

สมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยอะลูมิเนียมไนไตรต์โดยแมกนี
ตรอนสปัตเตอริง

นายชาวลิต สีโสภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

CORROSION PROTECTION PROPERTIES OF STAINLESS STEEL COATED WITH
ALUMINIUM NITRIDE USING MAGNETRON SPUTTERING

Mr. Chaowalit Seesopa

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบ ด้วยอะลูมิเนียมไนไตรต์โดยแมกนีตรอนสเป็คเตอริง
โดย	นาย เซาวลิต สีโสภา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาท
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิจงศ์ ฉัตรภรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาท)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิจงศ์ ฉัตรภรณ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย)

เซาวลิต สีโสภา: สมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วย
อะลูมิเนียมไนไตรด์โดยแมกนีตรอนสปัตเตอริง. (CORROSION PROTECTION
PROPERTIES OF STAINLESS STEEL COATED WITH ALUMINIUM NITRIDE
USING MAGNETRON SPUTTERING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เก็จวลี
พฤกษาทรร, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ไชยพงศ์ ฉัตรภรณ์, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลขององค์ประกอบ ความหนา และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ
เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิง
ไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยการเปลี่ยนค่าความ
ดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน ตั้งแต่ร้อยละ 0-50 ของของแก๊สทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในภาชนะ
สุญญากาศ (Vacuum chamber) หรือมีค่าตั้งแต่ $0 - 2.8 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์ โครงสร้างผลึก สมบัติ
เชิงไฟฟ้า และสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางทดสอบโดยการเลี้ยวเบนของรังสี
เอกซ์ วัดความต้านทานเชิงสัมผัส และวัดอัตราการกัดกร่อนด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้าในกรด
ซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า สามารถเคลือบฟิล์มบาง
อะลูมิเนียมไนไตรด์ Wurtzite (hexagonal) บนแผ่นรองรับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ ค่าความดันย่อย
ของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 มีความเหมาะสมมากที่สุด
สำหรับใช้เป็นเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ เนื่องจากมีสมบัติความ
ต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนต่ำ ส่วนความหนาของฟิล์มบางเพิ่มตามการเพิ่มเวลา
ที่ใช้ในการเคลือบ ตั้งแต่ 15-60 นาที พบว่า ฟิล์มบางที่เคลือบด้วยเวลา 60 นาที มีความหนา
18.05 ไมโครเมตร มีความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดคือ 5.8 มิลลิโอม
ตารางเซนติเมตร และ 8.2 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และฟิล์มบางที่
เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ที่ความหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร มีความต้านทานเชิง
สัมผัสและอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดคือ 3 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร และ 12.9 ไมโครแอม
แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....
ปีการศึกษา.....2554.....

ลายมือชื่อ.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5172265323: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : bipolar plate / aluminium nitride / corrosion protection

CHAOWALIT SEESOPA : CORROSION PROTECTION PROPERTIES OF
STAINLESS STEEL COATED WITH ALUMINIUM NITRIDE USING
MAGNETRON SPUTTERING. ADVISOR : ASSOC. PROF. KEJVALEE
PRUKSATHORN Ph.D., CO-ADVISOR : ASST. PROF. SOJIPHONG
CHATRAPORN, 85 pp.

This research was studied the effect of composition, thickness and power of Aluminium-Nitride-coated on electrode plates on corrosion-resistance and conductivity. The Aluminium Nitride thin film was deposited on SUS 301 stainless steel plate by a DC magnetron sputtering technique. The Al : N compositions were examined in terms of used N₂ partial pressure (0-50%) during the sputtering process. The crystal structure of AlN thin film was determined by X-Ray Diffraction (XRD) technique. The electrical conductivity was measured and expressed in interfacial contact resistance. The corrosion rate was determined in 0.1 M sulfuric acid by electrochemical method. The results were showed that, AlN thin film in form of Wurtzite (hexagonal) could be prepared by DC magnetron sputtering technique. The optimum content of N₂ partial pressure was approximately 5% for both interfacial contact resistance and corrosion rate because of its relatively low. The thickness had also effected on interfacial contract resistance and corrosion rate. The optimum film thickness of 18 μm with interfacial contact resistance at 200 lb_r.in of moment torque was 5.8 mΩ.cm² and corrosion rate was 8.2 μA/cm². The optimum power of 200 watts with 10 μm thickness had interfacial contact resistance and corrosion rate 3 mΩ.cm² and 12.9 μA/cm², respectively.

Department : Chemical Technology Student's Signature

Field of Study : Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิโรจพิงค์ ฉัตรภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีรวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย และอาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียมปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ที่สนับสนุนให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN276B)

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำกรวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	4
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton Exchange Membrane (PEM).....	5
2.2 องค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	7
2.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate).....	8
2.3.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ.....	10
2.3.2 กระบวนการเคลือบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ.....	11
2.4 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel).....	12
2.4.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	13
2.4.2 ธาตุและการให้สมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม.....	14
2.5 พิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	15
2.5.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	16
2.6 อิทธิพลของตัวแปรในการสับตัดเตอริง.....	17
2.6.1 ผลของโครงสร้างสารรองรับต่อโครงสร้างฟิล์ม.....	17
2.6.2 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อโครงสร้างฟิล์มบาง.....	18

บทที่	หน้า
2.6.3 ผลของความดันแก๊สย่อยต่อโครงสร้างฟิล์มบาง.....	19
2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับสปีดเตอริง.....	21
2.7.1 กระบวนการพลาสมาโกลวดิสซาร์จ.....	21
2.7.2 กระบวนการชนภายในโกลวดิสซาร์จ.....	24
2.7.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกกับพื้นผิว.....	27
2.7.4 ดีซี สปีดเตอริง.....	28
2.7.5 แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	28
2.7.5.1 สนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า.....	28
2.7.5.2 สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า.....	29
2.7.6 รีแอกทีฟ สปีดเตอริง.....	30
2.7.6.1 การปลูกฟิล์มบางของสารประกอบโดยเทคนิค รีแอกทีฟ แมก นีตรอน สปีดเตอริง.....	30
2.7.7 การปลูกฟิล์มบางโดยวิธี รีแอกทีฟ ดีซี-แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	31
2.7.8 การฟอร์มตัวของฟิล์มบาง.....	32
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	36
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	36
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	37
3.3.1 วิธีการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	37
3.3.2 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	39
3.3.2.1 โครงสร้างผลึก.....	39
3.3.2.2 การวัดค่าความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR).....	40
3.3.2.3 การวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบาง อะลูมิเนียมไนไตรด์	42
3.3.2.4 สัณฐานวิทยาของพื้นผิว.....	44

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์..	45
4.1.1 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนในฟิล์มบางต่อโครงสร้างผลึกฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	45
4.1.2 ผลของความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนต่อองค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	47
4.1.3 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนในฟิล์มบางต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	50
4.1.4 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนในฟิล์มบางต่ออัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	53
4.2 ผลของความหนาของฟิล์มบางต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	56
4.2.1 ผลของเวลาที่เคลือบฟิล์มบางต่อความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	57
4.2.2 ผลของความหนาของฟิล์มบางต่อความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	59
4.2.3 ผลของความหนาของฟิล์มบางต่ออัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	62
4.3 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	63
4.3.1 ผลของกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการเคลือบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์..	64
4.3.2 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	66
4.3.3 ผลของกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์	69
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	73
รายการอ้างอิง.....	74

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	79
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่เหมาะสมในการทำเป็นองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.2 การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น bipolar plate.....	9
2.3 สมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ Wurtzite (hexagonal).....	16
3.1 เส้นใยต่างๆ ในกระบวนการเคลือบฟิล์ม.....	38
3.2 ชุดกระบวนการเดี่ยวบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์.....	40
4.1 แสดงผลของกาหาองค์ประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 3 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม).....	48
4.2 แสดงผลของกาหาองค์ประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม).....	48
4.3 แสดงผลของกาหาองค์ประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 10 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม).....	49
4.4 แสดงผลของกาหาองค์ประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 50 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม).....	49
ก1 องค์ประกอบของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 301ที่ใช้ในงานวิจัย.....	79
ก2 สมบัติกายภาพของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 301ที่ใช้ในงานวิจัย.....	79

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC หนึ่งเซลล์ (Single cell).....	6
2.2	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เมื่อนำมาต่อกันแบบชั้น (Fuel cell stack).....	6
2.3	โครงสร้างแบบ Wurtzite (hexagonal).....	15
2.4	โครงสร้างผลึกของเฟส Cubic ของฟิล์มบางอะลูมิเนียม.....	17
2.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบบนสารรองรับชนิดต่างๆ (a) Al; (b) Ti; (c) Mo; (d) Au/Ti; (e) Pt/Ti.....	18
2.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ.....	19
2.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนปริมาณร้อยละต่างๆ (a) 20, (b) 40, (c) 60 และ (d) 80.....	20
2.8	ภาพถ่ายโดยเทคนิค SEM แสดงขนาดของ grain size ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนปริมาณร้อยละต่างๆ (a) 20 และ (b) 80.....	20
2.9	ภาพถ่ายโดยเทคนิค SEM แสดงแนวโน้มความขรุขระของผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนปริมาณร้อยละต่างๆ.....	21
2.10	ไดอะแกรมของระบบดีซี สปีดเตอริง.....	22
2.11	แรงดันไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสของดีซี โกลวดิสชาร์จ.....	23
2.12	ตัวอย่างการชนระหว่างอนุภาคสองตัว.....	25
2.13	ผลที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคพุ่งเข้าชนที่พื้นผิวของเป้า.....	27
2.14	ผลของทิศสนามแม่เหล็ก \vec{B} ชนากับทิศสนามไฟฟ้า \vec{E} ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน.....	29
2.15	การให้สนามและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนแผ่นแม่เหล็ก.....	30

ภาพที่	หน้า	
2.16	กลไกการเกิดของการปลูกฟิล์มแบบรีแอคทีฟสปีดเตอริง (ก) เกิดบริเวณหน้า เป้าสารเคลือบ (ข) เกิดระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ และ (ค) เกิดบริเวณแผ่น รองรับ.....	31
2.17	ระบบ รีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	32
2.18	การฟอร์มตัวของฟิล์มบางในสถานะต่างๆ.....	33
3.1	แผนภาพของ รีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	38
3.2	การการวัดความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR).....	41
3.3	การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน.....	41
3.4	ค่าความต้านทานเป็นความชันของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และ กระแสไฟฟ้า.....	41
3.5	การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางอะลูมิเนียม ไนไตรด์.....	42
3.6	การวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงาน.....	43
3.7	ภาพร่างของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	44
4.1	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง อะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียมเมื่อ (a) Al/SS301 ($P_{N_2} = 0\%$), (b) AlN/SS301 ($P_{N_2} = 5\%$), (c) AlN/SS301 ($P_{N_2} = 10\%$) และ (d) SS301 uncoated.....	47
4.2	แสดงแนวโน้มของการเพิ่มปริมาณธาตุไนโตรเจนภายในฟิล์มบางเมื่อค่าความ ดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 5, 10 และ 50.....	50
4.3	แสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ค่าความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ค่าของแรงในการอัดเปลี่ยนไปจาก 60 ถึง 200 lb _f .in.....	50
4.4	ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ (a) Al/Si glass (Ar:N ₂ =100:0), (b) AlN/Si glass (Ar: N ₂ =97:3) และ(c) AlN/Si glass (Ar: N ₂ =90:10).....	52
4.5	แสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ค่าความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 0 ถึง 50 เมื่อใช้ค่าของแรงในการอัดเปลี่ยนไปจาก 60 ถึง 200 lb _f .in.....	53

ภาพที่	หน้า	
4.6	แสดงอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม เมื่อความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนเป็นร้อยละ 0 ถึง 10.....	55
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม ที่ความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 0 ถึง 10.....	56
4.8	ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเวลาค่าต่างๆ.....	57
4.9	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เลาในการเคลือบเป็น (a) 15 นาที (b) 30 นาที (c) 45 นาที และ (d) 60 นาที.....	58
4.10	ความไม่เป็นระเบียบของระนาบของฟิล์มบางที่เกิดจากความไม่เรียบบริเวณผิวสารรองรับ.....	58
4.11	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาต่างๆ.....	59
4.12	ความขรุขระ (Roughness) ของฟิล์มบางเมื่อเวลาในการเคลือบเปลี่ยนไป.....	61
4.13	ขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มบางเปลี่ยนไป.....	61
4.14	ค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาในการเคลือบฟิล์มบางจาก 0 ถึง 60 นาที.....	62
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 0 ถึง 60 นาที.....	63
4.16	อัตราการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400วัตต์.....	64
4.17	ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่กำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มบาง 200 ถึง 400 วัตต์.....	65
4.18	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่กำลังไฟฟ้า (a) 200 วัตต์ (b) 300 วัตต์ และ (c) 400 วัตต์...	66

ภาพที่		หน้า
4.19	ความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์.....	67
4.20	ความขรุขระของผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์.....	68
4.21	ขนาดของเกรนของผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ค่ากำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์.....	69
4.22	อัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์.....	70
4.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง 200 ถึง 400 วัตต์.....	70
ก1	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบที่ขนานกันในผลึกตาม <i>Bragg's law</i>	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) เป็นเซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้สามารถเติมเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ซึ่งช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป เซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางคือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Polymer electrolyte membrane fuel cells เรียกย่อๆว่า PEMFC) โดยมีหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญ คือแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) มีหน้าที่สำคัญหลายประการได้แก่ กระจายแก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิไดซ์ภายในเซลล์ จัดการระบบน้ำเข้า-ออก ภายในเซลล์ แยกเซลล์แต่ละเซลล์ภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง นำกระแสไฟฟ้าออกจากเซลล์ และจัดการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

แต่การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีสภาพความเป็นกรดทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วได้ วัสดุที่นำมาทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แกรไฟต์ เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วก่อนที่จะมีการพัฒนาวิจัยเกี่ยวกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ แกรไฟต์สามารถทนการกัดกร่อนได้ดีและมีสภาพต้านทานการนำไฟฟ้าต่ำ แต่แกรไฟต์มีข้อเสียคือ ราคาแพง และขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากสมบัติเชิงกลต่ำซึ่งมีความเปราะ ส่วนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือสามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเนื่องจากภาวะภายในเซลล์มีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดฟิล์มของสารประกอบออกไซด์ของโลหะจึงส่งผลให้ภายในเซลล์เกิดสภาพต้านทานการนำไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้แรงดันตกได้ [1] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและวิจัยเพื่อค้นหาวิธีการที่จะทำให้ได้องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หนึ่งในองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงที่จำเป็นต้องมีการพัฒนาประสิทธิภาพก็คือ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้ได้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าที่มีสมบัติที่ต้องการคือ มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี หรือมีสภาพต้านทานการนำกระแสไฟฟ้าต่ำ และมีความคงทนต่อสภาพการกัดกร่อนจากกรดได้ดี ซึ่งวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้ได้แก่ การเคลือบด้วยวิธีการทา (Painting) การเคลือบด้วยการฉีดพ่น (Spray method) การเคลือบด้วยเคมีไฟฟ้า

(Electroplating) วิธีพอกพูนของไอเชิงกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD) และ Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition (Plasma CVD) เป็นต้น

วิธีการเคลือบด้วยการทาและการพ่นไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากทั้งสองวิธีมีข้อบกพร่องหลายประการ เช่น เป็นวิธีการที่ต้องอาศัยตัวช่วยยึดเกาะ (binder) ซึ่งตัวสารช่วยยึดเกาะส่วนใหญ่แล้วเป็นสารที่นำกระแสไฟฟ้าต่ำหรืออาจไม่นำกระแสไฟฟ้าก็ได้จึงส่งผลเสียต่อค่าการนำกระแสไฟฟ้าของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าหลังจากการเคลือบ เหตุผลอีกประการหนึ่งคือทั้งสองวิธีนี้สามารถควบคุมความหนาของชั้นตัวเคลือบได้ยากหรือไม่สามารถควบคุมได้เลย ทำให้ชั้นงานที่ได้ด้วยวิธีการทั้งสองมีความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างมากทำให้ส่งผลต่อค่าสภาพต้านทานการนำไฟฟ้าและเหตุผลอีกประการหนึ่งก็คือพื้นผิวของชั้นงานที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้ค่อนข้างมีผิวที่ขรุขระทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (contact resistance) สูงขึ้น ที่สำคัญที่สุดคือทั้งสองวิธีนี้เป็นการเกาะติดอยู่กับตัวแผ่นโลหะแบบหลวมๆ ทำให้สามารถหลุดออกได้ง่ายส่งผลให้เสถียรภาพทางเคมีต่ำทำให้ความสามารถทนต่อการกัดกร่อนต่ำด้วย จากเหตุผลหลายประการที่กล่าวมานั้นทำให้ทั้งสองวิธีนี้ไม่ได้รับความนิยมและเลิกใช้ไปในที่สุด [2, 3]

การเคลือบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (electrochemical deposition) เป็นอีกวิธีการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพราะวิธีนี้เป็นการเคลือบที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้และเป็นวิธีที่ค่อนข้างไม่ซับซ้อนยุ่งยาก แต่วิธีการเคลือบด้วยเคมีไฟฟ้ายังมีข้อเสีย คือ ชั้นงานที่ได้ค่อนข้างมีความสามารถในการยึดเกาะกับสารรองรับต่ำเมื่อเทียบกับการเคลือบโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron sputtering) จึงทำให้ส่งผลต่อค่าสภาพต้านเชิงสัมผัสและการต้านทานการกัดกร่อน และเหตุผลอีกประการหนึ่งคือพื้นผิวที่ได้จะเกิดรอยแยกของชั้นเคลือบส่งผลให้สามารถถูกกัดกร่อนได้ง่าย [4]

การเคลือบด้วยวิธี Physical Vapor Deposition (PVD) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยอาศัยหลักการทำให้สารตัวเคลือบระเหยกกลายเป็นไอด้วยความร้อนและความดันต่ำ หรือระบบสุญญากาศ (vacuum) แล้วสารที่ระเหยจะไปเกาะเป็นฟิล์มที่ผิวของสารรองรับที่ต้องการเคลือบทำให้ฟิล์มสามารถยึดเกาะได้ดีกว่าวิธีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ การกระจายความหนาของฟิล์มที่ได้สม่ำเสมอ และพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ แต่วิธีนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงในกระบวนการให้ความร้อนแก่สารที่ต้องการทำให้ระเหย และเป็นระบบที่ต้องการความดันต่ำมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี แมกนีตรอนสปัตเตอริง [5]

ส่วนการเคลือบด้วยวิธีการ Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition (plasma CVD) [6] เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นวิธีที่เคลือบฟิล์มที่สามารถยึดเกาะได้ดี สามารถควบคุมความหนาได้ การกระจายความหนาของฟิล์มที่ได้สม่ำเสมอ และพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ แต่วิธีการเคลือบนี้ยังมีข้อเสียคือเกิดรอยแยกที่บริเวณผิวของชิ้นงานหลังจากทำการเคลือบฟิล์ม

ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นทำให้ในการศึกษาวิจัยนี้ได้มีการเสนอวิธีการเคลือบด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีการแมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อมาทดแทนวิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด เนื่องจากมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการนี้บ่งชี้ว่า สมบัติของชั้นเคลือบที่ได้จากการเคลือบด้วย วิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีพื้นผิวที่เรียบ และสามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้อย่างแน่นอนเนื่องจากการเคลือบมีอัตราที่แน่นอนซึ่งควบคุมความหนาได้ด้วยเวลาที่ทำการเคลือบและชั้นเคลือบมีความบางมากทำให้ค่าการนำกระแสไฟฟ้าลดลงไม่มาก และเหตุผลที่สำคัญของการเคลือบด้วยวิธีนี้คือ ชั้นสารตัวเคลือบสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับแผ่นโลหะ ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีสามารถยึดเกาะได้ดี และมีความเสถียรทางเคมีสูงกว่าวิธีที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบอะลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. ศึกษาผลขององค์ประกอบในสารเคลือบต่อสมบัติการกัดกร่อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิม
2. เตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดโลหะด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
3. สารเคลือบที่ใช้คือ Aluminium nitride film

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้

1. สามารถเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบรีเอกทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. ได้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะให้มีความต้านทานเชิงสัมผัสที่ต่ำและความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการงานเซลล์เชื้อเพลิง

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ศึกษาวิธีการและวางแผนการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดลองที่มีขั้นตอนเหมาะสมและไม่เกิดอันตราย
2. เตรียมวัสดุและสารเคมี
3. เตรียมอุปกรณ์สำหรับวัดความต้านทานไฟฟ้าและการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์
4. ศึกษาการเตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยรีเอกทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง
5. ศึกษาปัจจัยในองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบาง และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่มีผลต่อความต้านทานเชิงสัมผัสและการกัดกร่อน
6. นำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อน
7. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง
8. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

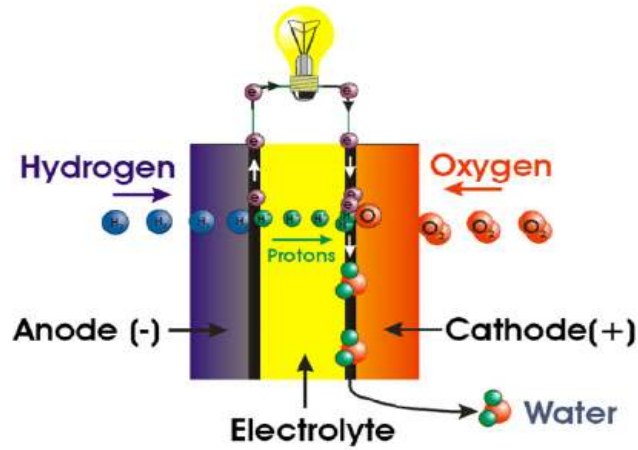
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM ซึ่งมุ่งเน้นในส่วนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว พอลิเมอร์บางอะลูมิเนียมไนไตรด์รวมถึงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์นี้ด้วย และอธิบายถึงรายละเอียดที่สำคัญเกี่ยวกับเทคนิค รีแอคทีฟ ดีซี-แมกเนตรอนสปัตเตอริง ซึ่งใช้เป็นวิธีเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ในงานนี้

