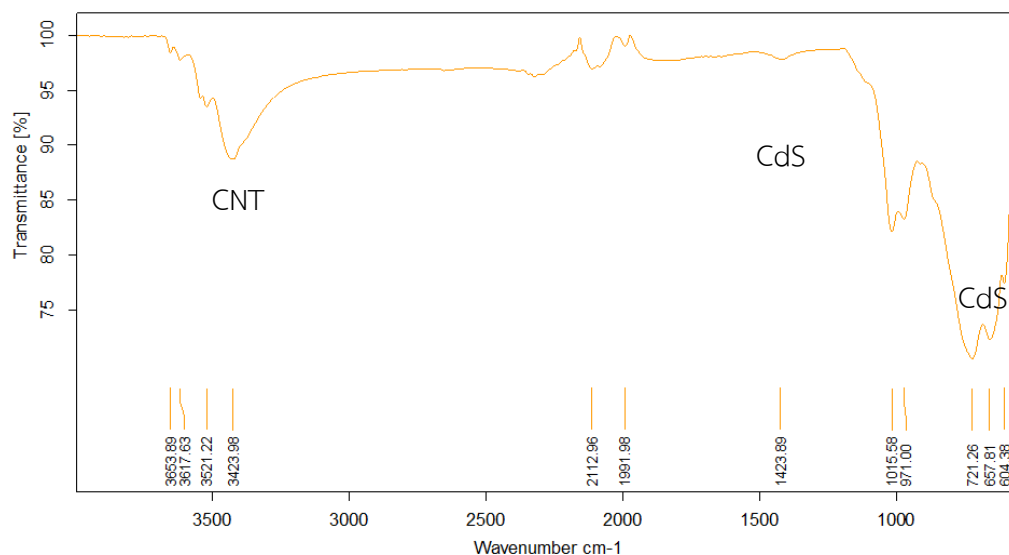
(n) CdS/CNT/C (1:1)



(o) CdS/CNT/C (1:1.5)



(p) CdS/CNT/C (1:2)



(ง) CdS/CNT/C (1:2.5)

รูปที่ 4.13 กราฟ FT-IR ที่พบ CNT และ CdS ของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ในอัตราส่วน 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5

จาก **รูปที่ 4.13** (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นว่าสาร CdS/CNT/C มีการดูดกลืนตามลักษณะดังกราฟที่แสดงลักษณะการส่องผ่านแสงในช่วงเลขคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ 500-4000 cm^{-1} พบว่าตำแหน่งที่แสง/รังสีไม่มีการส่องผ่าน 100% หรือน้อยกว่า 100% แสดงว่ามีการดูดกลืนของสารนั้นดังรูป พบว่า ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3567.66 cm^{-1} ของพันธะ O – H แสดงว่าเป็น CNT จากอัตราส่วนของ CNT/C คือ 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 จะเห็นได้จากรูปกราฟของ CNT จะเล็กลงเรื่อยๆ ตามอัตราส่วน CNT ที่ลดลง ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 620 cm^{-1} เป็นพันธะ Cd – S แสดงว่าเป็น CdS จากรูปจะเห็นได้จากกราฟที่อัตราส่วน 1:1.5 จะมีลักษณะลึกลงและกว้างมากกว่าทุกอัตราส่วนแสดงว่ามี CdS มากกว่าทุกอัตราส่วน

4.2.2 ผลของการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วยเทคนิค van der Pauw

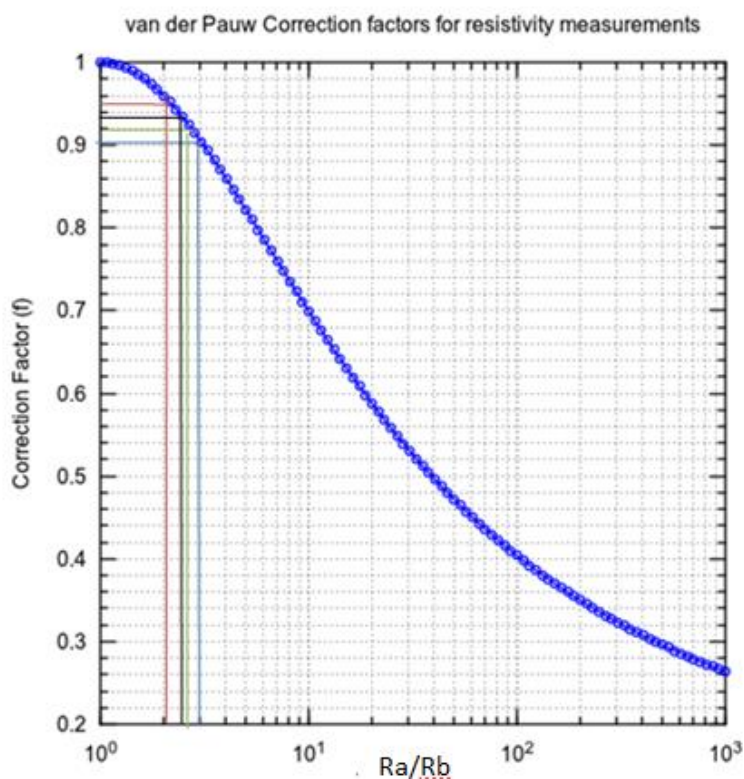
ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยความต้านทานที่เกิดจากชั้นแพร่ผ่านของแก๊ส (gas diffusion layer) โดยทั่วไปนิยมใช้ผ้าคาร์บอน ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และความต้านทานที่เกิดจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลต่อความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามากกว่าเนื่องจากเป็นส่วน