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton Exchange Membrane (PEM)

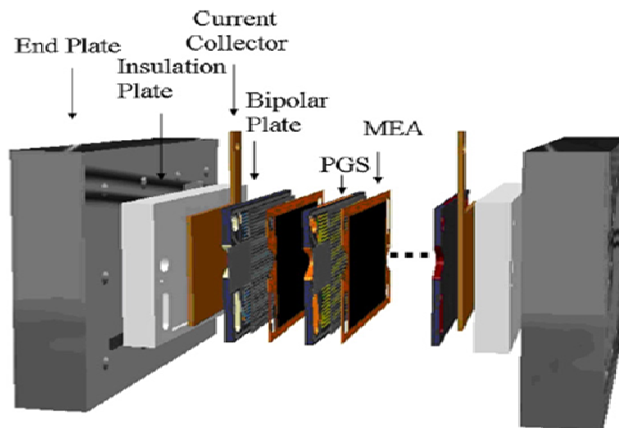
โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton Exchange Membrane [7, 8, 9] ประกอบด้วย อิเล็กโทรดเชื้อเพลิง (ขั้วแอโนด) และอิเล็กโทรดออกซิเจน (แคโทด) โดยมีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) กระจายตัวและฝังตัวอยู่ที่ขั้วทั้งสองอย่างสม่ำเสมอเพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นและมีแผ่น Gas Diffusion Backing ประกบปิดทั้งสองขั้วอีกชั้นหนึ่งเพื่อทำหน้าที่เป็นช่องทางผ่านของแก๊สที่เข้ามาทำปฏิกิริยาและรักษาความชื้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงด้วย และทั้งสองขั้วจะถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัตินำไอออน (Ion-Conducting) ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนโปรตอนระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด ด้วยเหตุนี้เองจึงได้เรียกว่า Proton Exchange Membrane (PEM) โดยอิเล็กโทรไลต์มีสมบัติเป็นตัวนำสำหรับโปรตอน แต่เป็นฉนวนสำหรับอิเล็กตรอนและเป็นตัวกั้นการแทรกซึมผ่านของแก๊สด้วย เมื่อนำแต่ละส่วนประกอบมารวมกัน จะเรียกรวมกันว่า Membrane Electrode Assembly (MEA) ในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์นั้นจะต้องมีแผ่นประกบที่ต้องวางอยู่แต่ละด้านของ MEA โดยแผ่นประกบนี้ที่ผิวหน้าสัมผัสกับ MEA จะทำเป็นช่องเพื่อเป็นทางเดินของแก๊สที่แพร่ในแผ่นขั้วไฟฟ้า เกิดปฏิกิริยาที่บริเวณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ด้านที่ประกบกับ MEA แผ่นประกบต้องมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและทนต่อภาวะความเป็นกรดสูงได้ เรียกแผ่นประกบนี้ว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้า (conductive plate) โดยวัสดุที่มีความต้านทานเชิงสัมผัสและความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีพอที่จะนำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้า (conductive plate) คือ แกรไฟต์ Graphite นอกจากนี้ยังต้องมีแผ่นประกั้น (Gasket) ที่มีสมบัติยืดหยุ่นทนต่ออุณหภูมิสูงและแรงกดอัดได้ดี ซึ่งวัสดุที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันคือ Teflon หรือ Silicon โดยทำหน้าที่ป้องกันแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน

ไม่ให้รั่วซึม ซึ่งจะแทรกไว้ในแต่ละหน้าประกบกันระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วกับ MEA ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดจะถูกประกบติดกันเรียกว่า Single cell (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC หนึ่งเซลล์ (Single cell) [8]

สำหรับการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆ เซลล์หรือเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบชั้น (Fuel cell stack) จะเป็นการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเรียงต่อกันหรือเรียงซ้อนกันเป็นชั้น (รูปที่ 2.2) เพื่อเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ก็จะทำหน้าที่เป็น bipolar plate คือเป็นขั้วแอโนดของเซลล์หนึ่งและขั้วแคโทดของอีกเซลล์หนึ่งด้วย

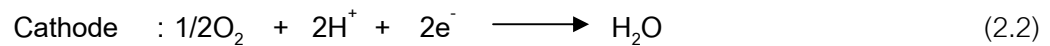


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เมื่อนำมาต่อกันแบบชั้น (Fuel cell stack) [9]

การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเริ่มจากขั้วแอโนดได้รับแก๊สไฮโดรเจนส่วนขั้วแคโทดได้รับแก๊สออกซิเจน แล้วแก๊สจะไหลผ่านช่องภายในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเข้าไปในชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยขั้วแอโนดแก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นโปรตอน (H^+) กับอิเล็กตรอน (e^-) โดย

โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังขั้วแคโทดได้เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในรูปของพอลิเมอร์จะมีสมบัติเป็นตัวนำโปรตอน ส่วนอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่เป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรโหลดภายนอกเพื่อไปยังขั้วแคโทด จากปฏิกิริยาข้างต้นทำให้ขั้วแอโนดมีสมบัติเป็นลบเมื่อเทียบกับขั้วแคโทด

ปฏิกิริยาเคมีจะสมบูรณ์เมื่อโปรตอน อิเล็กตรอน และออกซิเจนรวมตัวกันที่ขั้วแคโทดในรูปของโมเลกุลน้ำ รวมทั้งเกิดความร้อนขึ้นได้จากกระบวนการนี้ ซึ่งอธิบายปฏิกิริยาทางเคมีได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 [8]



2.2 องค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง

1. แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (bipolar plate) [7, 9]

- ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าลบบอกออกไปตามวงจรไฟฟ้าเมื่อมีการต่อครบวงจรไฟฟ้า แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมาจากแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ ความดันอัดผ่านเข้าไปในเซลล์ PEM ไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวให้อิเล็กตรอนและโปรตอน จะแสดงประจุไฟฟ้าลบและประจุบวกตามลำดับ ส่วนประจุบวกจะส่งผ่านไปยังอิเล็กโทรไลต์ (Membrane) เพื่อส่งต่อไปยังขั้วแคโทดต่อไป

- ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับประจุลบมาจากขั้วแอโนด มีหน้าที่สำคัญคือ รับอิเล็กตรอนเข้ามา รวมเข้ากับอะตอมของออกซิเจนกับโปรตอน (H^+) ทำปฏิกิริยาที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นโมเลกุลของน้ำ

2. MEA (Membrane Electrode Assembly)

- Polymer Electrolyte Membrane คือตัวอิเล็กโทรไลต์ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ โดยมีหน้าที่สำคัญคือยอมให้ประจุบวกหรือโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเท่านั้นและไม่ยอมให้ประจุลบหรืออิเล็กตรอนและแก๊สผ่านไป

- ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) มีหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ที่ทั้งสองด้านของ Polymer Electrolyte Membrane (PEM) ทั้งขั้วแอโนดและแคโทดโดยใช้ผงแพลทินัม (Pt) เคลือบอยู่บนกระดาษหรือแผ่นผ้าคาร์บอน การเคลือบด้วยอนุภาคเล็กๆ ของแพลทินัมจึงทำให้ผิวของกระดาษหรือแผ่นผ้าคาร์บอนมีลักษณะเป็นรูพรุนด้วยคุณลักษณะพิเศษนี้ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยามีมากที่สุด

2.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate)

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงทำมาจากแกรไฟต์เนื่องจากทนการกัดกร่อนได้ดีและมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อย แต่ราคาแพงและขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากเปราะ และการใช้งานแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ทำด้วยแกรไฟต์ในปัจจุบันนั้นประสบปัญหาที่สำคัญ คือเรื่องน้ำหนักและราคา [10] ซึ่งน้ำหนักของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ทำจากแกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมาก ดังนั้นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจึงเป็นส่วนประกอบที่มีร้อยละของน้ำหนักสูงที่สุดจากส่วนประกอบทั้งหมดในเซลล์เชื้อเพลิง โดยพบว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีน้ำหนักสูงถึงประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของส่วนประกอบทั้งหมดในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมาก [11] และราคาแพง เพราะต้นทุนกระบวนการผลิต เช่น การสร้างหรือขึ้นรูป และกระบวนการเซาะร่อง เป็นต้น มีค่าใช้จ่ายที่สูง จากการประมาณพบว่า ราคาของแกรไฟต์ที่ผ่านการขึ้นรูปและนำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีมูลค่าคิดเป็นประมาณร้อยละ 30 ของราคาเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์

ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการพัฒนาวัสดุต่างๆ เพื่อใช้แทนแกรไฟต์สำหรับทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว โลหะเป็นวัสดุอีกอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดี ราคาถูก สมบัติเชิงกลดี และขึ้นรูปได้ง่ายสามารถใช้แผ่นบางได้ทำให้น้ำหนักลดลง แต่มีข้อเสียคือจะเกิดการกัดกร่อนของโลหะเนื่องจากสภาพภายในเซลล์มีความเป็นกรดสูง นอกจากนี้ยังอาจเกิดฟิล์มออกไซด์เคลือบผิวของโลหะทำให้สภาพนำไฟฟ้าลดลงไป

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีบทบาทมากมายในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีเอ็เอ็ม โดยจะเป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบภายในแผ่นเดียวหน้าที่หลักของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วได้แก่

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

จากการพิจารณาการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนับว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญมากโดย แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ดีจะต้องมีสมบัติโดยทั่วไป [12] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่เหมาะสมในการทำเป็นองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง [12]

Plate contact resistance	$<10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
Thermal conductivity	$>10 \text{ W(mK)}^{-1}$
Gas permeability	$<10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Flexural Strength	$> 59 \text{ MPa}$
Tensile Strength	$> 41 \text{ MPa}$
Corrosion resistance (0.1 M H_2SO_4)	$< 16 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [13]

วัสดุ	ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)	ข้อดี	ข้อเสีย
แกรไฟต์ (คาร์บอน-คาร์บอน)	200-300	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเสถียร - ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ - ความต้านทานสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าต่ำ - ความต้านทานการกัดกร่อนสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาแพง - เปราะ - มีความหนา เนื่องจากความเปราะจึงต้องมีความหนามากเพื่อความทนทานต่อความดันอัด และการเจาะร่องทางการไหล
คาร์บอนคอมพอสิต	50-200	<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ - อายุการใช้งานยาวนาน - มีสมบัติหลากหลาย 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เครื่องมือในการผลิตที่ซับซ้อน - สมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน
โลหะ	$\sim 5.5 \times 10^5$	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าการนำความร้อนสูง - สามารถรีไซเคิลได้ - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการการเคลือบที่ทนการกัดกร่อนได้ - เกิดฉนวนออกไซด์ที่ผิว

2.3.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ [14, 15]

- **แผ่นโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว (Metalic plates)** ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม ยังเป็นโลหะชนิดเดียวที่มีความเหมาะสมในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว เนื่องจากตัววัสดุค่อนข้างมีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อสารเคมี การเชื่อมผ่านได้ของแก๊สต่ำ มีช่วงของการทำเป็นอัลลอยด์ที่กว้างสามารถผลิตในปริมาณมากได้และมีราคาถูก อย่างไรก็ตามได้มีผู้ศึกษาการใช้ เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณโครเมียมสูงในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วพบว่า มีความเหมาะสมสำหรับผลิตเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง

- **แผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว (Coated metalic plates)** อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม ไทเทเนียมและนิกเกิล คือวัสดุที่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิง การออกแบบของแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบจะออกแบบให้มีชั้นเคลือบป้องกัน ซึ่งวัสดุที่จะมาเคลือบลงบนแผ่นโลหะจะต้องนำไฟฟ้าและติดแน่นอยู่กับชั้นโลหะที่เป็นฐานอย่างดี เพื่อปกป้องชั้นโลหะนั้นจากการกัดกร่อนของภาวะในเซลล์เชื้อเพลิง

การนำโลหะมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วเนื่องจากโลหะนำกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก สามารถผลิตได้ในปริมาณมากในราคาถูกและให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง สำหรับข้อจำกัดของโลหะคือ ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีภาวะเป็นกรดสูง มีผลให้เกิดการป้องกันตัวเองของโลหะโดยจะเกิดฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวโลหะเพื่อลดการกัดกร่อนของตัวโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “แพสซิเวชัน (Passivation)” ตัวอย่างของโลหะที่เกิดแพสซิเวชันได้ง่ายเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless) นิกเกิล (Nickel) ไทเทเนียม (Titanium) อะลูมิเนียม (Aluminium) และโลหะผสม (Alloy) ตัวอย่างของชั้นป้องกันที่อาจเกิดขึ้นได้แก่ออกไซด์ของโลหะและออกไซด์ของโลหะผสม เป็นต้น ซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะ (Metal bipolar plate) มีทั้งข้อดีและข้อเสียสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงดังนี้

ข้อดี

- มีค่าการนำความร้อนสูง
- สามารถรีไซเคิลได้
- ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอ

ข้อเสีย

- เป็นพิษต่ออิเล็กทรอนิกส์
- สามารถเกิดเป็นฉนวนออกไซด์ของโลหะที่ผิวได้

ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมสำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงโลหะที่นำมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วต้องผ่านกระบวนการเคลือบผิวโลหะ (Coating) เพื่อปรับปรุงสมบัติของแผ่นโลหะด้วยกระบวนการเคลือบต่างๆตามความเหมาะสม

2.3.2 กระบวนการเคลือบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้ได้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าที่มีสมบัติที่ต้องการคือ มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี หรือมีสภาพต้านทานการนำกระแสไฟฟ้าต่ำ และมีความคงทนต่อสภาพการกัดกร่อนจากกรดได้ดี ซึ่งวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้ได้แก่ การเคลือบด้วยวิธีการทา (Painting) การเคลือบด้วยการฉีดพ่น (Spray method) การเคลือบด้วยเคมีไฟฟ้า (Electroplating) วิธีตกสะสมของไอเชิงกายภาพ Physical Vapor Deposition (PVD) และ Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition (Plasma CVD) เป็นต้น

วิธีการเคลือบด้วยการทาและการพ่นไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากทั้งสองวิธีมีข้อบกพร่องหลายประการ เช่น เป็นวิธีการที่ต้องอาศัยตัวช่วยยึดเกาะ (binder) ซึ่งตัวสารช่วยยึดเกาะส่วนใหญ่แล้วเป็นสารที่นำกระแสไฟฟ้าต่ำหรืออาจไม่นำกระแสไฟฟ้าก็ได้จึงส่งผลเสียต่อค่าการนำกระแสไฟฟ้าของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าหลังจากการเคลือบ เหตุผลอีกประการหนึ่งคือทั้งสองวิธีนี้สามารถควบคุมความหนาของชั้นตัวเคลือบได้ยากหรือไม่สามารถควบคุมได้เลยทำให้ชิ้นงานที่ได้ด้วยวิธีการทั้งสองมีความหนาของชั้นเคลือบค่อนข้างมากทำให้ส่งผลต่อค่าสภาพต้านทานการนำไฟฟ้าและเหตุผลอีกประการหนึ่งก็คือพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้ค่อนข้างมีผิวที่ขรุขระทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (contact resistance) สูงขึ้น ที่สำคัญที่สุดคือทั้งสองวิธีนี้เป็นการเกาะติดอยู่กับตัวแผ่นโลหะแบบหลวมๆ ทำให้สามารถหลุดออกได้ง่ายส่งผลให้เสถียรภาพทางเคมีต่ำทำให้ความสามารถทนต่อการกัดกร่อนต่ำด้วย จากเหตุผลหลายประการที่กล่าวมานั้นทำให้ทั้งสองวิธีนี้ไม่ได้รับความนิยมและเลิกใช้ไปในที่สุด [2, 3]

การเคลือบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (electrochemical deposition) เป็นอีกวิธีการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพราะวิธีนี้เป็นการเคลือบที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้และเป็นวิธีที่ค่อนข้างไม่ซับซ้อนยุ่งยาก แต่วิธีการเคลือบด้วยเคมีไฟฟ้ายังมีข้อเสีย คือ ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างมีความสามารถในการยึดเกาะกับสารรองรับต่ำเมื่อเทียบกับการเคลือบโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จึงทำให้ส่งผลต่อค่าสภาพต้านเชิงสัมผัสและการต้านทานการกัดกร่อน และเหตุผลอีกประการหนึ่งคือพื้นผิวที่ได้จะเกิดรอยแยกของชั้นเคลือบส่งผลให้สามารถถูกกัดกร่อนได้ง่าย [4]

การเคลือบด้วยวิธี Physical Vapor Deposition (PVD) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากโดยอาศัยหลักการทำให้สารตัวเคลือบระเหยกกลายเป็นไอด้วยความร้อนและความดันต่ำ หรือระบบสุญญากาศ (vacuum) แล้วสารที่ระเหยจะไปเกาะเป็นฟิล์มที่ผิวของสารรองรับที่ต้องการเคลือบทำให้ฟิล์มสามารถยึดเกาะได้ดีกว่าวิธีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ การกระจายความหนาของฟิล์มที่ได้สม่ำเสมอ และพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ แต่วิธีนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงในกระบวนการ

ให้ความร้อนแก่สารที่ต้องการทำให้ระเหย และเป็นระบบที่ต้องการความดันต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธี แมกนีตรอนสปัตเตอริง [5]

ส่วนการเคลือบด้วยวิธีการ Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition (plasma CVD) [6] เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นวิธีที่เคลือบฟิล์มที่สามารถยึดเกาะได้ดี สามารถควบคุมความหนาได้ การกระจายความหนาของฟิล์มที่ได้สม่ำเสมอ และพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ แต่วิธีการเคลือบนี้ยังมีข้อเสียคือเกิดรอยแยกที่บริเวณผิวของชิ้นงานหลังจากทำการเคลือบฟิล์ม

2.4 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) [16]

เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน และเติมธาตุอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติ มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 1.2 มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลักไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10.5 ซึ่งทำให้เกิดการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide film : CrO_2 ที่เรียกว่า passive film) ไม่สามารถมองเห็นได้ และเกาะติดแน่น อยู่ผิวหน้าของเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพทั่วไปได้ดีกว่าเหล็กธรรมดาหลายเท่าทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นอย่างดีปกป้องการเกิด corrosion และไม่ซำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป ในอุตสาหกรรมเรียกโลหะนี้ว่า corrosion resistant steel ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็นสแตนเลสเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึงธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม คือโครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่ายมักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม ได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เหล็กกล้าไร้สนิม ปกติจะไม่ใช่สนิมเพราะที่ผิวจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์ บางๆ เคลือบผิวอยู่อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ในเหล็กกล้าไร้สนิมกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งการทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ที่เคลือบผิวออกไป ในภาวะที่เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถเกิดสนิมได้ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้นซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้

2.4.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม [16]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) สามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. **เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade)** ที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียม (Cr) ประมาณร้อยละ 12 หรือ 17 (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) มีนิเกิลเล็กน้อยมาก (ติดมากับวัตถุดิบ) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ปานกลาง มีค่าความยืด (Elongation) สูง เช่น เกรด 430, 409 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม การใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสีย และในบางเกรดจะผสมโครเมียมสูงเพื่อใช้กับงานที่ต้องทนอุณหภูมิสูง

2. **เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)** ที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณร้อยละ 17 (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) และนิเกิล (Ni) ประมาณร้อยละ 9 (ช่วงของส่วนผสมของ Ni +/-1%) การผสมนิเกิลทำให้เหล็กกลุ่มนี้ต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติกโดยนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอม เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกนี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติก ในด้านสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ใกล้เคียงกับของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติด (ในสภาพผ่านการอบอ่อน) เช่น เกรด 304, 316L, 321, 301 เป็นต้น

3. **เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade)** ผสมโครเมียมประมาณร้อยละ 11.5-18 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนพอสมควรและสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 เป็นต้น

4. **เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex grade)** จะมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ มีโครเมียมผสมประมาณ ร้อยละ 21-28 และนิเกิลประมาณร้อยละ 3-7.5 เหล็กกล้า

ไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง เช่น เกรด 2304, 2205, 2507 เป็นต้น

5. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening grade) มีโครเมียมผสมประมาณร้อยละ 15-18 และนิกเกิลอยู่ประมาณร้อยละ 3-8 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปีม หัววาล์ว ตัวอย่างเช่น PH13-9Mo, AM-350 เป็นต้น

2.4.2 ธาตุและการให้สมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม [16]

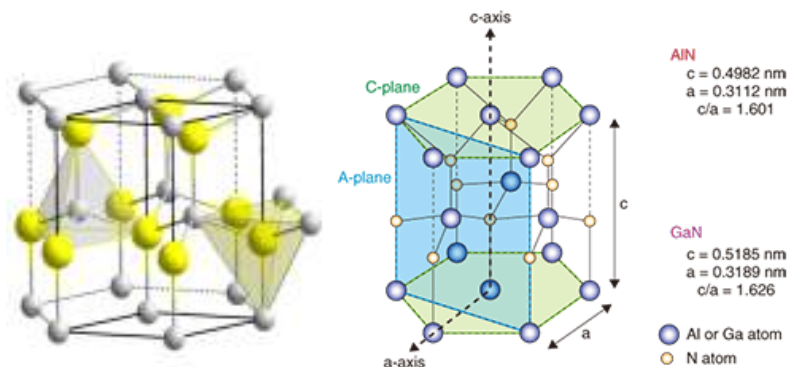
- **คาร์บอน (Carbon)** เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะไม่เกินร้อยละ 0.15 (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติค) เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคาร์บอนต่ำจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 0.02 - 0.03 และร้อยละ 0.04 - 0.15 นอกจากนี้การผสมไทเทเนียมหรือนิโอบียมไปในเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยให้จับตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อมเหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอนร้อยละ 0.02 เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีในเกรดมีอักษร "L" กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่ให้เกิดร้อยละ 0.03 ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Inter granular corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า
- **โครเมียม (Chromium)** ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไปโดยผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อยร้อยละ 10.5 แต่เพื่อให้มั่นใจว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมมีการกระจายของโครเมียมอย่างน้อยร้อยละ 10.5 อย่างสม่ำเสมอจึงมักผสมโครเมียมมากกว่าเล็กน้อย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโครเมียมอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 12 (10.5-14.0) และร้อยละ 17 (16.0-24.0) ถ้าผสมโครเมียมเกินกว่าร้อยละ 30 จะทำให้เหล็กเปราะ
- **นิกเกิล (Nickel)** ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในรูพรุนหรือในหลุม (pitting corrosion) ในสารละลายกรด เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมนิกเกิลอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 0 (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และร้อยละ 9 (6.0-15.0)
- **โมลิบดีนัม (Molybdenum)** ช่วยเสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียมโดยเฉพาะการกัดกร่อนในรูพรุนหรือในหลุม (pitting corrosion) และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนใน

คลอไรด์ด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 0 (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และร้อยละ 2 (1.0-3.0)

- **ไทเทเนียม (Ti) หรือไนโอเบียม (Nb)** ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Inter granular corrosion) โดยธาตุทั้งสองตัวจะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ไทเทเนียมหรือไนโอเบียมยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นและความสามารถในการเชื่อมอีกด้วย

2.5 พิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ [17]

อะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารประกอบโควาเลนต์ที่มีเฟสที่รู้จักกันคือ Wurtzite (hexagonal) แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานแบบตรง (direct energy band gap semiconductors) ประมาณ 6.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารที่อยู่ในกลุ่มสารกึ่งตัวนำด้วยกัน เป็นสารที่มีความเหนียวแน่นสูงจนสามารถกล่าวได้ว่าไม่มีรูพรุนก็ว่าได้ ด้วยเหตุนี้อะลูมิเนียมไนไตรด์จึงสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงที่ความดันบรรยากาศได้เป็นอย่างดี สารประกอบออกไซด์ที่บริเวณผิวจะสามารถเกิดได้ตั้งแต่ช่วงของอุณหภูมิ 700-1,370 องศาเซลเซียส และสามารถทนต่อการเกิดสารประกอบออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 980 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2,800 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมีสูงสามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดได้เป็นอย่างดี เนื่องสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารที่มีความขรุขระ (roughness) ที่บริเวณผิวต่ำและมีความเป็นรูพรุน (porosity) ต่ำทำให้อะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมีสูง สมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบ Wurtzite (hexagonal) [17]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ Wurtzite (hexagonal) [18]

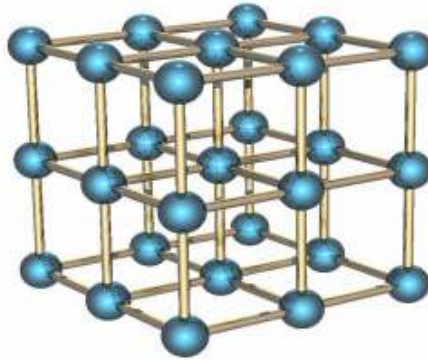
เชิงกล	หน่วย	ระบบ SI/Metric
ความหนาแน่น	gm/cc	3.26
รูปทรง	(%)	0
ความทนต่อการโค้งงอ	MPa	320
ความยืดหยุ่น	GPa	330
ความทนต่อการอัด	MPa	2100
ความแข็ง	kg/mm ²	1100
เชิงความร้อน		
การนำความร้อน	W/m•°K	140–180
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน	10 ⁻⁶ /°C	4.5
ความจุความร้อน	J/kg•°K	740
เชิงไฟฟ้า		
ความเป็นฉนวน	ac-kv/mm	17
ความต้านทานเชิงปริมาตร	ohm•cm ³	>10 ¹⁴

2.5.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ [17]

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีโครงสร้างที่รู้จักกันดีคือเฟส Wurtzite มีโครงสร้างแบบ hexagonal ซึ่งมีค่าคงที่ของผลึก $a = 0.3112 \text{ \AA}$, $c = 0.4982 \text{ \AA}$ และ $c/a = 1.6$ ดังรูปที่ 2.3 แสดงภาพของโครงสร้างผลึกของฟิล์มอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างแบบ hexagonal ที่สมบูรณ์ [17]

โดยทั่วไปแล้วความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ขึ้นกับเทคนิคการสputtering ที่ทำให้ได้ฟิล์มที่ไม่เป็นสารกึ่งตัวนำแบบแท้จริง โดยอะตอมของไนโตรเจนจะมีการเข้าแทนที่ตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียมในฟิล์มบางทำให้ฟิล์มบางโครงสร้างผลึกสองเฟสรวมกันอยู่ซึ่งได้แก่ เฟส Cubic ของฟิล์มบางอะลูมิเนียม และเฟส Wurtzite ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ฟิล์มบางมีของผสมอยู่ด้วยกันสองชนิดคือ เซรามิกกับโลหะ ซึ่งเรียกรวมแบบนี้

ว่า cermet ดังนั้นฟิล์มบางจึงมีสมบัติแบบไม่เป็นสารกึ่งตัวนำแบบแท้จริง ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ในเฟส (Wurtzite) จะมีความเข้มสูงเมื่อปริมาณของอะตอมไนโตรเจนในฟิล์มบางเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของเฟส Cubic ของฟิล์มบางอะลูมิเนียม



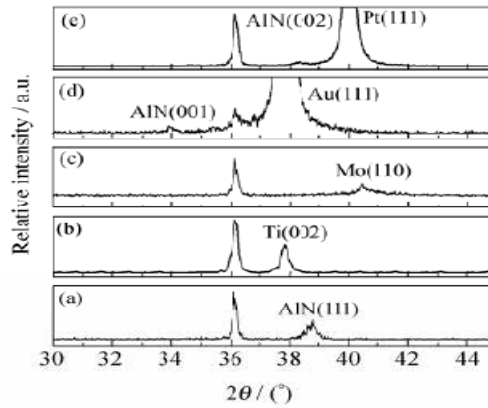
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของเฟส Cubic ของฟิล์มบางอะลูมิเนียม [17]

2.6 อิทธิพลของตัวแปรในการสเป็คเตอริง

2.6.1 ผลของโครงสร้างสารรองรับต่อโครงสร้างฟิล์ม [19]

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิครีเอกทิฟ ดีซี-แมกนีตรอน สเป็คเตอริง เทคนิคสเป็คเตอริงนี้มีหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ตัวอย่างเช่น ชนิดสารรองรับ (substrate) ที่ใช้ในงานวิจัย จะสามารถส่งผลต่อการจัดเรียงโมเลกุลหรือการจัดเรียงอะตอมของฟิล์มบางบนสารรองรับได้ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า Orientation ระหว่างฟิล์มกับสารรองรับ (substrate) ดังที่ Xiong และคณะ [19] ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า สารรองรับ (substrate) ชนิดต่างๆ เมื่อเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะมีรูปแบบโครงสร้างของฟิล์มบางคือ $\text{AlN}(002)$ เป็นรูปแบบโครงสร้างผลึกหลักสำหรับทุกๆ สารรองรับ (substrate) ซึ่งจะเห็นจากรูปที่ 2.5 (a) สารรองรับ (substrate) คืออะลูมิเนียม (Al) จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึก $\text{AlN}(111)$ เป็นรูปแบบโครงสร้างผลึกรอง และรูปที่ 2.5 (d) สารรองรับ (substrate) คือ ทองคำ/ไทเทเนียม (Au/Ti) จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึก $\text{AlN}(001)$ เป็นรูปแบบโครงสร้างผลึกรอง ส่วนรูปที่ 2.5 (b), (c) และ (e) มีสารรองรับเป็นไทเทเนียม (Ti), โมลิบดีนัม (Mo) และแพลทินัม/ไทเทเนียม (Pt/Ti) ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าไม่มีรูปแบบโครงสร้างผลึกอื่นนอกจากรูปแบบโครงสร้างผลึกหลัก $\text{AlN}(002)$ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สามารถ

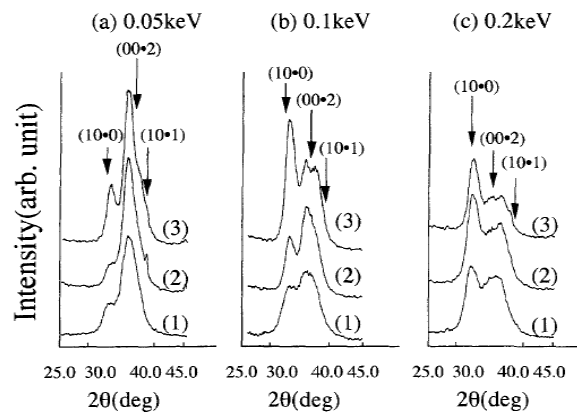
สรุปได้ว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนสารรองรับที่ต่างกันจะทำให้โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่แตกต่างกันจะสังเกตได้จากการเลื่อนตำแหน่ง (shift) ยอดสูงของอะลูมิเนียมไนไตรด์



รูปที่ 2.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบบนสารรองรับชนิดต่างๆ (a) Al; (b) Ti; (c) Mo; (d) Au/Ti; (e) Pt/Ti. [19]

2.6.2 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อโครงสร้างฟิล์มบาง [20]

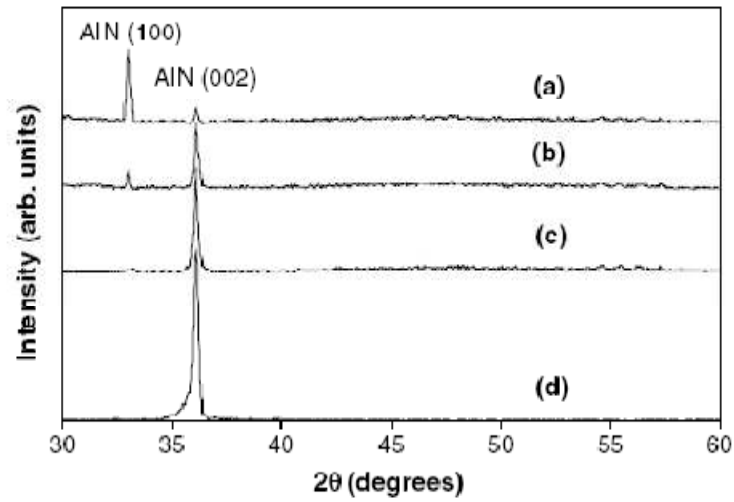
กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไม่เพียงทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ด้วย เนื่องจากอัตราการเคลือบไม่เท่ากันทำให้เวลาที่ใช้ในการจัดเรียงโมเลกุลของสารเคลือบไม่เท่ากันด้วย การเคลือบที่อัตราการเคลือบต่ำมีการจัดเรียงโมเลกุลได้ดีกว่าอัตราการเคลือบสูง สอดคล้องกับรายงานของ Nakamura และคณะ [20] ได้เสนอผลของการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์โดยเทคนิครีเอกทีฟ แมกนิตรอน สเปคเตอริงโดยใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ในการเคลือบฟิล์ม จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามรูปที่ 2.6 พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยใช้กำลังไฟฟ้า 0.05 keV ดังรูปที่ 2.6 (a) จะปรากฏโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ AlN(002) ชัดเจนที่สุด เมื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าขึ้นเป็น 0.1 keV และ 0.2 keV ดังรูปที่ 2.6(b) และรูปที่ 2.6(c) ตามลำดับ จะปรากฏโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ AlN(100) ชัดเจนที่สุด ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์มบาง



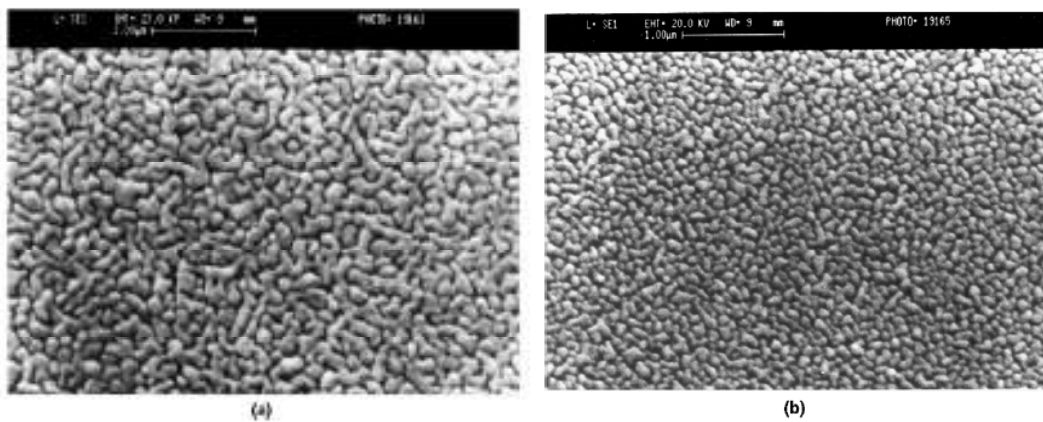
รูปที่ 2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ (1) room temperature, (2) 473 K and (3) 573 K [20]

2.6.3 ผลของความดันแก๊สย่อยต่อโครงสร้างฟิล์มบาง [21]

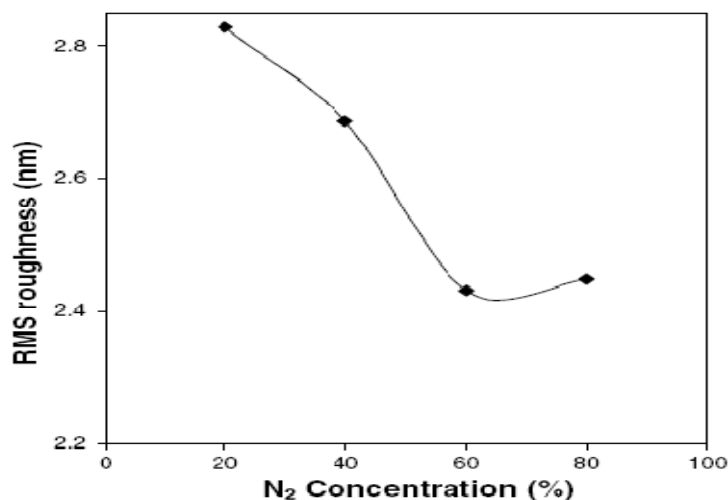
ฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ถูกเตรียมภายใต้ความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจนปริมาณต่างๆ ซึ่งความดันมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม จากรายงานของ Kar และคณะ [21] ดังรูปที่ 2.7 ที่แสดงถึงการเปลี่ยนโครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ตามการเปลี่ยนปริมาณความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจนค่าต่างกัน จากผลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ปรากฏว่าที่ความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจนปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 20 ดังรูปที่ 2.7(a) จะปรากฏโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ AIN(100) ชัดเจนที่สุด เมื่อเพิ่มค่าความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจนขึ้นเป็นความเข้มข้นร้อยละ 40, 60 และ 80 ดังรูปที่ 2.7 (b), รูปที่ 2.7 (c) และรูปที่ 2.7 (d) ตามลำดับ จะปรากฏโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ AIN(002) ชัดเจนที่สุด นอกจากค่าความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจนจะส่งผลต่อโครงสร้างฟิล์มบางแล้วยังสามารถส่งผลต่อขนาด grain size และความขรุขระ (roughness) ของผิวฟิล์มบางอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าขนาด grain size มีขนาดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของค่าความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจน และรูปที่ 2.9 จะสังเกตเห็นว่าความขรุขระ(roughness) ของผิวฟิล์มบางจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความดันแก๊สย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนปริมาณร้อยละต่างๆ (a) 20, (b) 40, (c) 60 และ (d) 80 [21]



รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายโดยเทคนิค SEM แสดงขนาดของ grain size ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนปริมาณร้อยละต่างๆ (a) 20 และ (b) 80 [21]



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายโดยเทคนิค SEM แสดงแนวโน้มความขรุขระของผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนปริมาณร้อยละต่างๆ [21]

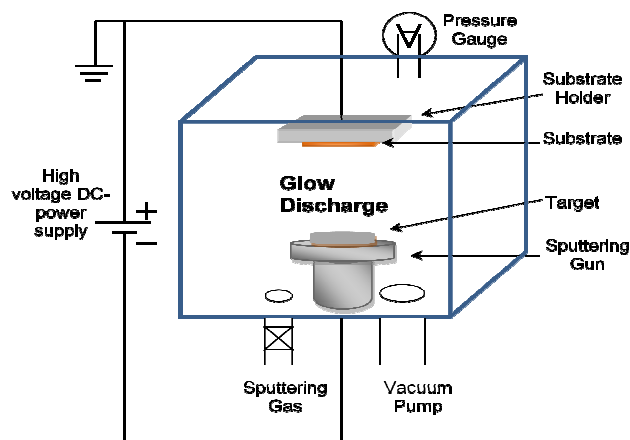
2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับสเปคเตอริง

กระบวนการสเปคเตอริง (Sputtering) เป็นวิธีหนึ่งที่ดีที่สุดสำหรับการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ เนื่องจากกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการปลูกฟิล์มบนแผ่นรองรับที่มีพื้นที่กว้างๆ และมีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูงด้วย สเปคเตอริงเป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมจากวัตถุที่เป็นขั้วแคโทดหลุดออกและไปเกาะที่แผ่นรองรับที่ขั้วแอโนด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไอออนบวก (โดยทั่วไปจะใช้ไอออนบวกของอาร์กอน Ar^+) ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและชนที่ผิวของแคโทด ซึ่งคือเป้าในการสเปคเตอริงนั่นเอง เมื่อไอออนพุ่งชนกับเป้าจะมีการส่งผ่านโมเมนตัมไปที่อะตอมของเป้า ทำให้อะตอมที่ผิวของเป้าหลุดออกมา เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่าสเปคเตอริง หลังจากกระบวนการนี้เกิดขึ้นแล้วอะตอมที่หลุดออกมาจะเดินทางจากผิวหน้าของเป้าจนมาถึงแผ่นรองรับที่เป็นขั้วแอโนด อะตอมเหล่านี้จะเกาะและจัดเรียงตัวที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ เมื่อกระบวนการนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ อะตอมก็จะทับถมและจัดเรียงกันเป็นชั้นของฟิล์มที่หนาขึ้นต่อไป

2.7.1 กระบวนการพลาสมาโกลวดิสชาร์จ [22]

ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จ ประกอบด้วยระบบแบบง่ายๆ คือ มีขั้วแคโทด (Cathode) และแอโนด (Anode) วางขนานกันในภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) ที่บรรจุแก๊สความดันต่ำ เช่น อาร์กอน (Ar) นีออน (Ne) ซีซอน (Xe) คริปทอน (Kr) หรือเป็นแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน เป็นต้น เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง (High voltage DC power supply)

โดยที่ขั้วแคโทดต่อเข้ากับขั้วลบและแอโนดต่อกับขั้วบวก ดังรูปที่ 2.10 เมื่อป้อนความต่างศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะได้สนามไฟฟ้าขนาด V/D ซึ่ง V คือ ความต่างศักย์ และ D คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยๆ ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จำนวนหนึ่งหลุดจากผิวขั้วแคโทดด้วยการกระตุ้นของรังสีตามธรรมชาติ เช่น รังสีคอสมิก รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น จากนั้นจะถูกเร่งไปยังแอโนดโดยสนามไฟฟ้าในภาวะความต่างศักย์ และความดันที่เหมาะสม อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการสะสมพลังงานจนเพื่อที่จะไปไอออไนซ์อะตอมของแก๊สตัวอื่นให้แตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมนี้จะเป็นความต่างศักย์ที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์อย่างน้อยเท่ากับพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมแก๊ส ความดันที่เหมาะสมคือความดันที่ไม่ต่ำและสูงเกินไป เนื่องจากความดันมีผลต่อระยะอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของอิเล็กตรอน ถ้าความดันต่ำเกินไประยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนจะมากกว่าระยะระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด ทำให้ไม่มีการชนกับอะตอมแก๊สอื่น ก็จะไม่เกิดการไอออไนซ์และถ้าความดันสูงเกินไประยะอิสระเฉลี่ยก็จะน้อยทำให้ไม่สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์พอที่จะไปไอออไนซ์อะตอมของแก๊สอื่นได้เช่นกัน

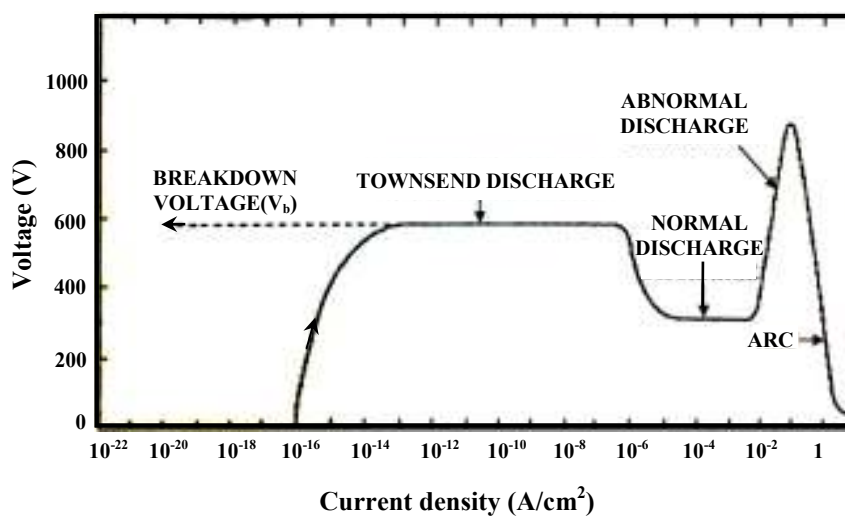


รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมของระบบดีซี สเปตเตอริง

โกลวดิสชาร์จเป็นปรากฏการณ์การรักษาสภาพที่อะตอมหรือโมเลกุลถูกไอออไนซ์โดยอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากภายนอกระบบ กระบวนการพลาสมาโกลวดิสชาร์จสามารถเกิดได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแก่ขั้วทั้งสองคือ แคโทด และแอโนดที่อยู่ในภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) การสเปตเตอริงเป็นตัวอย่างที่ง่ายที่สุดเพื่อที่จะเข้าใจการเกิด ดีซี โกลวดิสชาร์จ โดยภาพร่างตัวอย่างของการสเปตเตอริงอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2.10 เป้าสำหรับระบบสเปตเตอริงมีลักษณะเป็นแผ่นและต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่ด้านบนของหัวแคโทด ไฟฟ้า