ที่ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และเมมเบรนที่นำโปรตอนแต่ไม่นำไฟฟ้า

ในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เตรียมได้ โดยนำขั้วไฟฟ้าที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการวัดสภาพต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิค van der Pauw ผลการทดลองแสดงดัง ตารางที่ 4.3 โดยคอลัมน์ที่ 1 ใช้เวอร์เนียร์วัดความหนาของขั้วไฟฟ้า CdS/CNT/C เท่ากับ 0.025 m วัดความต้านทาน Ra กับ Rb แสดงในคอลัมน์ที่ 2 กับ 3 ตามลำดับ คอลัมน์ที่ 4 คำนวณเป็นอัตราส่วน Ra/Rb เพื่อนำไปเทียบกับ รูปที่ 4.14 ลากจุดตัดที่แกน y จะได้ค่า f ดังแสดงในคอลัมน์ที่ 5 และคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.11 ดังแสดงในคอลัมน์ที่ 6 พบว่าผลการทดลองเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแกรไฟต์มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันอัตราส่วน CNT น้อยลงทำให้แนวโน้มสภาพต้านทานลดลง ดังนั้น ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า CdS/CNT/C ในการทดลองต้องการพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากและนำไฟฟ้าได้ดี จึงพบว่าในเงื่อนไขการทดลองของขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS บน CNT/C ในอัตราส่วน 1:1.5 มีความเหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะมีปริมาณ CNT มาก (ตัวเร่งปฏิกิริยา) และมีการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่มีแกรไฟต์ โดยเงื่อนไขการทดลองนี้จะสอดคล้องกับผลของเทคนิค FT-IR ที่มีปริมาณ CdS มากกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่น จึงทำการเลือกเงื่อนไขนี้เตรียมขั้วไฟฟ้า CdS/CNT/C โดยทำการฉีดยาลงบนเมมเบรน EC-CCM-50-2 ประกอบเป็น MEA เพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เทียบกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่เตรียมจาก Pt/C

ตารางที่ 4.3 คำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้า

อัตราส่วน ของ CNT/C	ความ หนา (m)	Ra (Ω)	Rb (Ω)	(Ra/Rb)	f	สภาพ ต้านทาน
1:1	0.025	0.042082	0.084417	2.006013	0.910	0.0065218
1:1.5	0.025	0.058017	0.060741	1.046959	0.950	0.0063918
1:2	0.025	0.04663	0.084417	1.810377	0.920	0.0068305
1:2.5	0.025	0.046853	0.031080	1.507505	0.931	0.0041106

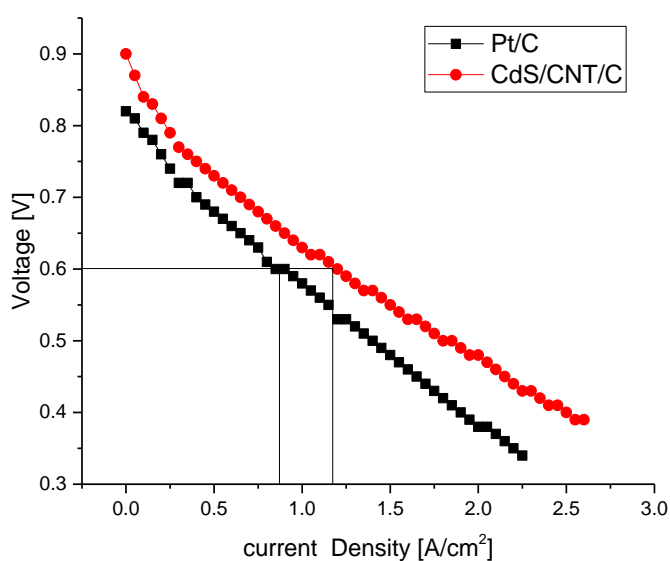


รูปที่ 4.14 $f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)$ (L.J.van der Pauw, Philips Res. Rpts,1958)