ศักย์สูงจะจ่ายมายังหัวแคโทดนี้ (3-5 โวลต์) ซึ่งแผ่นรองรับจะวางอยู่ด้านหน้าขนานกับเป้าและต่อกับกราวด์ เรียกแผ่นรองรับนี้ว่าแอโนด ขั้วทั้งสองจะถูกวางขนานกันอยู่ในภาชนะสุญญากาศ หลังจากดูดแก๊สออกจากภาชนะสุญญากาศจนความดันภายในภาชนะเป็นสุญญากาศ จึงใส่แก๊สอาร์กอนเพื่อเป็นตัวกลางในการเริ่มและการรักษาสภาพการไหลวติสซาร์จ

เมื่ออะตอมของแก๊สถูกชนโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ไอออนบวกจะถูกเร่งไปยังขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังแอโนด ทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิและทุติยภูมิจะมีการสะสมพลังงานต่อไปเพื่อที่จะไปไอออนในช่องอะตอมแก๊สตัวอื่นในระหว่างถูกเร่งไปที่ขั้วแอโนดอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันไอออนบวกจะถูกเร่งไปที่ขั้วแคโทด ถ้ามีพลังงานมากพอการชนผิวขั้วแคโทดของไอออนบวกจะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากผิวขั้วแคโทด และถูกเร่งต่อไปยังขั้วแอโนด กระบวนการเช่นนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบแบบทวีคูณ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่ความต่างศักย์คงที่ เรียกว่า ภาวะการพังทลาย (Breakdown) และเรียกความต่างศักย์ขณะนี้ว่า ความต่างศักย์พังทลาย (Breakdown voltage) เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดพังทลายแล้ว ถ้ายังมีกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอย่างเพียงพอ กระบวนการมีการเพิ่มของกระแสขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงจุดที่ไอออนบวกและลบสามารถควบคุมตนเองได้ โดยที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดที่ผิวแคโทดสามารถทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิในปริมาณเท่าเดิม ระบบก็จะเข้าสู่ภาวะการรักษาสภาพวติสซาร์จได้เองโดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิอีกต่อไป



รูปที่ 2.11 แรงดันไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสของดีซี โกลวดิสซาร์จ [22]

เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วแคโทด จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง เริ่มแรกในระบบจะมีกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยมาก เนื่องจากมีอิเล็กตรอนในปริมาณน้อยที่หลุดจากแคโทดจากการถูกกระตุ้นของรังสีคอสมิกที่มีอยู่ในบรรยากาศทั่วไป อิเล็กตรอนเหล่านี้คืออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าพลังงานจะถูกถ่ายทอดไปยังอิเล็กตรอน ซึ่งกระบวนการเพิ่มจำนวนของพาหะเกิดจากการชนของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้ากับแคโทดซึ่งทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) และไอออนบวก ประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วยังคงที่ โดยถูกจำกัดด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ให้ค่าคงที่ ความต่างศักย์ในภาวะนี้เรียกว่าความต่างศักย์พังทลาย (breakdown voltage, V_b) และภาวะตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดพังทลายนี้เรียกว่า Townsend discharge ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11 เมื่ออิเล็กตรอนทุติยภูมิหลุดจากผิวแคโทดสามารถเพิ่มปริมาณไอออนบวกมากพอสำหรับการผลิตอิเล็กตรอนในจำนวนเท่าเดิม ระบบจะสามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จได้เอง (self-sustaining) โดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เกิดจากการกระตุ้นของรังสีในธรรมชาติต่อไป แก๊สจะเริ่มเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสภาพการโกลวดิสชาร์จ ซึ่งจะเห็นการเรืองแสงภายในบริเวณการโกลวได้ชัดเจนและความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองจะลดลง สถานะนี้เรียกว่าย่าน normal discharge เมื่อเพิ่มกำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิเกิดการชนกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวแคโทดกระทั่งความหนาแน่นกระแสเท่ากันทั่วทั้งผิวของแคโทด สังเกตได้จากการโกลวที่ผิวแคโทดสม่ำเสมอ ผลจากการเพิ่มกำลังนี้ทำให้กระแสและความต่างศักย์เพิ่มขึ้นย่านนี้เรียกว่า abnormal discharge ซึ่งเป็นสถานะหลักสำหรับกระบวนการสปัตเตอริงเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสดิสชาร์จสูงและสามารถควบคุมได้ โดยการควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า

2.7.2 กระบวนการชนภายในโกลวดิสชาร์จ [22]

การชนระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวกหรือนิวตรอนในพลาสมามีผลต่อสมบัติของโกลวดิสชาร์จโดยการชนมีสองลักษณะคือ การชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับการชนมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในหรือไม่การชนแบบยืดหยุ่นมีการแลกเปลี่ยน เฉพาะพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาคเท่านั้น โดยแบบจำลองการชนของลูกบิลเลียดสามารถอธิบายแทนการชนแบบยืดหยุ่นนี้เนื่องจากการชนที่มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะพลังงานจลน์เท่านั้น การชนนี้อธิบายได้ด้วยกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่

แบบจำลองของลูกบิลเลียดแสดงได้ว่าการชนระหว่างอนุภาคมวล M_1 กับอนุภาคมวล M_2 ดังรูปที่ 2.12 พลังงานจลน์ส่งผ่านจากอนุภาคมวล M_1 ไปยังมวล M_2 เป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{4M_i M_t}{(M_i + M_t)^2} \cos^2 \theta, \quad (2.1)$$

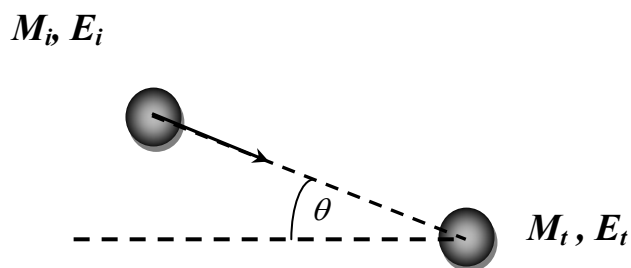
โดย $M_{i,t}$ แทนอนุภาคที่มีมวล i และ t และมีพลังงาน $E_{i,t}$ โดยให้ M_t เป็นมวลของอนุภาคที่ถูกชนจากเริ่มต้นอยู่นิ่ง และ M_i เป็นอนุภาคที่เข้าชนด้วยความเร็วทำมุม θ กับแนวที่ต่อจุดศูนย์กลางมวลทั้งสองขณะชน โดยที่อัตราส่วน $4M_i M_t / (M_i + M_t)^2$ เรียกว่าฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน (energy transfer function) เมื่อพิจารณาการชนที่ M_t มากกว่า M_i จะมีการส่งผ่านพลังงานจลน์บางส่วนในการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สที่หนักกว่า

เมื่อพิจารณาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชนมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะเพิ่มขึ้น (ΔU) ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นนี้ต้องเพิ่มเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอนุภาคในสมการการอนุรักษ์พลังงานด้วย พลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชน M_i ส่งผ่านไปเป็นพลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชน M_t ซึ่งมีค่าสูงสุดตามสมการที่ 2.2 [22]

$$\frac{\Delta U}{(1/2)M_i v_i^2} = \frac{M_t}{(M_i + M_t)} \cos^2 \theta, \quad (2.2)$$

โดย v_i คืออัตราเร็วของอนุภาค M_i สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนและโมเลกุลของแก๊สในกรณีที่ $\cos \theta = 1$ พลังงานจลน์ทั้งหมดสามารถส่งผ่านไปที่อนุภาคที่หนักกว่า โดยธรรมชาติของโกลวดิสซาร์จประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ไอออนต่างๆ อะตอมและโมเลกุลที่เป็นกลาง

กระบวนการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคอื่นๆ ในโกลวดิสซาร์จเป็นกระบวนการสำคัญที่เป็นตัวกำหนดลักษณะของโกลวดิสซาร์จ โดยที่กระบวนการสำคัญจะได้แสดงต่อไปนี้ [22]



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการชนระหว่างอนุภาคสองตัว [22]

กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization process) เป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่ผลิตคู่อิเล็กตรอน-ไอออนบวกในโพลวิดิสชาร์จ ซึ่งสำคัญต่อกระบวนการรักษาสภาพโพลวิดิสชาร์จ ที่มีปฏิกิริยาทั่วไปคือ



เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิชนกับอะตอมของแก๊สอาร์กอน ทำให้พลังงานจลน์ส่งผ่านไปยังอะตอมของแก๊สอาร์กอน ทำให้อะตอมถูกไอออไนซ์กลายเป็นไอออนบวกและมีอิเล็กตรอนเพิ่มเป็นสองตัว จากนั้นอิเล็กตรอนสองตัวนี้สามารถทำให้เกิดกระบวนการไอออไนซ์มากขึ้น จนทำให้มีประจุมากพอที่โพลวิดิสชาร์จจะรักษาสภาพให้อยู่ได้

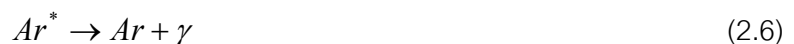
กระบวนการรวมตัว (Recombination process) เป็นกระบวนการย้อนกลับของกระบวนการ ไอออไนซ์เซชัน โดยอิเล็กตรอนเกิดการรวมตัวกับไอออนบวกจนได้อะตอมที่เป็นกลางที่อยู่ในสถานะกระตุ้นดังสมการ



กระบวนการกระตุ้น (Excitation) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่คล้ายกับกระบวนการไอออไนเซชัน แต่กรณีนี้พลังงานไม่สูงพอที่จะไอออไนซ์อะตอมของแก๊สได้ แต่เพียงทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมกระโดดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นไปหรืออยู่ในสถานะกระตุ้นตามสมการ



กระบวนการผ่อนคลาย (Relaxation process) กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการรวมตัว และกระบวนการกระตุ้น คือกระบวนการผ่อนคลายนี้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นพยายามกลับลงมาสู่ระดับพลังงานเดิม ซึ่งระดับพลังงานทั้งสองสถานะมีความแตกต่างกัน อิเล็กตรอนจึงมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ตามสมการที่ 2.6

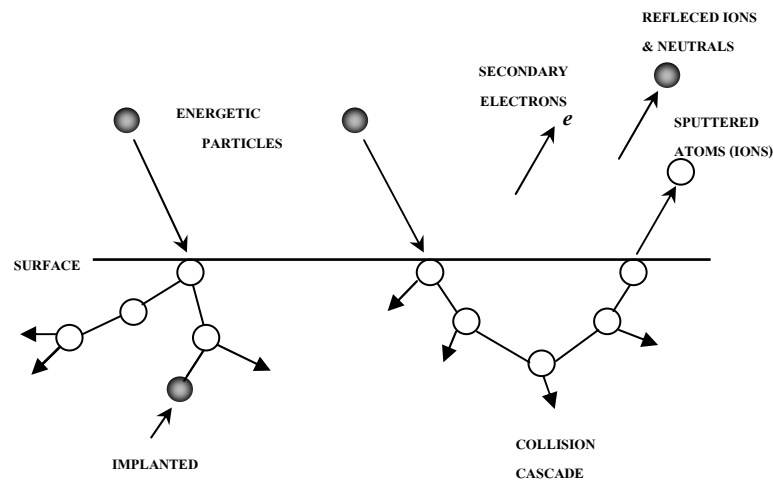


กระบวนการนี้ทำให้เห็นการเรืองแสงของโพลวิดิสชาร์จ โดยความถี่ของแสงขึ้นกับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะถูกกระตุ้นกับพลังงานของสถานะสุดท้ายของอิเล็กตรอน และขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส กระบวนการทั้งสี่อย่างข้างต้นนั้น สามารถนำไปอธิบายลักษณะโดยรวมของดีซีโพลวิดิสชาร์จได้ นอกจากนี้ยังมีอันตรกิริยาแบบอื่นๆ อีกในโพลวิดิสชาร์จซึ่งจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้

2.7.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกกับพื้นผิว

ในการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการสเป็คเตอริง จะต้องทำความเข้าใจสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนกับผิวของเป้าสารเคลือบ ปฏิกิริยากรรมและผลต่างๆ บางส่วนที่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานจลน์เข้าชนกับผิวของเป้าโดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 แต่ละปฏิกิริยาจะขึ้นกับชนิดของไอออน มวล ประจุ และธรรมชาติของอะตอมของผิวเป้าสารเคลือบ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้ [22]

- ไอออนที่เข้าชนกับเป้า ถูกสะท้อนกลับ และมีโอกาสถูกทำให้เป็นกลางขณะชน
- ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron)
- ไอออนที่เข้าชนอาจฝังตัวที่พื้นผิวของเป้า ปฏิกิริยากรรมนี้เรียกว่าปฏิกิริยากรรมฝังไอออน (Ion implantation) ซึ่งมีการประยุกต์นำไปใช้ในเทคโนโลยีเคลือบแข็ง
- ทำให้โครงสร้างที่ผิวของเป้าเกิดการเปลี่ยนแปลง สามารถเกิดได้หลายแบบ เช่น การเกิดที่ว่างในโครงสร้าง การเลื่อนตำแหน่งของอะตอม รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนองค์ประกอบ
- ทำให้เกิดการชนต่อเนื่อง (Collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าจนสุดท้าย ทำให้อะตอมที่ผิวถูกชนจนหลุดออกมา ปฏิกิริยากรรมนี้คือปฏิกิริยากรรมสเป็คเตอริง



รูปที่ 2.13 ผลที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคพุ่งเข้าชนที่พื้นผิวของเป้า [22]

2.7.4 ดีซี สปีดเตอริง

ดีซี สปีดเตอริงมีส่วนประกอบเบื้องต้นคือ แคโทด และแอโนดที่วางขนานกันในภาชนะสุญญากาศที่บรรจุแก๊สเฉื่อย เช่น Ar, Ne, Xe และ Kr เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูงดังแสดงในรูปที่ 2.10

เมื่อให้ไฟฟ้าศักย์สูงแก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขนาด V/d ขึ้น โดย V คือค่าศักย์ไฟฟ้า และ d คือระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่อมีอิเล็กตรอนปฐมภูมิบางส่วนหลุดจากพื้นผิวของเป้า เนื่องจากถูกกระตุ่นจากรังสีคอสมิกและรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่มีในบรรยากาศ จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้ามายังแอโนด ด้วยความดันและแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสะสมพลังงานจลน์เพื่อไอออไนซ์อะตอมของแก๊สที่บรรจุอยู่ภายในระบบ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์พอที่จะไอออไนซ์อะตอมของแก๊ส ความดันมีผลต่อระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของอิเล็กตรอน ถ้าความดันน้อยเกินไปจะมีผลทำให้มีระยะทางอิสระเฉลี่ยสูง อิเล็กตรอนจะไม่เกิดการชนกับอะตอมของแก๊สในระบบ แต่ถ้าความดันสูงจะทำให้ระยะทางอิสระเฉลี่ยน้อย นั่นคืออิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์น้อยจนไม่เกิดการไอออไนซ์

2.7.5 แมกนิตรอน สปีดเตอริง

ในระบบสปีดเตอริง การเพิ่มแม่เหล็กในระบบสามารถช่วยให้เกิดการไอออไนซ์สปีดเตอริงแก๊สมากขึ้น และอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็เกิดเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าจะควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน พลาสมาโกลวดิสชาร์จเพิ่มขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มวิถีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นอัตราการเคลือบฟิล์มจึงเพิ่มขึ้นจากความหนาแน่นของพลาสมาเพิ่มขึ้น

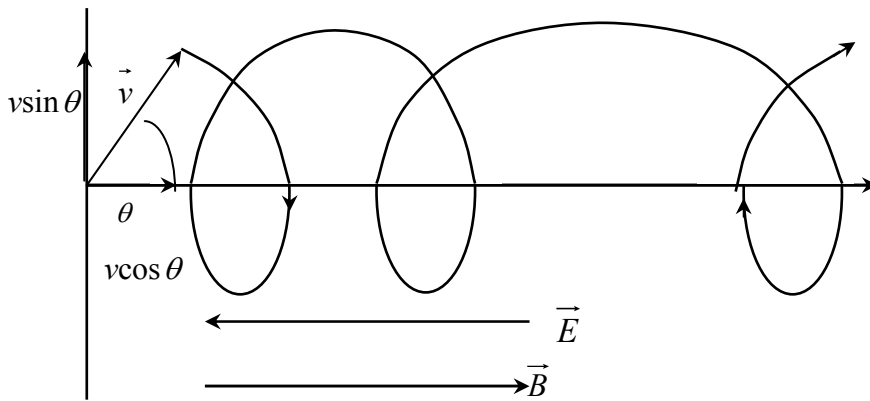
2.7.5.1 สนามแม่เหล็กในทิศขนานกับสนามไฟฟ้า[22]

พิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเสริมสนามแม่เหล็ก \vec{B} และสนามไฟฟ้า \vec{E} ระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นรองรับ อิเล็กตรอนภายในทั้งสองสนามจะประพฤติตัวตามแรงลอเรนซ์ (Lorentz force)

$$\vec{F} = \frac{m d\vec{v}}{dt} = -q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (2.7)$$

เมื่อ q คือประจุของอิเล็กตรอน m คือมวลของอิเล็กตรอน และ \vec{v} คือความเร็วของอิเล็กตรอน ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า \vec{E} เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้หลุดจากเป้าขนานกับสนามแม่เหล็ก

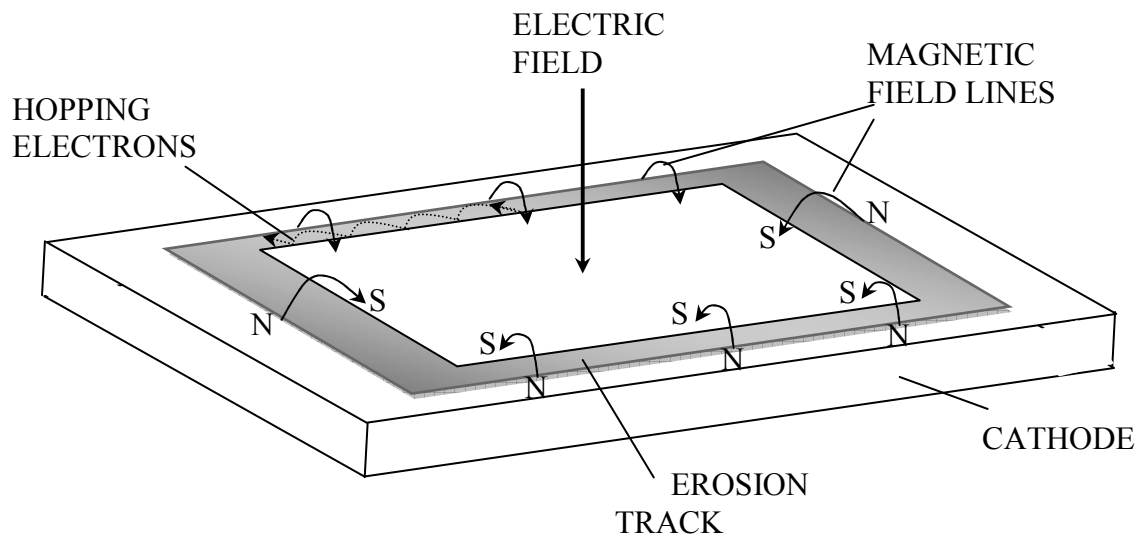
และสนามไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนหลุดจากแคโทดด้วยความเร็ว \vec{v} ทำมุม θ กับ \vec{B} และ \vec{E} มีแรง $qvB\sin\theta$ ในทิศตั้งฉากกับทิศ \vec{B} อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวด้วยรัศมี $r = mv\sin\theta / qB$ ส่วนโค้งของเกลียวจะกว้างขึ้นตามเวลาเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนาม \vec{E} ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.14 สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนมีเวลาอยู่ในพลาสมา (plasma) นานขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะชนกับไอออนจึงมีมากขึ้นด้วย ทำให้กระบวนการดิสชาร์จและทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 ผลของทิศสนามแม่เหล็ก \vec{B} ขนานกับทิศสนามไฟฟ้า \vec{E} ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน [22]

2.7.5.2 สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า [22]