4.2.3 ผลของการศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยว

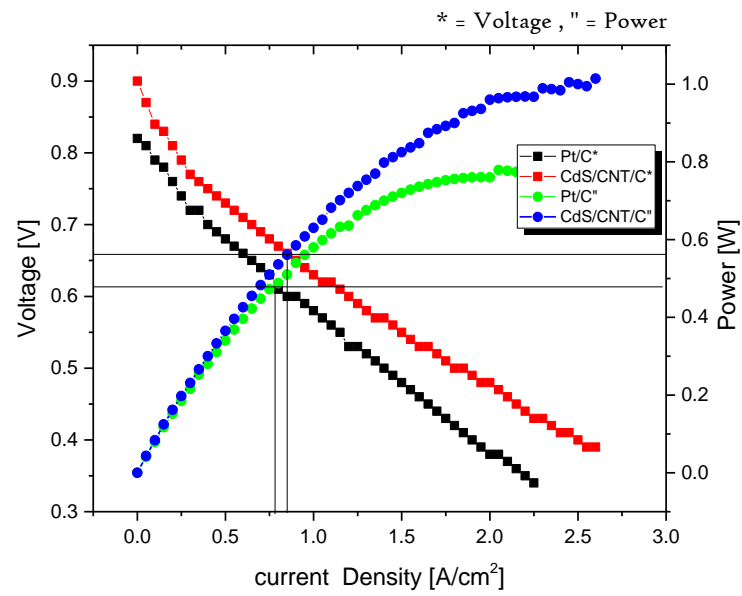
การเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C เทียบกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่เตรียมจาก Pt/C ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ในรูปของกราฟโพลาริเซชันโดยใช้ แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เปรียบเทียบกับแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) เชิงพาณิชย์มีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่มีขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 7x7 ตารางเซนติเมตรเท่ากัน เมมเบรน EC-CCM-50-2 และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดแกรไฟต์ชนิดเดียวกัน เงื่อนไขในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยว ที่ความดัน 1 atm ความชื้น 100% อุณหภูมิภายในเซลล์ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 150 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 150 sccm พบว่า ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว

ใช้แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ (1.2 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า ปริมาณแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) เซิงพาณิชย์มีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (0.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ดังแสดงใน รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 โพลาริเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C เทียบกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่เตรียมจาก Pt/C

ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C เทียบกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่เตรียมจาก Pt/C ดัง รูปที่ 4.16 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจาก Pt/C ให้ความหนาแน่นกระแสเหมาะสมอยู่ที่ 0.56 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.62 โวลต์ และกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ให้ความหนาแน่นกระแสเหมาะสมอยู่ที่ 0.70 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.66 โวลต์ และ กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ 0.48 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ในการประกอบแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) จึงเหมาะสำหรับการนำไปประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่มีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ การประกอบแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) เชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส ความต่างศักย์และกำลังไฟฟ้า
ที่เตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C และ Pt/C

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ ที่ได้ทำการศึกษา ลักษณะทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและไฟฟ้า ของขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C แผ่น อิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่เตรียมด้วยเทคนิคแบบฉีดพ่นในอัตราส่วนของ CdS/CNT/C 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 (CNT/C)

5.1 สรุปผลการวิจัย

เราสามารถเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C แผ่นอิเล็กโทรดประกอบ เมมเบรน (MEA) ที่เตรียมด้วยเทคนิคแบบฉีดพ่นในอัตราส่วนของ CdS/CNT/C 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 (CNT/C) และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราเพิ่ม/ลดอุณหภูมิแคลไซน์ 5 องศาเซลเซียส/นาที่ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำขั้วไฟฟ้า CdS/CNT/C และนำตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ที่ผ่านการแคลไซน์ไปศึกษาสมบัติต่างๆ

1. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา CdS/CNT/C ท่อนาโนคาร์บอน (CNT) แทรกตัวอยู่ระหว่างแกรไฟต์ (C) แต่การกระจายตัว ของ CNT มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า ไม่สามารถที่จะสังเกตเห็น CdS ได้เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย CNT เท่ากับ 31.54863 ± 8.7975 (San jose lab at all, 2015) นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว CNT เท่ากับ 9.05631×10^{-5} ตาราง เมตร/กิโลกรัม จากกราฟการเบี่ยงเบน พบว่าการกระจายตัวของ CNT ลดลงตามอัตราส่วนของ CNT/C 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 โดยตัวเร่งปฏิกิริยา CNT/C มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร

2. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค TEM พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา CdS/CNT/C มีการกระจายตัวของ CdS ใน CNT ไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร มีลักษณะอยู่เป็นก้อนสีดำ แทรกอยู่ใน CNT ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า CdS เป็นจุดเล็กๆ กระจายตัวกันอยู่บน CNT มีขนาด อนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิว CdS เท่ากับ 4.3425 ± 1.45 (San jose lab at all, 2015) นาโนเมตร และ มีพื้นที่ผิว CNT เท่ากับ 0.000286 ตารางเมตร/กิโลกรัม

3. เมื่อศึกษาเฟสของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า CNT/C ที่ตำแหน่งมุมการ เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2θ) เท่ากับ 26.4 42.2 44.5 54.5 และ 77.5 มีรูปแบบการเลี้ยวเบน รัง

สี่เอ็กซ์ตรงกับฐานข้อมูล JCPDS No. 41-1487 สามารถระบุระนาบของผลึกของ CNT/C ได้เป็นระนาบ (002) (100) (101) (004) และ (110) ตามลำดับ และ CdS/CNT/C ที่ตำแหน่งมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2θ) เท่ากับ 20.1 26.4 และ 40.7 มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับฐานข้อมูล JCPDS No. 02-0454 และ 80-0019 สามารถระบุระนาบของผลึก CdS ได้เป็นแบบ face-centered cubic ที่มีระนาบ (220) (111) และ (440) ตามลำดับ ที่ระนาบ (002) มุมการเลี้ยวเบนที่ 26.4° พบว่าขนาดของผลึก CNT มีขนาด 35.49 nm และระนาบ (111) มุมการเลี้ยวเบนที่ 26.4° พบว่าขนาดของผลึก CdS มีขนาด 3.98 nm (San jose lab at all, 2015)

4. จากการศึกษาลักษณะทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CNT/C พบว่าสาร CNT กับ แกรไฟต์ (C) จะมีการดูดกลืนแสงในตำแหน่งเลขคลื่น (Wavenumber) ที่ 1382 cm^{-1} ความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงนี้จะมีค่าลดลง เมื่อมีการเจือแกรไฟต์ (C) เข้ามาเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนของ CNT ต่อ C เป็น 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 ตามลำดับ สาร CdS/CNT/C มีการดูดกลืนแสงในตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3567.66 cm^{-1} ของพันธะ O – H แสดงว่าเป็น CNT และตำแหน่งเลขคลื่นที่ 620 cm^{-1} เป็นพันธะ Cd – S แสดงว่าเป็น CdS โดยพบว่าที่อัตราส่วน 1:1.5 จะมีลักษณะสีกลองและกว้างมากกว่าทุกอัตราส่วนแสดงว่ามี CdS มากกว่าทุกอัตราส่วน

5. จากการศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวลเตอร์พอล เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแกรไฟต์มากขึ้นในขณะเดียวกันอัตราส่วน CNT น้อยลงทำให้แนวโน้มสภาพต้านทานลดลงในอัตราส่วน 1:1.5 มีความเหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะมีปริมาณ CNT มาก (ตัวเร่งปฏิกิริยา) และมีการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่มีแกรไฟต์ จะสอดคล้องกับผลของเทคนิค FT-IR ที่มีปริมาณ CdS มากกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่น

6. จากการศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยว ขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ (1.2 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าปริมาณแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) เชิงพาณิชย์มีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (0.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจาก Pt/C ให้มีความหนาแน่นกระแสเหมาะสมอยู่ที่ 0.56 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.62 โวลต์ และกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C ความหนาแน่นกระแสเหมาะสมอยู่ที่ 0.70 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.66 โวลต์ และ กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ 0.48 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

1. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค TEM พบว่าภาพถ่ายของขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C โฟกัสได้ไม่ชัดเจน จึงทำให้เห็นลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C มีการกระจายตัวไม่ชัดเจน

2. จากการศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าโดยเทคนิคแวลเตอร์พอล ด้วยเครื่อง versa lab พบว่าความต้านทาน R_a และ R_b มีค่าแตกต่างกันจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามักมีความคลาดเคลื่อน

3. จากการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C โดยเทคนิคการฉีดพ่นจะมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C ที่ไม่สม่ำเสมอบนพื้นผิวการทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดเซลล์เดี่ยว

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C โดยเทคนิคการฉีดพ่นจะมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Cds/CNT/C ที่ไม่สม่ำเสมอ ในการทดลองจะเปลี่ยนจากเทคนิคการฉีดพ่นเป็นเครื่องฉีดพ่นอัตโนมัติ (auto spray robot)

2. ในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยว ด้วยเครื่อง fuel cell test station ในระบบสามารถให้ความร้อนเพียง 50 องศาเซลเซียส จึงควรเปลี่ยนระบบให้ความร้อนของอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิงถึงประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส เพราะเป็นช่วงที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานได้ดี

3. ในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแบบเซลล์เดี่ยว ด้วยเครื่อง fuel cell test station ในระบบการป้อนอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนฝั่งขั้วแคโทด ใช้อัตราการไหลของออกซิเจนจากอากาศ (ปริมาณออกซิเจนจากอากาศประมาณ 21%) เปลี่ยนระบบการป้อนออกซิเจนจากอากาศเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์ (100%) จะทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

บรรณานุกรม

กาญจนา พงษ์ศักดิ์. (2547). การปรับปรุงสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับ
ขั้วแอโนดเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ ที่ทนทานคาร์บอนมอนอกไซด์. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

ปานจันทร์ ศรีจรูญและคณะ. (2551). การเตรียมแผ่นสองขั้วจากวัสดุผสมระหว่างกรา
ไฟต์ผงกับพอลิเมอร์เพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (PEMFC)
(Bipolar Plate Made from Polymer-graphite Composites for PEMFC). ภาควิชาวิศวกรรม
เคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาคอุตสาหกรรม, สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). (2559). วิเคราะห์หมู่
ฟังก์ชันของสาร. [Online]. Available:
[https://www.slri.or.th/bds/index.php/component/content/category/15-ir-end-
station.html](https://www.slri.or.th/bds/index.php/component/content/category/15-ir-end-station.html) . [2559, มกราคม 1]

มิณซ์ เมธีสุวกุล. (2551). การปรับปรุงผิวเมมเบรนและระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง
เดี่ยวแบบเมมเบรนพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

มรกต ชาญสำรวจ. (2552). โครงการสร้างต้นแบบพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel
Cell) ชนิด PEMFC ขนาดใหญ่ 11 กิโลวัตต์ จำนวน 6 ชุด (66 กิโลวัตต์) เพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อน
รถพลังงานไฟฟ้าแห่งชาติที่คณะกรรมการการวิทยาศาสตร์ วุฒิสภาเป็นผู้กำหนดนโยบายและ
ส่งเสริม. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

วินิตย์ บุญเทียร(2547). ผลของตัวรองรับต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็ลล์.
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชาติ พงษ์ชัย. (2555). การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบ
โดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่พิมพ์อิงค์เจ็ทสำหรับความทนทานคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์
เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Ashok Ch, Venkateswara Rao K, Shilpa CH. Structural properties of CdS
nono particles prepared in the presence of organic solvent. Advances in Applied
science research (2014) 99-105.