ตามหลักการแล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในสนามแม่เหล็กจะไม่สามารถเดินทางถึงแอโนดได้ โดยจะถูกกักอยู่ใกล้ๆ กับเป้าสารเคลือบเพื่อทำให้เพิ่มการไอออไนเซชัน นี่เป็นประโยชน์ในการใช้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับเป้าและตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการไอออไนเซชัน โดยในรูปที่ 2.15 เป็นตัวอย่างการนำมาใช้งานจริง แม่เหล็กที่ใช้หลักๆ เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม หรือรูปเกือบกลม ซึ่งวางอยู่ด้านหลังเป้าสารเคลือบมีขั้วแม่เหล็กขั้วใดอยู่กึ่งกลางของเป้า และขั้วเหนือจะอยู่ตามวงของเป้าสารเคลือบแต่ละแบบ โดยทั่วไปเส้นแรงแม่เหล็กเส้นแรกจะพุ่งเข้าหาเป้า เส้นต่อไปจะค่อยๆ โค้งจนขนานกับผิวของเป้าจนในที่สุดจะครบวงของสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนที่หลุดจากแคโทดจะเริ่มถูกเร่งไปสู่แอโนดโดยการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นแบบเกลียวแต่ก็มีอิเล็กตรอนบางตัวที่วิถีการเดินทางโค้งกลับมาที่เป้า ผลของสนามแม่เหล็กจะจำกัดเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้อยู่บริเวณผิวของเป้าสารเคลือบ ทิศของแม่เหล็กมีผลกับแนวการกัดกร่อนของเป้าโดยกระบวนการสเปคโตริงที่เกิดขึ้นตามเส้นทางที่อิเล็กตรอนกระโดดไปรอบๆ ด้วยความเร็วสูง เนื่องจากเกิดการไอออไนเซชันของแก๊สที่รุนแรงมาก



รูปที่ 2.15 การให้สนามและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนแผ่นแม่เหล็ก [22]

2.7.6 รีเอกทีฟ สปัดเตอริง

สารประกอบฟิล์มบางสามารถปลูกด้วยเทคนิคสปัดเตอริง โดยใช้เป้าโลหะสารเคลือบสปัดเตอริงภายใต้สปัดเตอริงแก๊สและรีเอกทีฟแก๊ส ซึ่งการสปัดเตอริงแบบนี้เรียกว่า เทคนิครีเอกทีฟ สปัดเตอริง โดยทั่วไปแล้วสารประกอบจากกระบวนการนี้ได้แก่ [23]

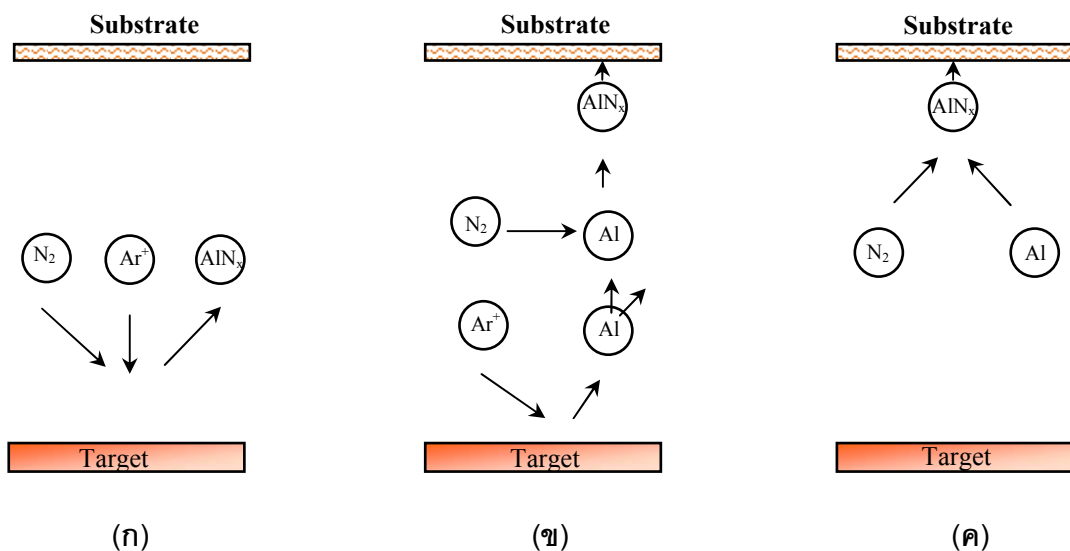
- สารประกอบออกซิเจน (Oxygen compound) เช่น Al_2O_3 , In_2O_3 , SnO_2 , SiO_2 , Ta_2O_3 เป็นต้น O_2 เป็นรีเอกทีฟแก๊ส
- สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compound) เช่น TaN , TiN , AlN , Si_3N_4 เป็นต้น N_2 หรือ NH_4 เป็นรีเอกทีฟแก๊ส
- สารประกอบคาร์บอน (Carbon compound) เช่น TiC , WC , SiC เป็นต้น Methane, acetylene หรือ propane เป็นรีเอกทีฟแก๊ส

2.7.6.1 การปลูกฟิล์มบางของสารประกอบโดยเทคนิค รีเอกทีฟ แมกเนตรอน สปัดเตอริง

การปลูกฟิล์มโดยวิธีสปัดเตอริงถูกนำมาใช้ในการเตรียมฟิล์มของสารประกอบหลายชนิด กระบวนการรีเอกทีฟสปัดเตอริง มีประโยชน์ในการปลูกฟิล์มของสารประกอบแบบหลายชั้นได้อย่างง่ายดาย สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสปัดเตอริงแก๊ส

การรวมตัวกันของอะตอมของรีเอกทีฟแก๊สกับอะตอมของโลหะจากการถูกสปัดเตอริงมีความเป็นไปได้อยู่สามทาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.16 (ก) รวมกันบริเวณพื้นผิวของเป้า (ข) รวมกันอยู่

บริเวณระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ (ค) รวมกันบริเวณพื้นผิวของแผ่นรองรับ เพื่อที่จะควบคุมอัตราส่วนโมเลกุลของระบบนี้จึงต้องเข้าใจกลไกการเกิดก่อน กลไกที่หนึ่ง (รูปที่ 2.16 (ก)) สามารถควบคุมพลังงานของอะตอมและอนุภาคบนผิวของเป้าได้โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ในขณะที่กลไกที่สอง (รูปที่ 2.16 (ค)) สามารถควบคุมพลังงานของอะตอมและอนุภาคได้โดยควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับ แต่ปัญหาของกระบวนการเกิดอยู่ที่กลไกการเกิดที่สอง (รูปที่ 2.16 (ข)) เนื่องจากกลไกการเกิดบริเวณนี้ไม่สามารถควบคุมพลังงานของอะตอมและโมเลกุลได้จึงทำให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบในเฟสที่ไม่ต้องการ ปัญหาที่เกิดจากกลไกการเกิดที่สองนี้ จะลดลงเมื่อใช้ความดันในการเตรียมฟิล์มต่ำ และลดระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ โดยการฟอร์มตัวของสารประกอบที่บริเวณระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับจะเกิดที่ความดันในช่วง 5 ถึง 10 ปาสคาล และขึ้นกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วย

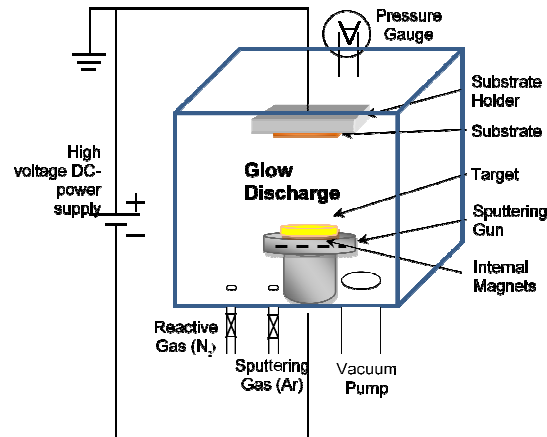


รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดของการปลูกฟิล์มแบบรีแอคทีฟสปีดเตอริง (ก) เกิดบริเวณหน้าเป้าสารเคลือบ (ข) เกิดระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ และ (ค) เกิดบริเวณแผ่นรองรับ [23]

2.7.7 การปลูกฟิล์มบางโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี-แมกเนตรอน สปีดเตอริง

รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะทั่วไปของระบบรีแอคทีฟ ดีซี-แมกเนตรอนสปีดเตอริง ส่วนประกอบหลักๆ ของระบบนี้คือ ภาชนะสุญญากาศ หัวแคโทดที่มีแม่เหล็ก แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง หัววัดความดัน แท่นจับแผ่นรองรับ และระบบปั๊ม ความดันต่ำที่สุดของระบบขึ้นกับระบบปั๊มและความดันสำหรับการสปีดเตอริงควบคุมโดยอัตราแก๊สที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ระบบปั๊มของระบบอาจต่อกับปั๊มชนิดดิ่งคูดโมเลกุลแบบเทอร์โบ (turbo molecular pump) โดยมีโรตารีปั๊มเป็นปั๊มช่วยอยู่

ด้านหลัง โดยปกติแล้วในระบบสปัตเตอริงจะใช้แก๊สเฉื่อยสำหรับเป็นสปัตเตอริงแก๊ส เช่น แก๊สอาร์กอน เป็นต้น หลังจากนั้น สปัตเตอริงแก๊สนี้จะถูกไอออไนซ์โดยใช้ไฟฟ้าศักย์สูงที่หัวแคโทด หรือเป้าสารเคลือบ

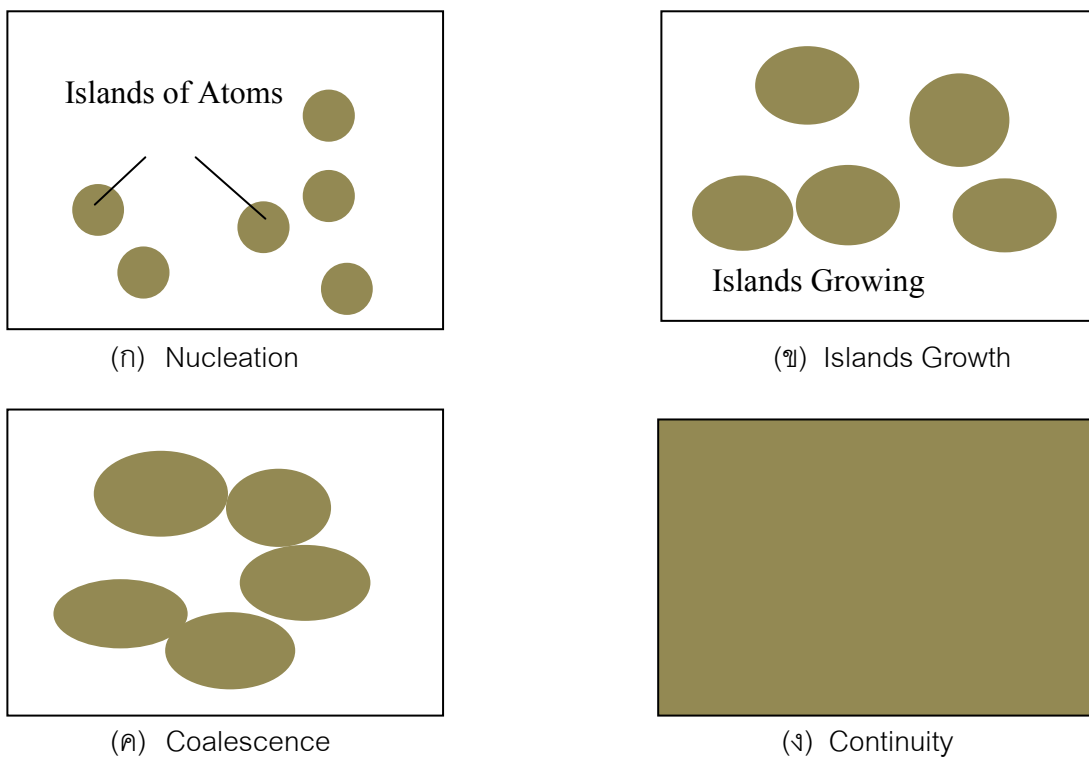


รูปที่ 2.17 ระบบ รีแอกทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง

2.7.8 การเกิดของฟิล์มบาง

ในการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง ฟิล์มที่เกิดบนแผ่นรองรับโดยส่วนใหญ่จะพอร์มเป็นอะตอมหรือโมเลกุล โดยอะตอมจะกระจายทั่วไปบนแผ่นรองรับซึ่งเมื่อเคลื่อนที่มาถึงแผ่นรองรับจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวของแผ่นรองรับ [24] อะตอมที่มีพลังงานจะเคลื่อนที่หรืออาจกระโดดมาอยู่ชิดกับแผ่นรองรับ เมื่อเวลาผ่านไปอะตอมเหล่านี้จะเริ่มชิดกับอะตอมตัวอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงและเริ่มมีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพลังงานที่เหลืออยู่ ซึ่งอะตอมที่เริ่มมีการยึดเหนี่ยวจะเคลื่อนที่ได้น้อยหรืออาจหยุดนิ่งแต่จะมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยวๆ ความเป็นไปได้ในการเข้าคู่กันของอะตอมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบฟิล์ม ในขณะเดียวกันคู่อะตอมก็จะเริ่มมีการยึดเหนี่ยวกับอะตอมเดี่ยวข้างเคียงพอร์มเป็นสามตัว สี่ตัว และมากขึ้นเรื่อยๆ การพอร์มตัวของฟิล์มขั้นนี้เรียกว่า Nucleation stage ซึ่งนำไปสู่การพอร์มตัวเป็นหย่อม หรือเรียกว่า Island ที่เสถียร แต่ละหย่อมจะมีจำนวนอะตอมประมาณ 10 ถึง 100 ตัว ระหว่างที่ฟิล์มอยู่ในขั้น Island growth stage ขนาดของหย่อมจะมีจำนวนอะตอมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นแต่ละหย่อมก็จะเริ่มเชื่อมติดกันและเริ่มมีการพอร์มตัวโดยมีโครงสร้างผลึกตามเงื่อนไขที่ปลูกเป็นฐานของโครงสร้างขั้นถัดไปซึ่งขั้นนี้เรียกว่า Coalescence stage จนกระทั่งแต่ละ coalescence เชื่อมต่อกัน แต่ในบางกรณีอาจจะไม่มีการเชื่อมต่อกันจนฟิล์มมีความหนาเฉลี่ยถึง 100 อังสตรอม แต่ละชั้นของการพอร์มตัวของฟิล์มแสดงในรูปที่ 2.18

ถ้าอะตอมที่พื้นผิวฟิล์มเคลื่อนที่ได้ อะตอมเหล่านี้มีโอกาสสูงที่จะเจอตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำ สอดคล้องกับการเกิดผลึกในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ดังนั้นจึงทำให้อะตอมสามารถเจอตำแหน่งที่มีการใช้พลังงานที่เหมาะสม การเกิดผลึกของฟิล์มถูกกระตุ้นโดยอัตราการปลูกฟิล์มที่น้อยในขณะที่อะตอมกำลังฟอร์มตัวเป็นหย่อมของฟิล์มแบบพหุผลึก แต่ละหย่อมก็จะมีหนึ่งโครงสร้างหรือมากกว่า อัตราการเคลือบฟิล์มที่น้อยจะทำให้เกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่ มีความหนาแน่นของโครงผลึกน้อย มีความบกพร่องของโครงสร้างผลึกสูงและอะตอมหรือโมเลกุลของฟิล์มไม่มีการกระจาย



รูปที่ 2.18 การเกิดของฟิล์มบางในสถานะต่างๆ [24]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schafer และ Stock [25] ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AIN) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยเป้า (target) ทำจาก (AIN_x with $x \leq 1$) ทำการเคลือบบนแผ่นอัลลอยของอะลูมิเนียม (2024, 6061 และ 7075) ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อไนโตรเจนที่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มที่ได้โดยการวัดการโพลาไรเซชัน (polarization measurements) และรูปแบบของ

โครงสร้างของฟิล์มที่ทำการเคลือบ ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบการวัดการโพลาไรเซชันต่ำที่สุดคือ AlN_1 ($E_{\text{pit}} = +2.0 \text{ V}$, $i = 12$ ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ทำการเคลือบบนแผ่นอัลลอยของอะลูมิเนียม (7075) ภาวะในการเคลือบที่ กำลังไฟฟ้า 900 วัตต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า -80 โวลต์ อุณหภูมิ 450 เคลวิน และ อัตราการไหลของไนโตรเจน 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ที่ภาวะมาตรฐาน และเมื่ออัตราส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มดีขึ้น

Vacandio และคณะ [26] ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนและสมบัติความเป็นรูปพรุนที่ผิวของฟิล์มอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยเป้าทำจาก (AlN_x with $x \leq 1$) ทำการเคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304L ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของอะลูมิเนียมและไนโตรเจนที่มีผลต่อความสามารถทนต่อการกัดกร่อนของฟิล์มที่ได้โดยการวัดโพลาไรเซชันโดยวิธีเคมีไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำสุดคือ 0.03 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และรูพรุนน้อยกว่าร้อยละ 0.056 ที่ได้จากฟิล์มบางของอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN_1) ที่ภาวะ P_{N_2} เท่ากับ 10^{-4} Torr และ อัตราการเคลือบของฟิล์มเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง และเมื่ออัตราส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มดีขึ้น

Altun และ Sen [27] ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบ ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยเป้า (target) ทำจากอะลูมิเนียมไนไตรด์ ทำการเคลือบบนแผ่นอัลลอยของแมกนีเซียม (AZ31 , AZ61 , AZ63 และ AZ91) ในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแผ่นอัลลอยของแมกนีเซียมต่อสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ผลการทดลองพบว่า การเคลือบด้วยฟิล์มของอะลูมิเนียมไนไตรด์สามารถช่วยปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนได้เมื่อเทียบกับแผ่นอัลลอยของแมกนีเซียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ ยกเว้นแผ่นอัลลอยของแมกนีเซียม (AZ91) หลังจากการเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์พบว่าความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลงเนื่องมาจากสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นอัลลอยของแมกนีเซียม (AZ91) ดีกว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

Wang และคณะ [28] ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางสังกะสีอะลูมิเนียม (Zn-Al) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบ ion-beam-assisted deposition (IBAD) ทำการเคลือบบนแผ่น AISI 1045 steel ในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อสังกะสีที่มีผลต่อความสามารถทนต่อการกัดกร่อนของฟิล์มที่ได้โดยการวัดโพลาไรเซชัน และลักษณะของผิวฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางของสังกะสีอะลูมิเนียมที่ได้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอะลูมิเนียม

ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่นมากขึ้นทำให้ความเป็นรูพรุนต่ำส่งผลดีต่อความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์ม และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบการวัดโพลาไรเซชันมีค่าต่ำลง ($i = 10^{-6}$ ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมภายในฟิล์มบางส่งผลให้ฟิล์มบางสังกะสีอะลูมิเนียม (Zn-Al) มีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น

Chen และคณะ [29] ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มสังกะสีอะลูมิเนียม (Zn-Al) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบ ion beam sputtering แบบหลายชั้น ทำการเคลือบบนแผ่นเหล็กคาร์บอน ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของอะลูมิเนียม และสังกะสี ที่มีผลต่อความสามารถต่อการกัดกร่อนของฟิล์ม และผลของอุณหภูมิอบอ่อนฟิล์มบาง (annealing temperature) ที่มีผลต่อลักษณะผิวของฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มที่มีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 72.6 มีความต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งและความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น และอุณหภูมิอบอ่อนฟิล์มบาง ที่ทำให้ฟิล์มมีความเป็นรูพรุนต่ำที่สุดคือ 370 องศาเซลเซียส

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ วิธีการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ และการอธิบายลักษณะสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ เช่น โครงสร้างผลึก สมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติการกัดกร่อน และสัณฐานวิทยาของพื้นผิว ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไป

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98%
2. เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 301 (Stainless steel 301) หนา 0.1 mm
3. แผ่นทองแดง
4. ผ้าคาร์บอน (Carbon Cloth)
5. แก๊สไนโตรเจน (N_2)
6. แก๊สอาร์กอน (Ar)
7. เป้าอะลูมิเนียม (Al target)
8. ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)
9. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
10. เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) รุ่น HY 3002 ยี่ห้อ COMMUE
2. มัลติมิเตอร์ (Multi-meter) Model RM-15 Sangchai meter
3. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat Model μ 3AUT70558 μ AUTOLAB
4. ปากกาหนีบชิ้นงาน
5. ตู้ดูดความชื้น
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กรรไกรตัดชิ้นงาน
8. เครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
9. ระบบสุญญากาศ Leybold Univex 350
10. เเวอร์เนีย

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 วิธีการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

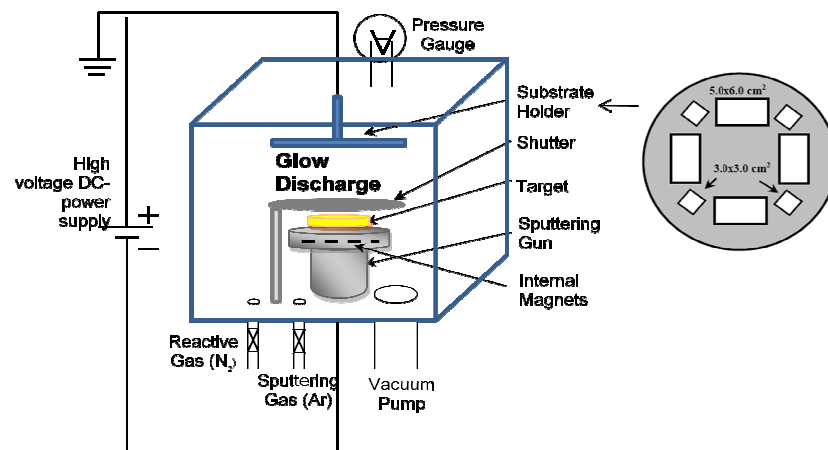
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นรองรับเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 301 (Stainless steel 301) โดยแผ่นรองรับนี้มีขนาด $5 \times 6 \text{ cm}^2$ ก่อนที่จะนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 301 (Stainless steel 301) นี้มาใช้เป็นแผ่นรองรับในกระบวนการเคลือบฟิล์มต้องทำความสะอาดก่อน โดยในการทำความสะอาดมีขั้นตอนดังนี้ ใช้น้ำยาล้างจานขัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 301 (Stainless steel 301) ด้วยฟองน้ำที่มีลักษณะนุ่มไม่ทำลายพื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จากนั้นนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) ในไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 20 นาที และนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เป็นเวลา 20 นาที สุดท้ายใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าไล่ น้ำที่เกาะพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม หลังจากนั้นนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วเก็บในกล่องพลาสติกสำหรับเก็บชิ้นงาน และนำไปเก็บไว้ที่ตู้ควบคุมความชื้นเพื่อรอการนำมาใช้เป็นแผ่นรองรับในการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ต่อไป