B. Srinivasa rao, B. Rajesh kumar, V. Rajagopal reddy. **Preparation and characterization of Cds nanoparticles by chemical co-precipitation technique.** Chalcogenide letters. (2011) 177-185.

Keithley. **Four-Probe resistivity and hall voltage measurements with the model 4200-SCS.** Application note series.

Knowledge volution. **Infrared Spectroscopy.** (2559). [Online]. Available: <http://share.psu.ac.th/blog/aym2/22567>. [2559, [มกราคม 1]

Lingmin liao, Chunxu pan. **Enhanced electrochemical capacitance of nitrogen-doped carbon nanotubes synthesized from amine flames.** Soft Nanoscience letters (2011) 16-23.

Microscopes. **Microscopes.** (2559). [Online]. Available: <http://www.microscopes.in.th>. [2559, [มกราคม 1]

N. Qutub, S.Sabir. **Optical, Thermal and structural properties of CdS quantum dot synthesized by a simple chemical route.** J. nanosci. Nanotechnol. (2012) 111-120.

San Jose Lab, Corporate Research Institute, Samsung Cheil Industries Inc., San Jose. **Vertically-aligned sandwich nanowires enhance the photoelectrochemical reduction of hydrogen peroxide: Hierarchical formation on carbon nanotubes of cadmium sulfide quantum dots and Prussian blue nanocoatings.** Journal of Colloid and Interface Science 449 (2015) 80–86.

Sang-Sun Parka, Yukwon Jeona, Taegon Kimb,c, Joo-Il Parkc, Yong-Gun Shula. **Enhancement of electrochemical properties through high-temperature treatment of CNF grown on ACF support for PEMFC.** Electrochimica Acta 134 (2014) 49–54.

School and library subscribers. **Encyclopaedia Britannica.** (2559). [Online]. Available: <https://global.britannica.com/technology/transmission-electron-microscope>. [2559, [มกราคม 1]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

ผลการวิจัย

ตารางที่ ก-1 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของ
ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt

Pt/C	ความหนาแน่น กระแส (mA/cm ²)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)		
0.82	0	0
0.81	0.05	0.04
0.79	0.10	0.07
0.78	0.15	0.11
0.76	0.20	0.15
0.74	0.25	0.18
0.72	0.30	0.21
0.72	0.35	0.25
0.70	0.40	0.28
0.69	0.45	0.31
0.68	0.50	0.34
0.67	0.55	0.36
0.66	0.60	0.39
0.65	0.65	0.42
0.64	0.70	0.44
0.63	0.75	0.47
0.61	0.80	0.48
0.60	0.85	0.51
0.60	0.90	0.54
0.59	0.95	0.56

ตารางที่ ก-1 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของ
ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt (ต่อ)

Pt/C		
ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	ความหนาแน่น กระแส (mA/cm ²)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
0.58	1.00	0.58
0.57	1.05	0.59
0.56	1.10	0.61
0.55	1.15	0.63
0.53	1.20	0.63
0.53	1.25	0.66
0.52	1.30	0.67
0.51	1.35	0.68
0.5	1.40	0.70
0.49	1.45	0.71
0.48	1.50	0.72
0.47	1.55	0.72
0.46	1.60	0.73
0.45	1.65	0.74
0.44	1.70	0.74
0.43	1.75	0.75
0.42	1.80	0.75
0.41	1.85	0.75
0.40	1.90	0.76
0.39	1.95	0.76
0.38	2.00	0.76
0.38	2.05	0.77

ตารางที่ ก-2 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C

CdS/CNT/C		
ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm ²)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
0.90	0	0
0.87	0.05	0.04
0.84	0.10	0.08
0.83	0.15	0.12
0.81	0.20	0.16
0.79	0.25	0.19
0.77	0.30	0.23
0.76	0.35	0.26
0.75	0.40	0.30
0.74	0.45	0.33
0.73	0.50	0.36
0.72	0.55	0.39
0.71	0.60	0.42
0.70	0.65	0.45
0.69	0.70	0.48
0.68	0.75	0.51
0.67	0.80	0.53
0.66	0.85	0.56
0.65	0.90	0.58
0.64	0.95	0.60
0.63	1.00	0.63
0.62	1.05	0.65
0.62	1.10	0.68
0.61	1.15	0.70

ตารางที่ ก-2 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS/CNT/C (ต่อ)

CdS/CNT/C		
ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm ²)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
0.60	1.20	0.72
0.59	1.25	0.73
0.58	1.30	0.75
0.57	1.35	0.76
0.57	1.40	0.79
0.56	1.45	0.81
0.55	1.50	0.82
0.54	1.55	0.83
0.53	1.60	0.84
0.53	1.65	0.87
0.52	1.70	0.88
0.51	1.75	0.89
0.50	1.80	0.90
0.50	1.85	0.92
0.49	1.90	0.93
0.48	2.00	0.96
0.47	2.05	0.96
0.46	2.10	0.96
0.45	2.15	0.96
0.44	2.20	0.96
0.43	2.25	0.96
0.43	2.30	0.98
0.42	2.35	0.98
0.41	2.40	0.98
0.41	2.45	1.00
0.40	2.50	1.00

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข
แสดงการคำนวณ

1. การหาน้ำหนักโดยมวล

จากสูตรการหาเปอร์เซ็นต์ร้อยละโดยมวล

$$\% \text{ ร้อยละโดยมวล (wt\%)} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารทั้งหมด}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (\text{ก.1})$$

ตัวอย่างการคำนวณ

1.1 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล

ในการเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล และเตรียมน้ำปริมาณ 320 มิลลิลิตร สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ ก.1 ดังนี้

$$5 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารทั้งหมด}} \right) \times 100$$

$$5 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{320 + \text{มวลของตัวถูกละลาย}} \right) \text{กรัม} \times 100$$

$$1600 + 5(\text{มวลของตัวถูกละลาย}) \text{กรัม} = 100(\text{มวลของตัวถูกละลาย}) \text{กรัม}$$

$$\text{มวลของตัวถูกละลาย} = 16 \text{ กรัม}$$

ในมวลของตัวถูกละลาย 16 กรัม จะมีโซเดียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังนั้นจึงมีโซเดียมออกไซด์ 12 กรัม และแคลเซียมออกไซด์ 4 กรัม

1.2 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล

ในการเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล และเตรียมน้ำปริมาตร 320 มิลลิลิตร สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ ก.1 ดังนี้

$$10 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารทั้งหมด}} \right) \times 100$$

$$10 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{320 + \text{มวลของตัวถูกละลาย}} \right) \text{กรัม} \times 100$$

$$3200 + 10(\text{มวลของตัวถูกละลาย})\text{กรัม} = 100(\text{มวลของตัวถูกละลาย})\text{กรัม}$$

$$\text{มวลของตัวถูกละลาย} = 36 \text{ กรัม}$$

ในมวลของตัวถูกละลาย 36 กรัม จะมีโซเดียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังนั้นจึงมีโซเดียมออกไซด์ 27 กรัม และแคลเซียมออกไซด์ 9 กรัม

1.3 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวล

ในการเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวล และเตรียมน้ำปริมาตร 320 มิลลิลิตร สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ ก.1 ดังนี้

$$15 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารทั้งหมด}} \right) \times 100$$

$$15 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{320 + \text{มวลของตัวถูกละลาย}} \right) \text{กรัม} \times 100$$

$$4800 + 15(\text{มวลของตัวถูกละลาย})\text{กรัม} = 100(\text{มวลของตัวถูกละลาย})\text{กรัม}$$

$$\text{มวลของตัวถูกละลาย} = 56 \text{ กรัม}$$

ในมวลของตัวถูกละลาย 56 กรัม จะมีโซเดียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังนั้นจึงมีโซเดียมออกไซด์ 42 กรัม และแคลเซียมออกไซด์ 14 กรัม

1.4 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล

ในการเตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล และเตรียมน้ำปริมาณ 320 มิลลิลิตร สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ ก.1 ดังนี้

$$20 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารทั้งหมด}} \right) \times 100$$

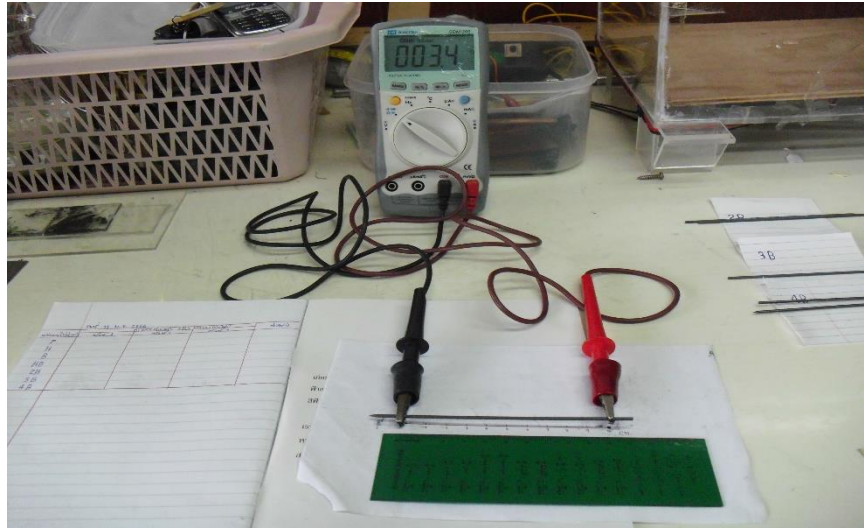
$$20 \text{ wt\%} = \left(\frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{320 + \text{มวลของตัวถูกละลาย}} \right) \text{กรัม} \times 100$$

$$\begin{aligned} 6400 + 20(\text{มวลของตัวถูกละลาย})\text{กรัม} &= 100(\text{มวลของตัวถูกละลาย})\text{กรัม} \\ \text{มวลของตัวถูกละลาย} &= 80 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