ในงานวิจัยนี้ระบบสปัตเตอริงที่ใช้เป็นรุ่น Leybold Univex 350 ระบบนี้ใช้เป่าในการสปัตเตอริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความหนา 5 มิลลิเมตร และได้ติดตั้งหลอดไฟมีไส้ชนิดแฮโลเจน (halogen lamp) สำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับ โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง เป่าสารเคลือบที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 วางอยู่บนขั้วแคโทด หรือ sputtering gun ผิวสัมผัสระหว่างเป้ากับขั้วแคโทดมีแผ่นตาข่ายทองแดงบางๆ คั่นอยู่เพื่อช่วยในการระบายความร้อนจากเป้าที่ใช้ในการสปัตเตอริงสู่ขั้วแคโทด โดยขั้วแคโทดมีระบบระบายความร้อนที่มาจากเครื่องทำความเย็นจากภายนอกระบบสปัตเตอริง เพื่อป้องกันไม่ให้เป่ามีความร้อนมากเกินไป

รูปที่ 3.1 แสดงภาพร่างของระบบ รีแอกทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ใช้ในการทดลองนี้ จากรูประบบที่แสดงนี้เรียกว่า “planar sputtering” ระหว่างเป้าและแผ่นรองรับกำหนดให้มีระยะห่าง 12 เซนติเมตร ที่ระหว่างเป้าและแผ่นรองรับนี้ได้มีการติดตั้งแผ่นโลหะเปิด-ปิด (Shutter) เพื่อขัดขวางไม่ให้สปัตเตอริงอะตอมเดินทางไปถึงแผ่นรองรับในขณะที่ปิดแผ่นนี้ และเมื่อเปิดแผ่นนี้ อะตอมก็จะวิ่งมาเคลือบที่แผ่นรองรับ ดังนั้นทำให้สามารถควบคุมเวลาในการเคลือบฟิล์มบางได้อย่างแน่นอน และแผ่นเปิด-ปิด สามารถตั้งเวลาได้

ระบบที่ใช้ในงานนี้เป็นปั๊มชนิดเทอร์โบโมเลกุลาร์ (Turbo molecular pump, TMP) ช่วยกับปั๊มโรตารี (Rotary pump) เพื่อสร้างสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศ (Vacuum

chamber) ที่ความดันต่ำสุด 2.7×10^{-7} มิลลิบาร์ จากนั้นทำการเติมแก๊สอาร์กอนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันเท่ากับความดันที่ใช้ในการสเปคเตอรริงคือ 6.0×10^{-3} มิลลิบาร์ ทั้งนี้ต้องปั๊มแก๊สออกจากภาชนะสุญญากาศ จนกระทั่งความดันลดลงอยู่ในระดับ 4.0×10^{-6} มิลลิบาร์ ก่อนเพื่อทำการเจือจางแก๊สที่ไม่พึงประสงค์ที่ยังตกค้างภายในระบบออกให้ได้มากที่สุดเพราะแก๊สเหล่านี้ อาจส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมซึ่งทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนได้ ก่อนทำการสเปคเตอรริงต้องทำความสะอาดผิวหน้าของเป้าก่อน โดยสเปคเตอรริงภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่ความดัน 6.0×10^{-3} มิลลิบาร์ ใช้กำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ เป็นเวลา 5-10 นาที เพื่อให้ได้ผิวหน้าของเป้าสะอาด จากนั้นจึงเริ่มกระบวนการเตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยเทคนิครีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสเปคเตอรริง ตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพของ รีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอน สเปคเตอรริง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขต่างๆ ในกระบวนการเคลือบฟิล์ม

ภาวะการเคลือบ	ค่าที่ใช้
ความดันแก๊สรวม ($N_2 + Ar$)	6×10^{-3} mbar
ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน	0 to 50%
กำลังไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	100-400 watt
เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง	15-75 min
เป้า (เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว)	Aluminium 99.99%
ระยะห่างระหว่างเป้ากับสารรองรับ	12 cm

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลขององค์ประกอบของฟิล์มที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการเปลี่ยนค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน $0 - 2.8 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์ มีค่าตั้งแต่ 0-50 % ของอัตราการไหลของแก๊สทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) ส่วนในการศึกษาตัวแปรต่อมาคือผลของความหนาของฟิล์มที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการเคลือบฟิล์มบางที่เวลาต่างๆ กันเพื่อเปลี่ยนความหนาของฟิล์มบาง เคลือบที่เวลา 15-60 นาที และการศึกษาตัวแปรสุดท้ายคือ ผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้การสับเตอริงที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบาง โดยการเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า 200-400 วัตต์ เพื่อเปลี่ยนอัตราเร็วของการเคลือบของฟิล์มบาง

3.3.2 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

3.3.2.1 โครงสร้างผลึก

โครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ทั้งหมดนำมาศึกษาโครงสร้างของฟิล์มโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รุ่น Bruker, D8 โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จาก $\text{Cu-K}\alpha$ ที่มีความยาวคลื่น 1.54 อังสตรอม ในโหมด 2 θ เพื่อบอกเฟสของฟิล์มและโครงสร้างของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบด้วยเงื่อนไขต่างๆ ในการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากมุม $2\theta = 30^\circ$ ถึง 70° จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถหาขนาดเกรนของฟิล์มได้จากการนำค่าความกว้างของครึ่งยอดสูงสุด (Full width at half maximum, *FWHM*) มาคำนวณในสมการของ Scherrer [30]

$$\tau = \frac{\kappa\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

- เมื่อ κ คือ ปัจจัยที่แสดงลักษณะพื้นฐาน เท่ากับ 1
 λ คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม
 β คือ ความกว้างของครึ่งยอดสูงสุดมีหน่วยเป็นเรเดียน
 θ คือ มุมแบรกก มีหน่วยเป็นเรเดียน
 τ คือ ขนาดของเกรนเฉลี่ย

จากชุดระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถบอกเฟสของผลึกได้ ด้วยการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของอะลูมิเนียมไนไตรด์ ซึ่งเฟสที่เด่นชัดมีสองเฟสคือ Hexagonal และ Face Center Cubic (FCC) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชุดระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ [31]

2-theta	I	h	k	l
33.359	999	1	0	0
35.914	606	0	0	2
38.027	914	1	0	1
49.824	287	1	0	2
59.620	466	1	1	0
65.952	391	1	0	3
70.064	59	2	0	0

AIN (Hexagonal)

2-theta	I	h	k	l
38.531	30	1	1	1
44.772	100	2	0	0
65.186	55	2	2	0
78.344	10	3	1	1
82.541	11	2	2	2
99.227	6	4	0	0

AIN (FCC)

3.3.2.2 การวัดค่าความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR) [32]

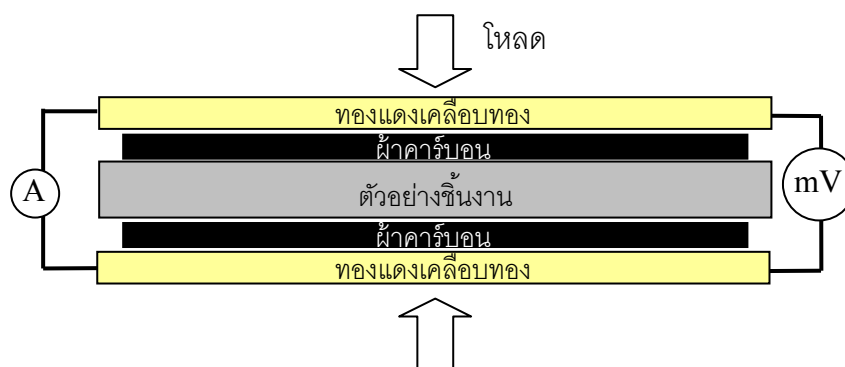
การวัดค่าความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ อุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.2 และแผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์การวัดค่าความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะแสดงดังรูปที่ 3.3 ให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติมิเตอร์ (Multi-meter) เมื่อได้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ นำไปเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 3.4 เพื่อคำนวณหาความต้านทานตามสมการที่ 3.2 [32] โดยความชันของกราฟคือค่าความต้านทาน

$$V = I \times R$$

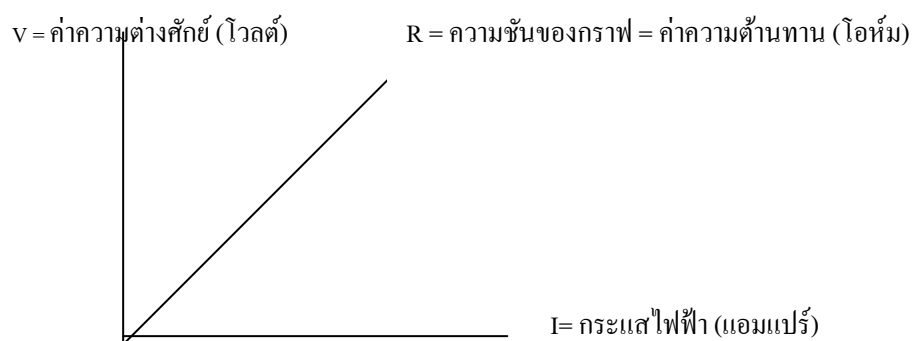
(3.2)



รูปที่ 3.2 การวัดความต้านทานระหว่างผิวสัมผัส (ICR) [32]



รูปที่ 3.3 การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 ค่าความต้านทานเป็นความชันของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า [32]

ความต้านทานเชิงสัมผัสมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า โดยให้ A คือพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะเท่ากับค่าความต้านทานคูณกับพื้นที่ผิวสัมผัสโดยวัดความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือวัดโดยไม่มีชิ้นงาน กำหนดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ R_1 และวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสตอนมีชิ้นงาน กำหนดให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ R_2 และหาค่าความต้านทานระหว่างผิวสัมผัส (ICR) ได้จากสมการที่ 3.3 [32]

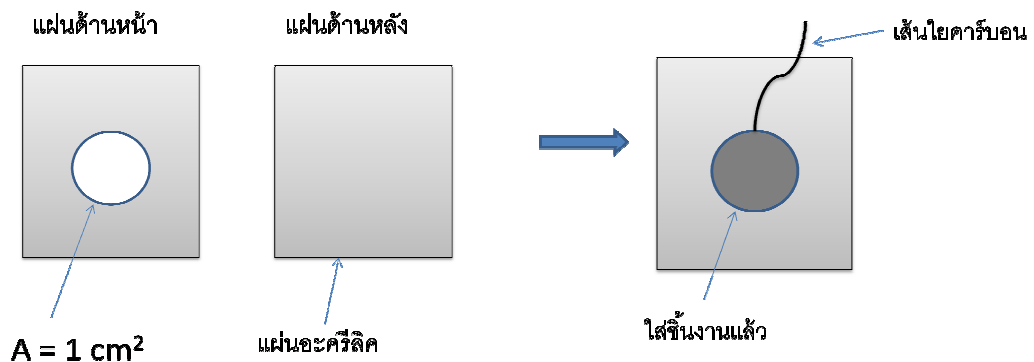
$$ICR = \frac{(R_2 - R_1)}{2} \times A \quad (3.3)$$

โดยที่

- ICR = ค่าความต้านทานระหว่างผิวสัมผัส
- R_1 = ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือวัด (Ωcm^2)
- R_2 = ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (Ωcm^2)

3.3.2.3 การวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

ตัดชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ให้มีขนาดประมาณ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ แล้วนำไปใส่ในแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูไว้และมีพื้นที่ 1 cm^2 และใส่เส้นใยคาร์บอนเพื่อเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากตัวชิ้นงานเข้าไปด้วย แล้วผนึกขอบของแผ่นอะคริลิกด้วยเทปกาว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ โดยจัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.6 และต่อขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วในสารละลาย ซึ่งประกอบด้วยขั้ว Saturated Calomel Electrode (SCE) ใช้เป็น Reference Electrode ใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้ว Counter Electrode และชิ้นงานในการทดสอบ ใช้เป็นขั้ว Working electrode ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าโดยขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้วจุ่มอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์



รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์



รูปที่ 3.6 การวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงาน [32]

■ **เข้าโปรแกรมวัดการกัดกร่อน [32]**

(1) เข้าโปรแกรม GPES

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

(3) สำหรับการหา Corrosion rate ให้กำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้น

หน้าต่าง Edit procedure-Page 1

(3.1) Begin potential (V) = -0.1

(3.2) End potential (V) = 0.5

(3.3) Step potential (V) = 0.001

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

หน้าต่าง Edit procedure-Page 2

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

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

(3.7) tafel plot = active

(4). เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ให้พร้อม

(5). กดปุ่ม Start

(6). โปรแกรมเริ่มทำงานและวัดค่ากระแสออกมาสามารถดูกราฟได้ที่หน้าต่าง data presentation

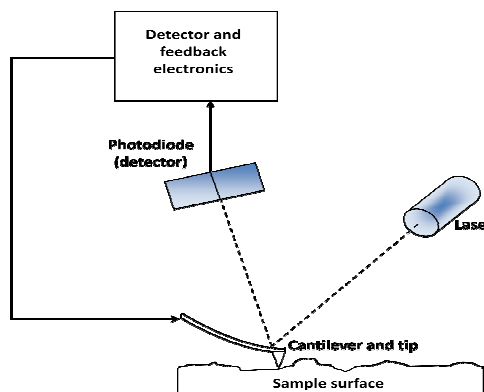
(7). เมื่อได้กราฟที่ต้องการแล้วสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ต่อไป

■ **คำนวณหาอัตราการกัดกร่อน [32]**

- (1) เตรียมกราฟที่ได้มาจากการวัดการกัดกร่อน
- (2) เลือกเมนู Analysis – corrosion rate แล้วกดปุ่ม Tafel plot
- (3) ใส่ค่าที่จำเป็นต่อการคำนวณการหาอัตราการกัดกร่อน คือพื้นที่ผิวสัมผัส (cm^2) น้ำหนักสมมูล (g) และ ความหนาแน่น (g/cm^3) ของตัวอย่าง
- (4) กดปุ่ม Tafel slope
- (5) กำหนดจุด 2 จุด ที่ด้านล่างของกราฟรูปปี่กนก แล้วกดปุ่ม OK จะได้เส้นตรงสัมผัส ส่วนโค้งของภาพ
- (6) กำหนดจุด 2 จุด ที่ด้านบนของกราฟ แล้วกดปุ่ม OK จะได้เส้นตรง 2 เส้นตัดกัน
- (7) กดปุ่ม Start fit
- (8) โปรแกรมจะคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนให้

3.3.2.4 สันฐานวิทยาของพื้นผิว [33]

วัดความหนาและความขรุขระของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์สสารขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร รูปที่ 3.7 แสดงภาพร่างของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม โดยกล้องชนิดนี้ประกอบด้วยเข็ม (Tip) ที่มีปลายคมมาก เมื่อเข็มเคลื่อนที่เข้ามาใกล้พื้นผิวของตัวอย่างจะมีแรงเกิดขึ้นทำให้ก้านเข็ม (Cantilever) เบี่ยงเบนเป็นไปตามกฎของฮุก โดยทั่วไปแล้วการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นจะใช้เลเซอร์สะท้อนจากปลายของก้านเข็ม วางตัวอย่างบนที่จับยึดตัวอย่าง จากนั้นจะกวาดเข็มไปจนทั่วพื้นผิวของตัวอย่างและตำแหน่งการวางเข็มในแนวดิ่ง (s) เป็นการตั้งระยะที่จำเป็นเพื่อใช้ในการบันทึกแรงที่ปลายเข็มการบันทึกผลจะอยู่ในรูป $s(x,y)$ ซึ่งเป็นตัวแทนของแต่ละตำแหน่งบนผิวตัวอย่าง



รูปที่ 3.7 ภาพร่างของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม [33]

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้ประกอบด้วยผลการทดลอง และการวิเคราะห์หัตถ์พิพของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ ปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนหรือค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน ความหนาของฟิล์มบาง และกำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มบางที่มีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ อันได้แก่ สัณฐานวิทยาในรูปโครงสร้างผลึก สมบัติเชิงไฟฟ้า และสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้

4.1 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

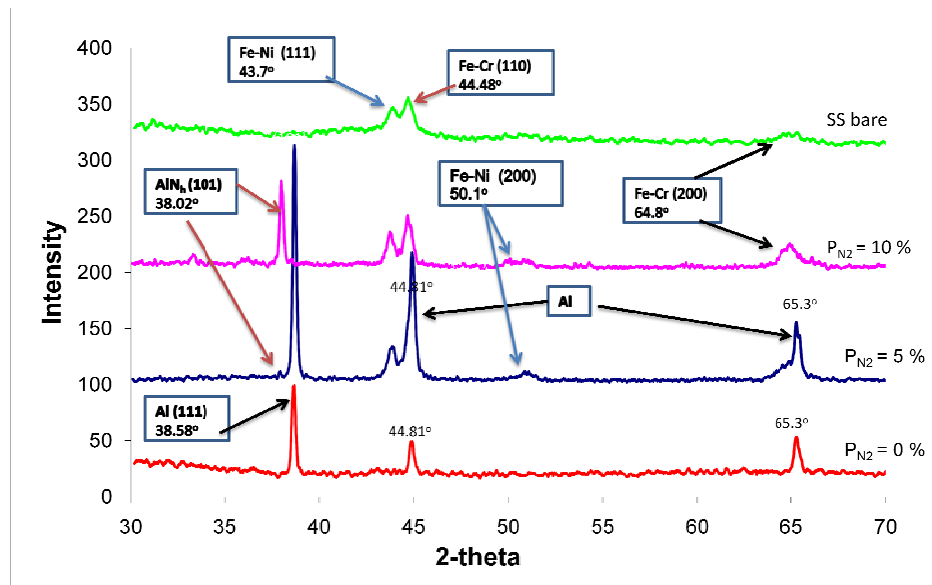
4.1.1 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนในฟิล์มบางต่อโครงสร้างผลึกฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

ทำการเคลือบฟิล์มบางโดยการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการรีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริงจากร้อยละ 0, 3, 5, 10 และ 50 โดยมีตัวแปรหลักอื่นๆ ที่ควบคุมไว้ได้แก่ สปัตเตอริงภายใต้ความดัน 6×10^{-3} มิลลิบาร์ ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที โดยใช้กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ และมีเป้าสารเคลือบเป็นอะลูมิเนียมร้อยละ 99.99 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่วัดบริเวณกึ่งกลางของแผ่นฟิล์มที่เคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยเส้น (a) แสดงฟิล์มที่เคลือบภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 0 (ใช้แก๊สอาร์กอนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง) ปรากฏยอดสูงที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 38.58° , 44.81° และ 65.30° ตามลำดับของผลึกอะลูมิเนียมไนเฟส (Cubic) สอดคล้องกับระนาบ (111) เส้น (b) แสดงฟิล์มที่เคลือบภายใต้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5 ปรากฏยอดสูงที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.02° สอดคล้องกับระนาบ (101) ของผลึกอะลูมิเนียมไนไตรด์ (Hexagonal) เนื่องจากปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางมีน้อยทำให้ความเข้ม (intensity) ของยอดสูงมีค่าต่ำ นอกจากนี้ได้ปรากฏยอดสูงที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.58° , 44.81° และ 65.30° ตามลำดับของผลึกอะลูมิเนียมไนเฟส (Cubic) แต่เมื่อเพิ่มค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเป็นร้อยละ 10 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ดังเส้น (c) ในรูปที่ 4.1 ปรากฏยอดสูงที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.0° สอดคล้องกับระนาบ (101) ของผลึกอะลูมิเนียมไนไตรด์ (Hexagonal) จะสังเกตเห็นว่ายอดสูงที่ตำแหน่งนี้มีค่าความเข้มสูง เนื่องจากมีปริมาณองค์ประกอบของ

ไนโตรเจนภายในฟิล์มบางมากขึ้นทำให้ฟิล์มแสดงสมบัติเข้าใกล้การเป็นสารกึ่งตัวนำมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ได้ปรากฏยอดสูงที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 44.48° สอดคล้องกับระนาบ (110) 2θ เท่ากับ 64.8° สอดคล้องกับระนาบ (200) ของผลึกอัลลอยของเหล็ก-โครเมียม (Fe-Cr) อยู่ในเฟส Body-center-cubic และ 2θ เท่ากับ 43.7° สอดคล้องกับระนาบ (111) ส่วน 2θ เท่ากับ 50.8° สอดคล้องกับระนาบ (200) ของผลึกอัลลอยของเหล็ก-นิกเกิล (Fe-Ni) อยู่ในเฟสของ Cubic การปรากฏยอดสูงของผลึกอัลลอยของเหล็ก-โครเมียม(Fe-Cr) และผลึกอัลลอยของเหล็ก-นิกเกิล (Fe-Ni) เป็นยอดสูงที่มาจากสารรองรับ (substrate) เนื่องจากธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบของสารรองรับ (substrate) ได้แก่ เหล็กโครเมียม และนิกเกิล ดังแสดงในเส้น (d) ดังรูปที่ 4.1

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่าองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางหรือการเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางสามารถส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์มบาง โดยการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนภายในฟิล์มบางจะทำให้ฟิล์มบางมีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนมากขึ้นที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเป็นร้อยละ 10 ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มียอดสูง (peak) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.02° ที่มีความเข้มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดต่างจากความเข้มของยอดสูง (peak) ที่ได้จากค่าความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเป็นร้อยละ 5 ที่มีความเข้มของยอดสูง (peak) ปรากฏไม่ค่อยเด่นชัดจากผลดังกล่าวเมื่อค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ AlN (Hexagonal) ภายในฟิล์มบางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียมเมื่อ (a) Al/SS301 ($P_{N_2} = 0\%$), (b) AlN/SS301 ($P_{N_2} = 5\%$), (c) AlN/SS301 ($P_{N_2} = 10\%$) และ (d) SS301 uncoated

4.1.2 ผลของความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนต่อองค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

นำฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้โดยการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการรีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริงจากร้อยละ 3, 5, 10 และ 50 มาทดสอบหาองค์ประกอบของฟิล์มบางด้วยเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4

จากผลการทดสอบ EDX (โดยร้อยละอะตอม) ในตารางที่ 4.1 ฟิล์มบางใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 3 ในกระบวนการเคลือบ ผลปรากฏว่าค่าที่ได้ไม่สามารถคำนวณองค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการระบุปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Al : N) ภายในฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์สาเหตุหนึ่งอาจมาจากปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีปริมาณน้อยมากจนทำให้เครื่องทดสอบไม่สามารถบอกค่าได้ ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถคำนวณสูตรอย่างง่ายสำหรับฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบโดยการ ใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 3 ได้

จากผลการทดสอบ EDX (โดยร้อยละอะตอม) ในตารางที่ 4.2 ฟิล์มบางใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5 ในกระบวนการเคลือบ ผลปรากฏว่าค่าที่ได้สามารถคำนวณ

องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้เป็น Al : N เท่ากับ 1 : 0.08 ดังนั้นสูตรอย่างง่ายสำหรับฟิล์มบางคือ $AlN_{0.08}$

ในตารางที่ 4.3 เป็นผลการทดสอบ EDX (โดยร้อยละอะตอม) ของฟิล์มบางใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 10 ในกระบวนการเคลือบ ผลปรากฏว่าค่าที่ได้สามารถคำนวณองค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้เป็น Al : N เท่ากับ 1 : 0.54 ดังนั้นสูตรอย่างง่ายสำหรับฟิล์มบางคือ $AlN_{0.54}$

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของ EDX (โดยร้อยละอะตอม) ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบฟิล์มบางใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 50 ในกระบวนการเคลือบ พบว่าค่าที่ได้สามารถคำนวณองค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้เป็น Al : N เท่ากับ 1 : 0.6 ดังนั้นสูตรอย่างง่ายสำหรับฟิล์มบางคือ $AlN_{0.6}$

จากผลการทดสอบโดยเทคนิค EDX ที่แสดงจะเห็นว่าปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่อยู่ภายในฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะมีเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มของค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนแต่ไม่ได้สัมพันธ์กันแบบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลของการหาองค์ประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 3 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม)

element	1 st point	2 nd point	3 rd point	Average
Al	105.18	104.02	106.56	105.25
N	-5.18	-4.02	-6.56	-5.25

ตารางที่ 4.2 ผลของการหาองค์ประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม)

element	1 st point	2 nd point	3 rd point	Average
Al	74.76	73.40	74.17	74.11
N	4.71	6.21	5.35	5.43



ตารางที่ 4.3 ผลของการหาค่าประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 10 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม)

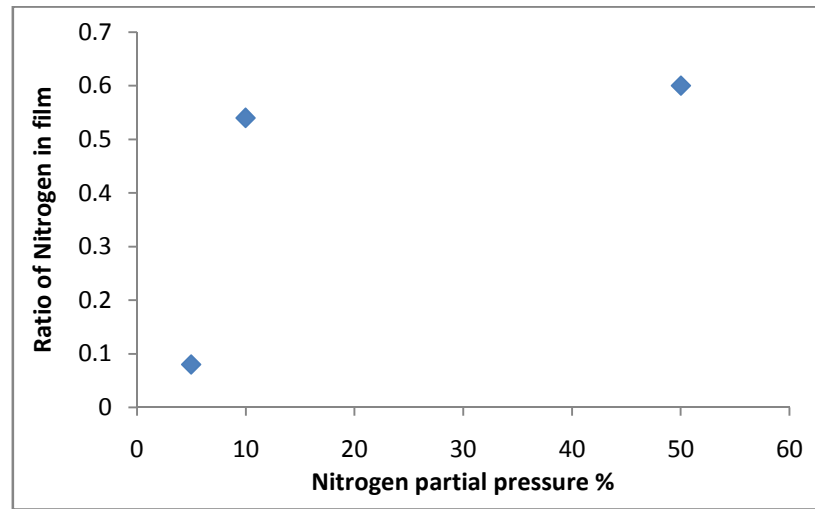
element	1 st point	2 nd point	3 rd point	Average
Al	63.83	65.36	66.65	65.28
N	36.17	34.64	33.35	34.72



ตารางที่ 4.4 ผลของการหาค่าประกอบของธาตุ (Al : N) ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 50 (ผลที่ได้เป็นร้อยละอะตอม)

element	1 st point	2 nd point	3 rd point	Average
Al	60.92	62.87	62.23	62
N	39.08	37.13	37.77	38

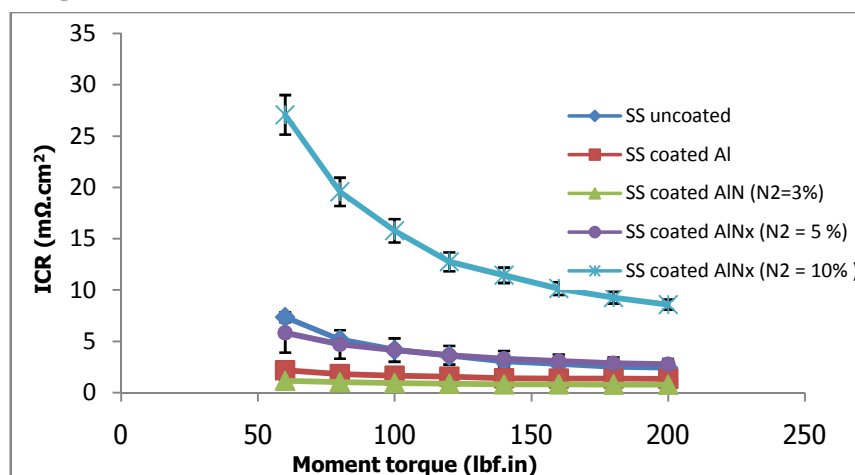




รูปที่ 4.2 แนวโน้มของการเพิ่มปริมาณธาตุไนโตรเจนภายในฟิล์มบางเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น

4.1.3 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนในฟิล์มบางต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัส และอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ดังนั้นหลังจากการเตรียมตัวอย่างของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยเคลือบที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนค่าต่างๆ ได้แก่ร้อยละ 0, 3, 5, 10 และ 50 นำมาทดสอบค่าความต้านทานเชิงสัมผัส ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3

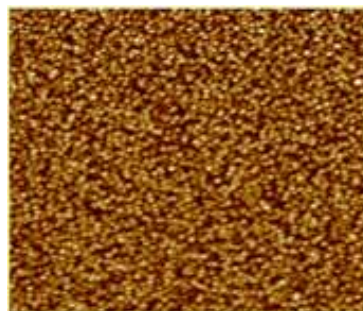


รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนค่าต่างๆ ตามค่าของทอร์กในการอัดเปลี่ยนไปจาก 60 ถึง 200 lbf.in

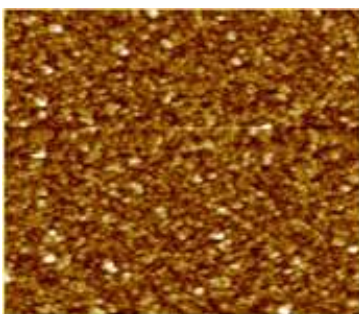
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มค่าของทอร์คในการอัดสำหรับทุกๆชิ้นงาน ซึ่งช่วงทอร์คของการอัดที่ทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วอยู่ในช่วงของความดันอัด 60 ถึง 120 lb_r.in และเมื่อขนาดของทอร์คของการอัดที่เพิ่มขึ้นหลังจากช่วงนี้ไปจนถึง 200 lb_r.in ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ จากผลดังที่ได้กล่าวมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าแรงอัดที่ใช้ในการอัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์สามารถส่งผลต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการอัดด้วยแรงจะช่วยลดช่องว่างระหว่างผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และผ้าคาร์บอน (carbon cloth) ดังนั้นพื้นที่สัมผัสระหว่างฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และผ้าคาร์บอน (carbon cloth) มีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านระหว่างผิวสัมผัสที่ดีมากขึ้น (ความต่างศักย์ระหว่างผิวสัมผัสมีค่าลดลงนั่นเอง)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนที่มีต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าชิ้นงานแสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบาง (การเพิ่มค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง) เนื่องจากการเพิ่มของปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนส่งผลให้ฟิล์มบางมีสมบัติเข้าใกล้ความเป็นสารกึ่งตัวนำมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณองค์ประกอบไนโตรเจนภายในฟิล์มบางเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณ AIN (Hexagonal) เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มบางมีความเป็นสารกึ่งตัวนำมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางมีความต้านทานเชิงสัมผัสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นความต้านทานเชิงสัมผัสจะมีแนวโน้มเพิ่มตามสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำของฟิล์มบาง ซึ่งสามารถยืนยันเปลี่ยนแปลงสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำของฟิล์มบางเนื่องจากการเพิ่มของปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางได้จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากผลค่าความต้านทานเชิงสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 4.3 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 10 แสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่นๆ ยกเว้นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 50 ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวไม่มีสมบัติการนำไฟฟ้าจึงไม่สามารถวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสได้ และชิ้นงานที่แสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่มีค่าต่ำที่สุดคือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเป็นร้อยละ 3 ซึ่ง

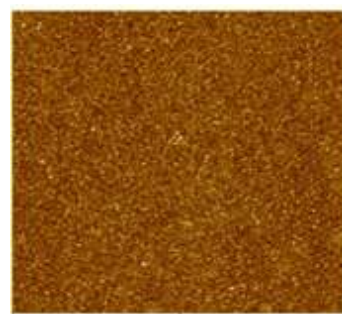
ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียม (Al film) หรือความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเป็นร้อยละ 0 อาจเนื่องมาจากค่าขนาดของเกรน (Grain size) ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเป็นร้อยละ 3 มีขนาดมากกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียม (Al film) ซึ่งจากผลการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์บนกระจกซิลิกอน (Si glass) เมื่อทำการทดสอบสัณฐานวิทยาในลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อฟิล์มบางที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางในปริมาณเล็กน้อยส่งผลให้ขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเกรนที่ได้จากการเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียม แต่ถ้าเพิ่มปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ขนาดของเกรนของฟิล์มบางมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kar และคณะ [21] เมื่อขนาดของเกรนเพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผ้าคาร์บอนกับฟิล์มบางมีมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าลดลง



(a)



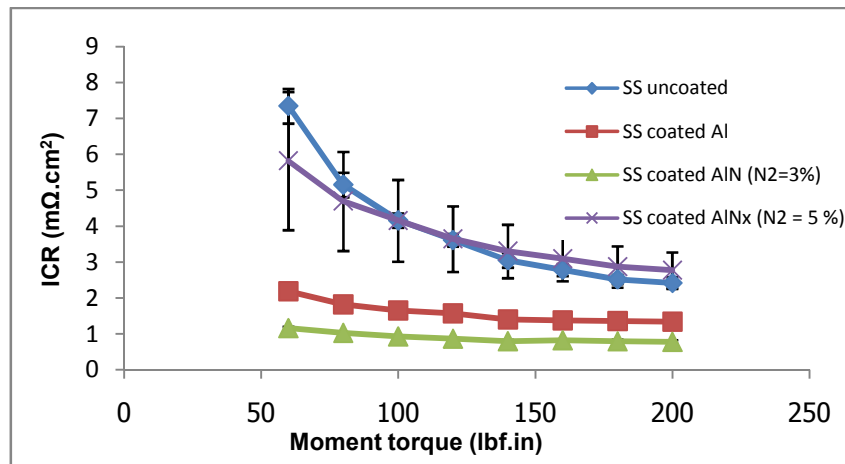
(b)



(c)

รูปที่ 4.4 ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ (a) Al/Si glass (Ar:N₂ = 100:0), (b) AlN/Si glass (Ar: N₂ = 97:3) และ(c) AlN/Si glass (Ar: N₂ = 90:10)

เมื่อพิจารณาผลของความต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเป็นร้อยละ 5 มีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสใกล้เคียงกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ ดังนั้นค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ เพื่อศึกษาตัวแปรต่อไปคือ ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5



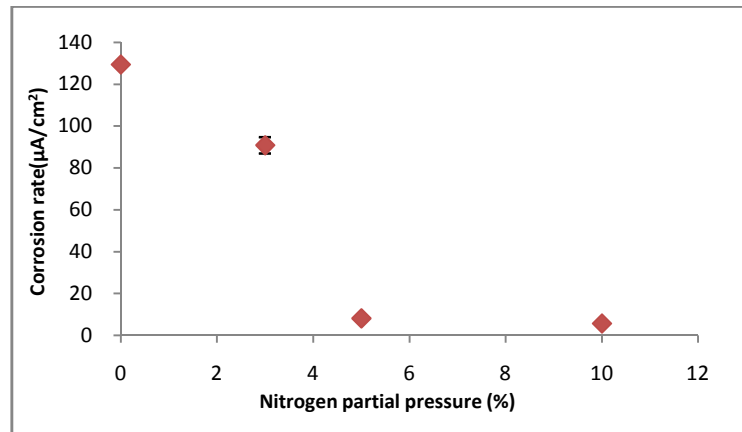
รูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนค่าต่างๆ ตามค่าของแรงในการอัดเปลี่ยนไปจาก 60 ถึง 200 lb_f.in

4.1.4 ผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนในฟิล์มบางต่ออัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

สมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางเป็นอีกสมบัติที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลของปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางต่อสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบาง จากผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น จากที่ได้กล่าวมาเมื่อค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางเพิ่มขึ้นตามด้วย ดังนั้นแสดงว่าการเพิ่มค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเปรียบเสมือนเป็นการทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมมีสมบัติเข้าใกล้ความเป็นสารกึ่งตัวนำมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสมบัติของสารกึ่งตัวนำ (AIN) ที่เคย

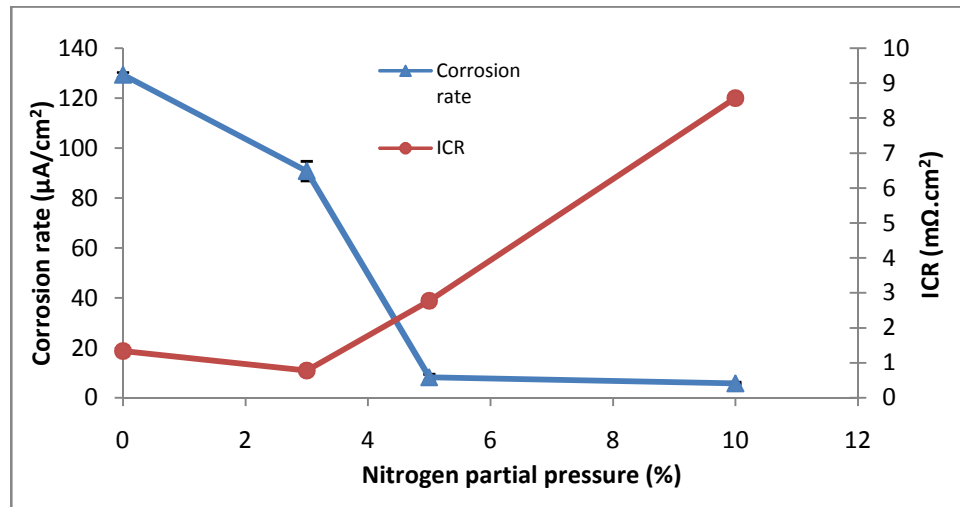
กล่าวไว้ในส่วนภาคของทฤษฎี คืออะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารประกอบโควาเลนต์มีเฟสที่รู้จักกันคือ Wurtzite (hexagonal) ซึ่งอะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานเชิงกึ่งตัวนำแบบตรง (direct energy band gap semiconductors) ประมาณ 6.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารที่อยู่ในกลุ่มสารกึ่งตัวนำด้วยกัน เป็นสารที่มีความหนาแน่นสูงจนสามารถกล่าวได้ว่าไม่มีรูพรุนก็ว่าได้ ด้วยเหตุนี้อะลูมิเนียมไนไตรด์จึงสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงที่มีความดันบรรยากาศได้เป็นอย่างดี สารประกอบออกไซด์ที่บริเวณผิวจะสามารถเกิดได้ตั้งแต่ช่วงของอุณหภูมิ 700-1,370 องศาเซลเซียส และสามารถทนต่อการเกิดสารประกอบออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 980 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2,800 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมีสูงสามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารที่มีความขรุขระ (roughness) ที่บริเวณผิวดำและมีความเป็นรูพรุน (porosity) ดำทำให้อะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมีสูง [17] และจากรายงานของ Schafer และ Stock [25] พบว่าการเพิ่มปริมาณองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ทำให้ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แนวโน้มของค่าอัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

เมื่อพิจารณาผลของค่าความขรุขระของผิวฟิล์มบางที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งฟิล์มบางที่มีความขรุขระของผิวน้อยจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion) [25] ได้ดีกว่าฟิล์มบางที่มีความขรุขระมากๆ จากการทดลองของ Kar และคณะ [21] การเพิ่มค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเสมือนเป็นการลดความขรุขระของผิวฟิล์มบาง ดังนั้นนี่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ค่าต่ำสุดของอัตราการกัดกร่อนที่ได้จากรูปที่ 4.6 มีค่าประมาณ $5.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$



รูปที่ 4.6 อัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ และฟิล์มบางอะลูมิเนียม เมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเป็นร้อยละ 0 ถึง 10

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียมจะได้ดังรูปที่ 4.7 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 จะแสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำทั้งสองสมบัติ หรือเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการยอมรับได้สำหรับสมบัติพื้นฐานสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [12] ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของทฤษฎี ด้วยเหตุนี้จึงนำค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่ร้อยละ 5 ไปเป็นตัวแปรควบคุมเพื่อศึกษาตัวแปรอื่นๆ ต่อไปได้แก่ ความหนาของฟิล์มบาง และกำลังไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบาง



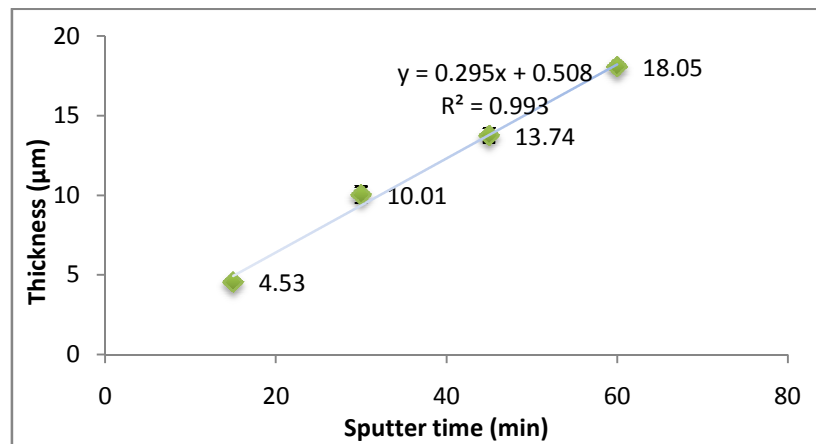
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม ที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 0 ถึง 10

4.2 ผลของความหนาของฟิล์มบางต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาในส่วนของตัวแปรก่อนหน้านี้นี้คือ ผลของค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก ความต้านทานเชิงสัมผัส และความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียม ที่ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 แสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำทั้งความต้านทานเชิงสัมผัส และความต้านทานการกัดกร่อน หรือเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการยอมรับได้สำหรับสมบัติพื้นฐานแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [12] ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของทฤษฎี ดังนั้นในตัวแปรที่สองนี้จึงเลือกใช้ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ร้อยละ 5 เพื่อเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับการทดสอบตัวแปรที่สองนี้โดยค่าความหนาของฟิล์มบางจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

4.2.1 ผลของเวลาที่เคลือบฟิล์มบางต่อความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

วัดความหนาและของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5 จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ เวลาที่ใช้ได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 นาที ผลของความหนาของฟิล์มบางได้แสดงดังรูปที่ 4.8