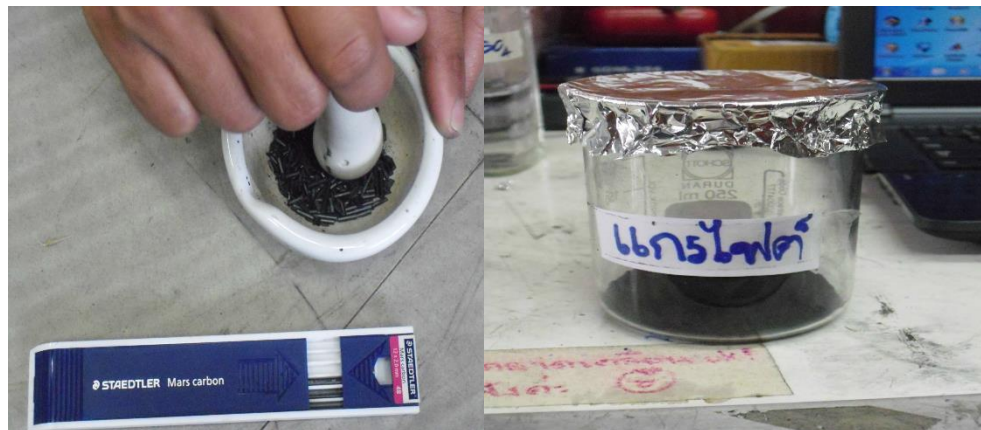
ในมวลของตัวถูกละลาย 80 กรัม จะมีโซเดียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังนั้นจึงมีโซเดียมออกไซด์ 60 กรัม และแคลเซียมออกไซด์ 20 กรัม

ภาคผนวก ค

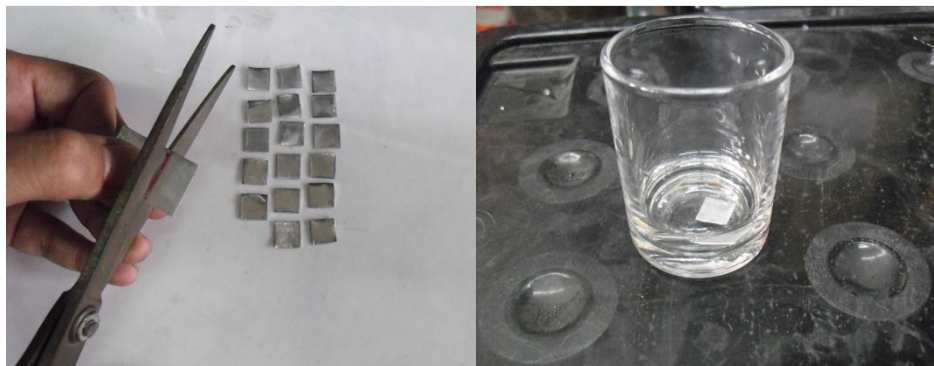
ภาคผนวก ค
ภาพประกอบงานวิจัย



ค-1. แสดงการวัดค่าความต้านทานของแท่งแกรไฟต์



ค-2. แสดงการบดแท่งแกรไฟต์และได้ผงแกรไฟต์ออกมา



ค-3. แสดงการตัดแผ่นอลูมิเนียม 6061 ขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ แล้วแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (5M HCl) นาน 30 นาที



ค-4. แสดงการขัดแผ่นอลูมิเนียม 6061 ด้วยกระดาษทรายแล้วเช็ดผิวให้สะอาดจากนั้นนำไปวางในห้องเคลือบ



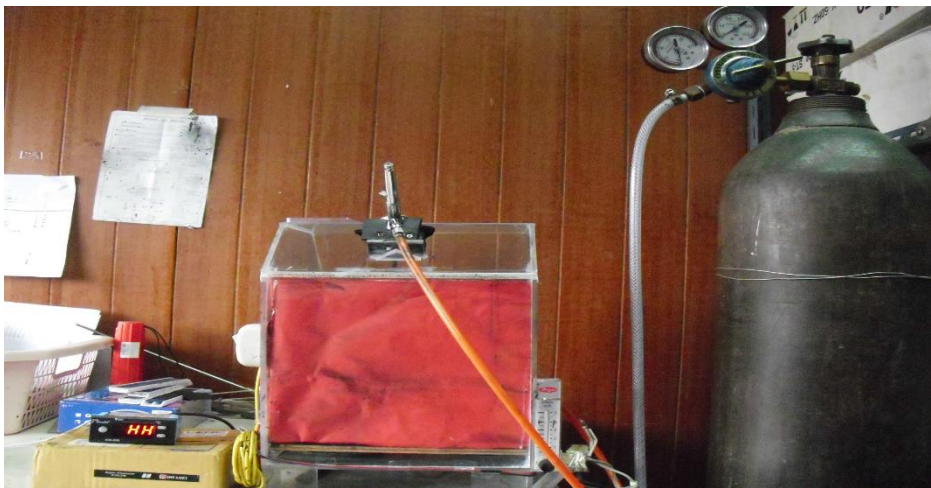
ค-5. แสดงสารที่ใช้ในการเตรียมแกรไฟต์ที่เปอร์เซ็นต์แกรไฟต์ต่างๆและชั่งแกรไฟต์ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลแบบ 3 ตำแหน่ง



ค-6. กวนสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องกวนสารนาน 30 นาทีและการฉีดพ่นสารเคลือบ



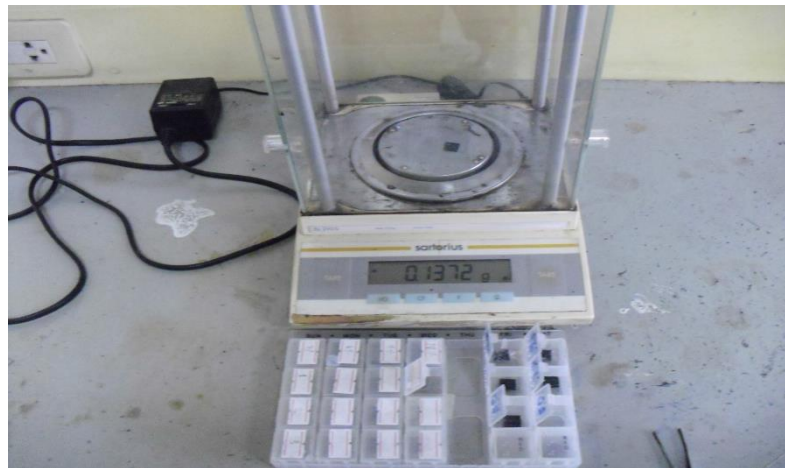
ค-7. แสดงแผ่นอลูมิเนียม 6061 ที่ผ่านการเคลือบด้วยแกรไฟต์และไม่ผ่านการเคลือบ



ค-8. แสดงเครื่องเคลือบแบบฉีดพ่น



ค-9. แสดงเครื่องมือการวัดค่าสภาพต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR) ของชิ้นงานที่เตรียมจากงานวิจัยนี้



ค-10. ชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบ 4 ตำแหน่ง



ค-11. แสดงแผ่นชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแบบฉีดยึดเมื่อแช่ในกรด H_2SO_4

ประวัติผู้วิจัย

ผู้วิจัย

1.1 ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นายพรชัย ชินนasa

(ภาษาอังกฤษ) Mr. Pornchai Chinnasa

1.2 เลขหมายประจำตัวประชาชน 334160112984 1

1.3 ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

1.4 หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
เลขที่ 80 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000
โทรศัพท์ 087-0659622

E-mail : chinnasa@hotmail.com

1.5 ประวัติการศึกษา

- ปริญญาโท วท.ม. เคมีเทคนิค (เทคโนโลยีเชื้อเพลิง) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปริญญาตรี วท.บ. ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1.6 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- พลังงานทดแทนและไฮโดรเจน

1.7 งานวิจัย

- Nano porous silicon ที่ใช้สำหรับ solar cell
- Preparation of metal coated carbon composite bipolar plate ใช้ในเซลล์

เชื้อเพลิง

1. บทความวิจัย/บทความทางวิชาการ

- [1] P. Chinnasa, K. Pruksathorn and S. Woramongkolchai., “ Preparation of metal coated carbon composite bipolar plate”, The 12th National Graduate Research Conference, Khon Kean University, Thailand, February 12 – 13, (2009)

2 บทความวิจัย/บทความทางวิชาการ ที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ (ที่มี proceeding)

- [1] Chinnasa, P.and, Ponken, T. (2015). Fabrication bipolar plate metal aluminum coated carbon for PEMFC. **The International Conference on Sciences and Technology November 4-6 2015**: at Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- [2] Chinnasa, P.and, Ponhan, W. (2015). Preparation of reactor generation clean energy from waste aluminum. **The 5th International Conference on Sciences and Social Sciences 2015**: September 18-19, 2015 at Rajabhat Maha Sarakham University

3 บทความวิจัย/บทความทางวิชาการ ที่ตีพิมพ์ในวารสารฐาน TCI หรือ ฐานข้อมูลอื่น

- [1] Fabrication, Characterization and Magnetic Properties of Fe- doped SrTiO₃ Nanofibers *W. Ponhan**, *N. Noona*,*Y. Khanma*, *P. Chinnasa* and *S. Maensiri*. (2016) **Journal of Science & Technology**, Ubon Ratchathani University, Special Issue, December, 2016
- [2] Development and Simulation Performance Analysis of PEMFC based on Bipolar Plates Fabricated Employiom Designs *P. Chinnasa**,*P. Khamsuk*, *S. Seechalee* and *E. Swatsitang* (2016) **Journal of Science & Technology**, Ubon Ratchathani University, Special Issue, December, 2016
- [3] Electrospun of Epoxidized Natural Rubber with Polyvinylpyrrolidone (PVP) Composites Membrane for PEMFC Application *P. Chinnasa**, *W. Ponhan*, *P. Sarasee*, *Y. Phoemphun* and *E. Swatsitang* (2016) **Journal of Science & Technology**, Ubon Ratchathani University, Special Issue, October, 2016