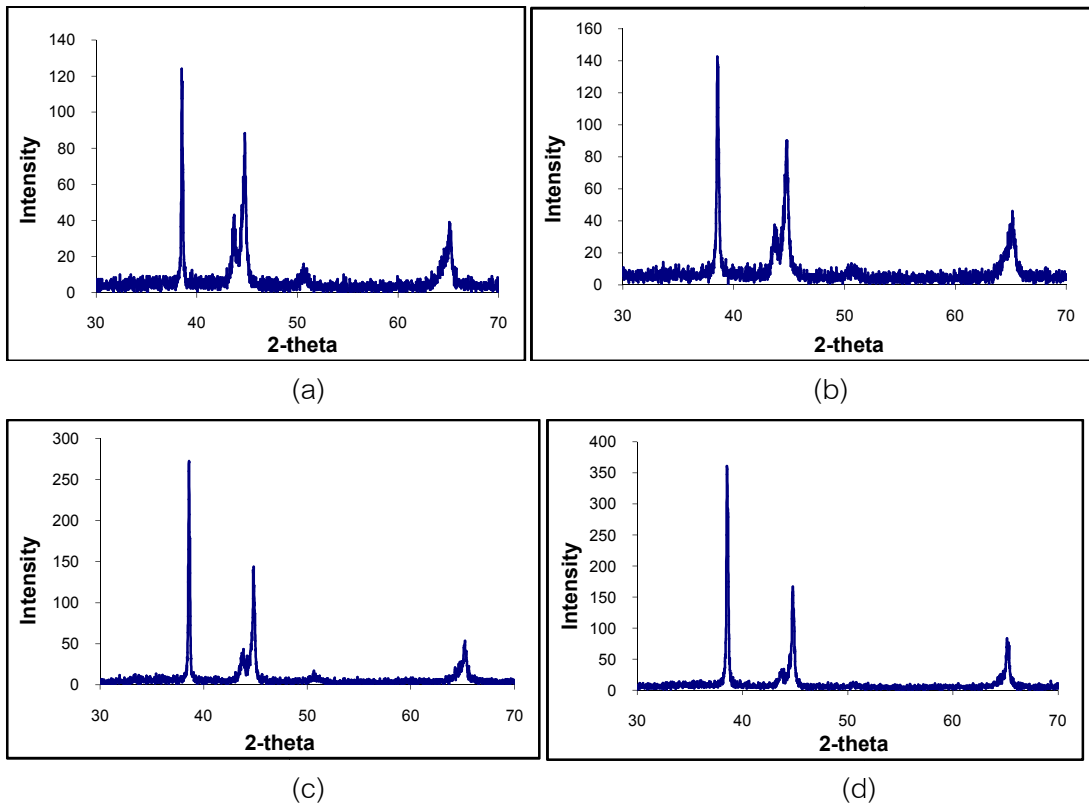


รูปที่ 4.8 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเวลาต่าง ๆ

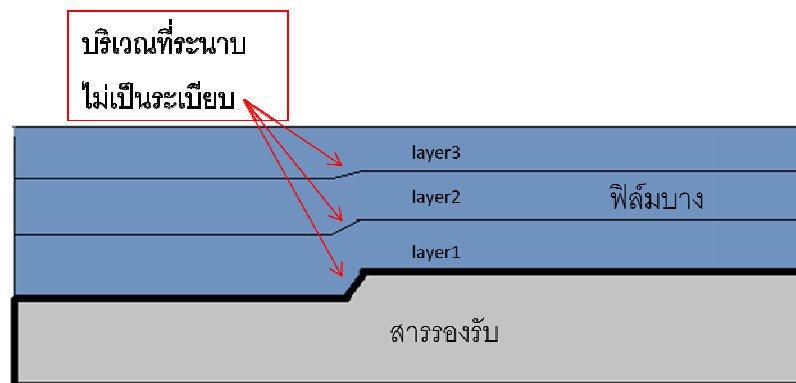
จะสังเกตเห็นว่าความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง และสามารถคำนวณอัตราการเคลือบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็น 0.295 ไมโครเมตรต่อนาที ถือเป็นอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป้าที่ใช้เป็นเป้าอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะทำให้เกิดการสปัตเตอร์ได้ดีกว่าเป้าที่เป็นอลูมิเนียม

นอกจากนี้ความหนาที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางยังสามารถแสดงออกมาให้เห็นในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีค่าความเข้มของยอดสูง (Peak) ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 15 ถึง 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นว่ายอดสูงมีค่าความเข้ม (Intensity) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มบางเพิ่มขึ้น การที่ความเข้มของยอดสูงจะเพิ่มขึ้นนั้นก็ต่อเมื่อความหนาของฟิล์มบางที่นำไปทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะต้องมีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาฟิล์มบางที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีความเป็นระเบียบของระนาบมากกว่าฟิล์มบางที่มีความหนาน้อย ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มบางที่มีความหนาน้อยๆ จะได้รับอิทธิพลของการจัดเรียงโมเลกุลมาจากสารรองรับ (Substrate) ซึ่งผิวของสารรองรับอาจไม่เรียบทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนสารรองรับนั้นไม่เรียบและทำให้ความเป็นระเบียบ

ของระนาบในฟิล์มบางน้อยลงตามไปด้วย การเคลือบฟิล์มบางให้หนามากขึ้นเป็นการช่วยให้ฟิล์มบางมีความเรียบมากขึ้นส่งผลให้ความเป็นระเบียบของระนาบเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ดังนั้นการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก็จะเห็นความเข้มของยอดสูงเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มบางมากขึ้น



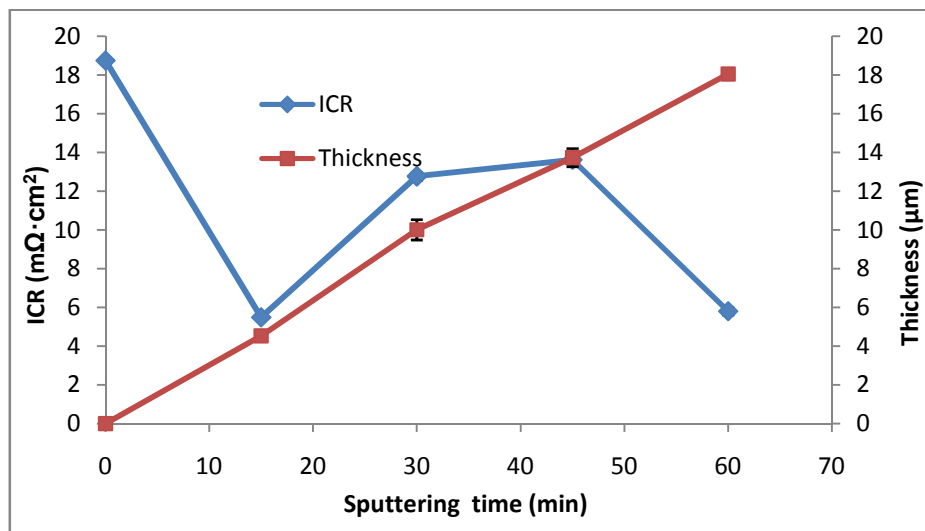
รูปที่ 4.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เลาในการเคลือบเป็น (a) 15 นาที (b) 30 นาที (c) 45 นาที และ (d) 60 นาที



รูปที่ 4.10 ความไม่เป็นระเบียบของระนาบของฟิล์มบางที่เกิดจากความไม่เรียบบริเวณผิวสารรองรับ

4.2.2 ผลของความหนาของฟิล์มบางต่อความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

ผลของความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้ค่าความดันแก๊สย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ร้อยละ 5 โดยความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง เวลาที่ใช้ในกระบวนการเคลือบได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 นาที ผลของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 (ทอร์คของการอัด 200 bl.in)



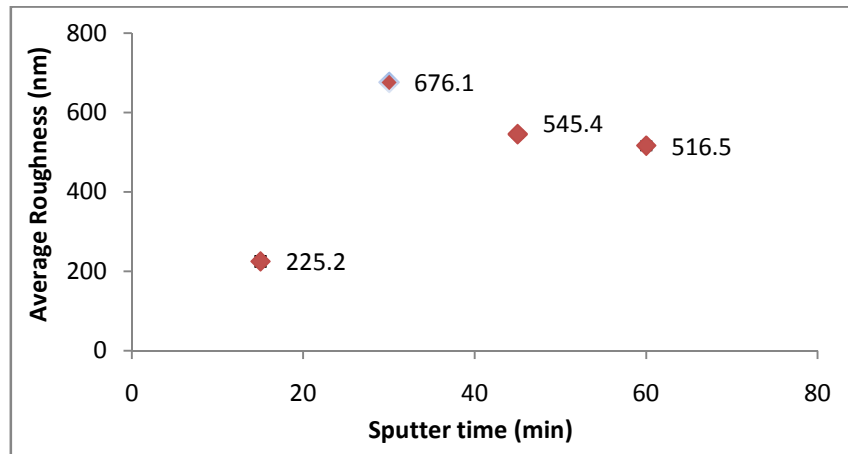
รูปที่ 4.11 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาต่างๆ

จะสังเกตเห็นว่าแนวโน้มของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสไม่ได้ขึ้นกับความหนาของฟิล์มบางเพียงอย่างเดียว ถ้าขึ้นกับความหนาของฟิล์มบางเพียงอย่างเดียวผลของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงโดยค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของตัวนำ หรือในที่นี้หมายถึงความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้นี้ อาจมาจากผลของปัจจัยอื่นร่วมด้วย ได้แก่ ความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบาง

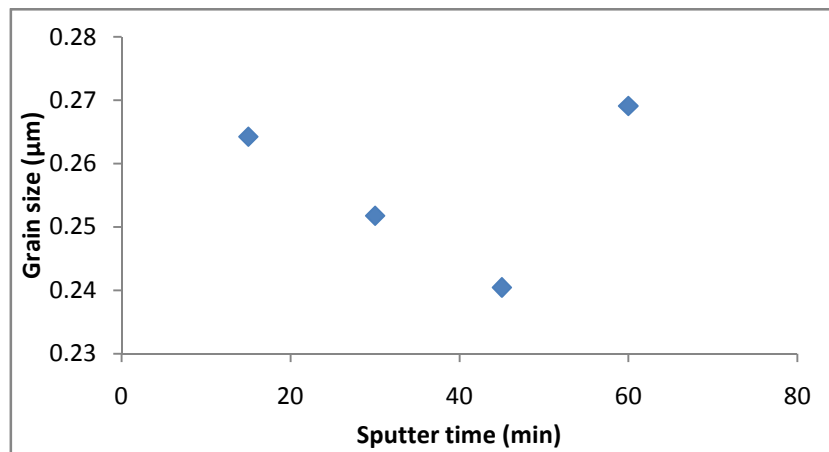
เมื่อพิจารณาความขรุขระ (Roughness) ของฟิล์มบาง วัดความขรุขระของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไน

ไตรด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้แนวโน้มของความขรุขระ (Roughness) ของฟิล์มบางมีค่าที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง 15 ถึง 30 นาที หรือช่วงความหนา 4.53 ถึง 10.01 ไมโครเมตร แล้วลดลงในช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง 30 ถึง 60 นาที หรือในช่วงความหนา 10.01 ถึง 18.05 ไมโครเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเกิดของฟิล์มบางที่มีรูปแบบเป็นอะตอมหรือโมเลกุล โดยอะตอมจะกระจายทั่วไปบนแผ่นรองรับซึ่งเมื่อเคลื่อนที่มาถึงแผ่นรองรับจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวของแผ่นรองรับ เมื่อเวลาผ่านไปอะตอมเหล่านี้จะเริ่มติดกับอะตอมตัวอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงและเริ่มมีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพลังงานที่เหลืออยู่ ซึ่งอะตอมที่เริ่มมีการยึดเหนี่ยวจะเคลื่อนที่ได้น้อยหรืออาจหยุดนิ่งแต่จะมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยวๆ ในขณะเดียวกันอะตอมก็จะเริ่มมีการยึดเหนี่ยวกับอะตอมเดี่ยวข้างเคียงมากขึ้นเรื่อยๆ การเกิดของฟิล์มขั้นนี้เรียกว่า Nucleation stage ซึ่งนำไปสู่การเกิดเป็นหย่อม หรือเรียกว่า Island ที่เสถียร จากนั้นแต่ละหย่อมก็จะเริ่มเชื่อมติดกันและเริ่มมีการฟอร์มตัวโดยมีโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น ซึ่งขั้นนี้เรียกว่า ขั้นตอนการรวมตัว (Coalescence stage) จนกระทั่งแต่ละผลึกมาเชื่อมต่อกันเกิดเป็นฟิล์มบางที่ความหนาเฉลี่ยประมาณ 100 อังสตรอม แต่ละขั้นของการเกิดของฟิล์มแสดงในรูปที่ 2.18 [24] เมื่อเชื่อมติดกันจนกลายเป็นฟิล์มบางแล้วกระบวนการเกิดของฟิล์มบางที่กล่าวมาจะเกิดซ้ำอีกที่ผิวของฟิล์มบางชั้นแรกทำให้เกิดการพอกพูน (Deposition) กันทำให้ฟิล์มบางหนาขึ้นเรื่อยๆ และแนวโน้มความขรุขระของฟิล์มบางก็จะเพิ่มแล้วลดลงเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

การเปลี่ยนแปลงของความขรุขระ (Roughness) ของฟิล์มบางทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟิล์มบางกับผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) เปลี่ยนตามไปด้วย เมื่อความขรุขระ (Roughness) ของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสลดลงในทางตรงกันข้ามเมื่อความขรุขระของฟิล์มบางลดลงทำให้ปริมาณพื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าขนาดของเกรนที่เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 60 นาที มีขนาดสูงสุดเมื่อเทียบกับขนาดของเกรนที่ค่าเวลาในการเคลือบอื่นๆ ขนาดของเกรน (Grain size) ที่สูงขึ้นเหตุเนื่องมาจากหลักการเกิดของฟิล์มบางดังได้กล่าวมา [24] ทำให้ค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงได้เมื่อความหนาของฟิล์มบางเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสของฟิล์มบางกับผ้าคาร์บอนโดยเมื่อขนาดของเกรนสูงขึ้นทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.12 ความขรุขระ (Roughness) ของฟิล์มบางเมื่อเวลาในการเคลือบเปลี่ยนแปลงไป

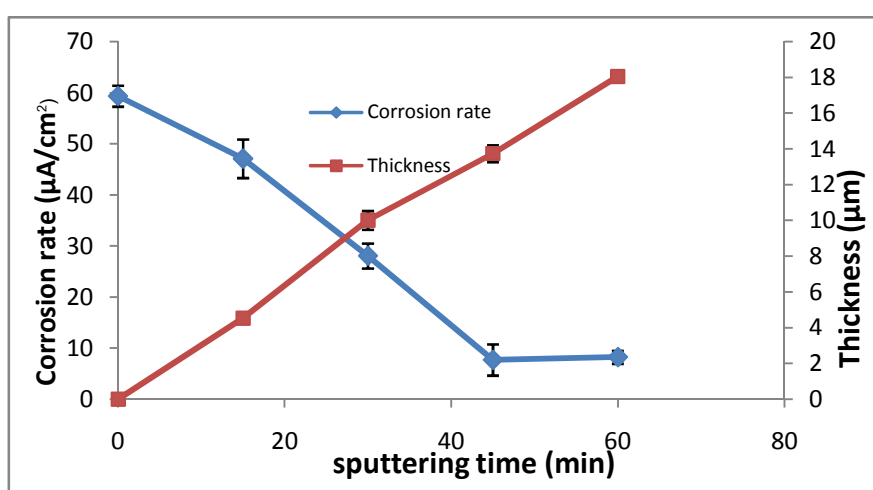


รูปที่ 4.13 ขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มบางเปลี่ยนแปลงไป

จากผลความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 จึงทำให้ความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงเนื่องจากสามปัจจัยที่ได้กล่าวมา ได้แก่ ความหนาของฟิล์มบาง (Film thickness) ความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบาง แต่จะสังเกตเห็นว่าผลของความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางต่อความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ จะเห็นเด่นชัดมากกว่าผลของความหนาของฟิล์มบาง (Film thickness)

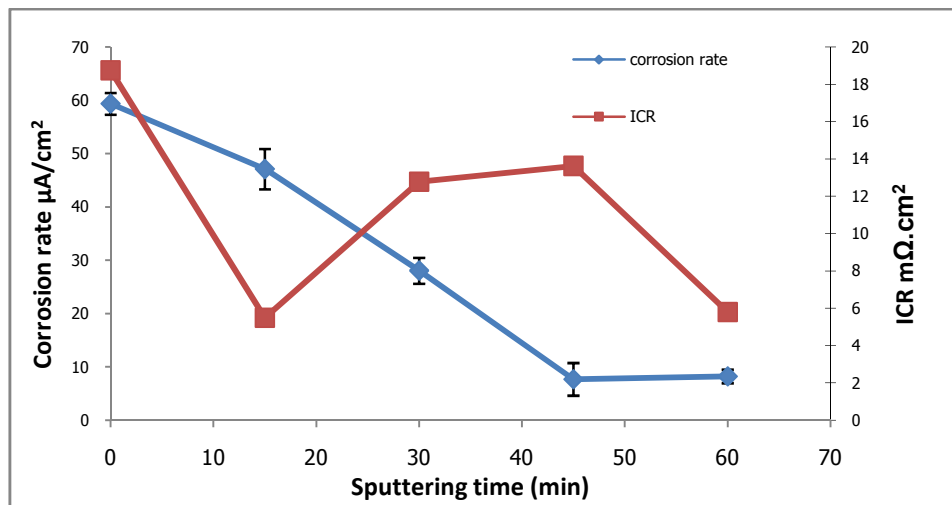
4.2.3 ผลของความหนาของฟิล์มบางต่ออัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

สมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบางเป็นอีกสมบัติที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลของความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ต่อสมบัติการกัดกร่อนของฟิล์มบาง จากผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.14 ดังที่ได้กล่าวมาความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะหนามากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เพิ่มขึ้นหรือความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีความหนามากขึ้น และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงของเวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 45 ถึง 60 นาที หรือช่วงความหนา 13.74 ถึง 18.05 ไมโครเมตร จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการเคลือบฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์สามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มบางให้ดีขึ้น ค่าอัตราการกัดกร่อนเริ่มคงที่เมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เป็น 45 นาที หรือความหนาเป็น 13.74 ไมโครเมตร และจากแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า การเพิ่มความหนามากขึ้นอีกไม่น่าจะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนไปให้ต่ำลงไปได้อีก



รูปที่ 4.14 ค่าอัตราการกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาในการเคลือบฟิล์มบางค่าต่างๆ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะได้ดังรูปที่ 4.15 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าที่เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 60 นาที หรือความหนาของฟิล์มบาง 18.05 ไมโครเมตร จะแสดงค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำทั้งสองสมบัติ หรือเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการยอมรับได้สำหรับสมบัติพื้นฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [12] ดังที่ได้กล่าวไว้ในภาคส่วนของทฤษฎี



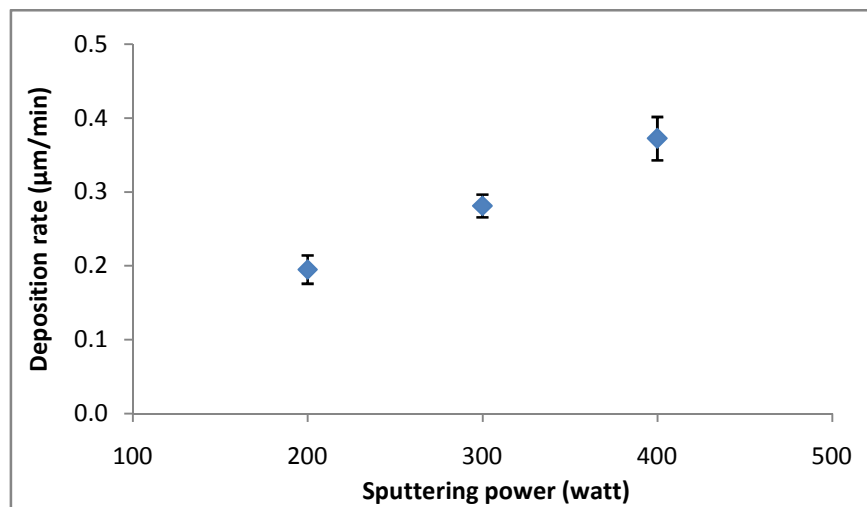
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เวลาในการเคลือบฟิล์มบางค่าต่างๆ

4.3 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาในส่วนของตัวแปรก่อนหน้านี้นี้คือ ผลของค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง และความหนาของฟิล์มบางที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก ความต้านทานเชิงสัมผัส และความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ดังนั้นในตัวแปรที่สามนี้จึงเลือกใช้ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์และฟิล์มบางอะลูมิเนียมเป็นร้อยละ 5 และความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ 10 ไมโครเมตร เพื่อเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับการทดสอบตัวแปรค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะเปลี่ยนจาก 200 ถึง 400 วัตต์ เพื่อศึกษาผลของค่ากำลังไฟฟ้าต่อสมบัติ โครงสร้างผลึก ความต้านทานเชิงสัมผัส และความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

4.3.1 ผลของกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการเคลือบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

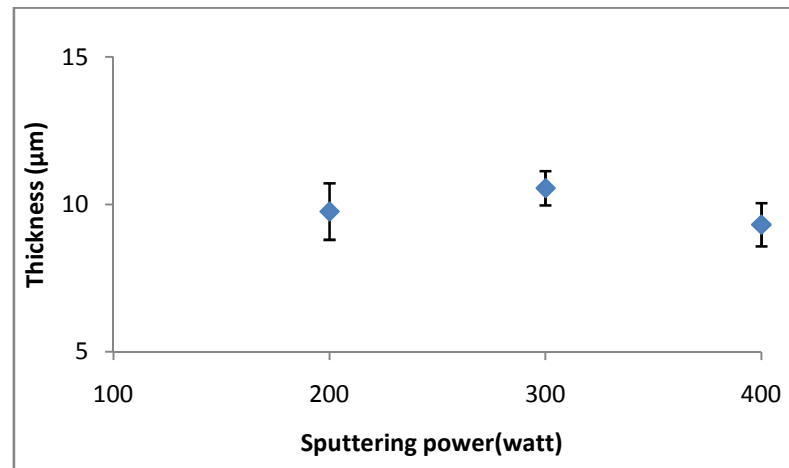
โดยปกติแล้วกระบวนการดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงจะต้องมีพลังงานที่ใช้ในการไอออไนซ์อะตอมของแก๊สอาร์กอน (Ar) ที่ใส่เข้าไปภายในระบบภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) ให้อยู่ในสถานะไอออนบวก (Ar^+) เพื่อรักษาภาวะโกลวดิสชาร์จภายในระบบโดยรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง (High voltage DC power supply) อัตราไอออไนเซชันของแก๊สอาร์กอน (Ar) ขึ้นกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ให้เข้าสู่ระบบดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ให้เข้าไปในระบบมีค่าสูงก็จะสามารถไอออไนซ์แก๊สอาร์กอน (Ar) ได้มากขึ้นทำให้เกิดอะตอมของแก๊สอาร์กอนที่อยู่ในสถานะไอออนบวกมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการชนของแก๊สอาร์กอนในสถานะไอออนบวก (Ar^+) กับเป้าอะลูมิเนียมเกิดมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นอะตอมของอะลูมิเนียมก็จะสามารถหลุดออกจากเป้าได้จำนวนมากขึ้นทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์บนเหล็กกล้าไร้สนิมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์



รูปที่ 4.16 อัตราการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์

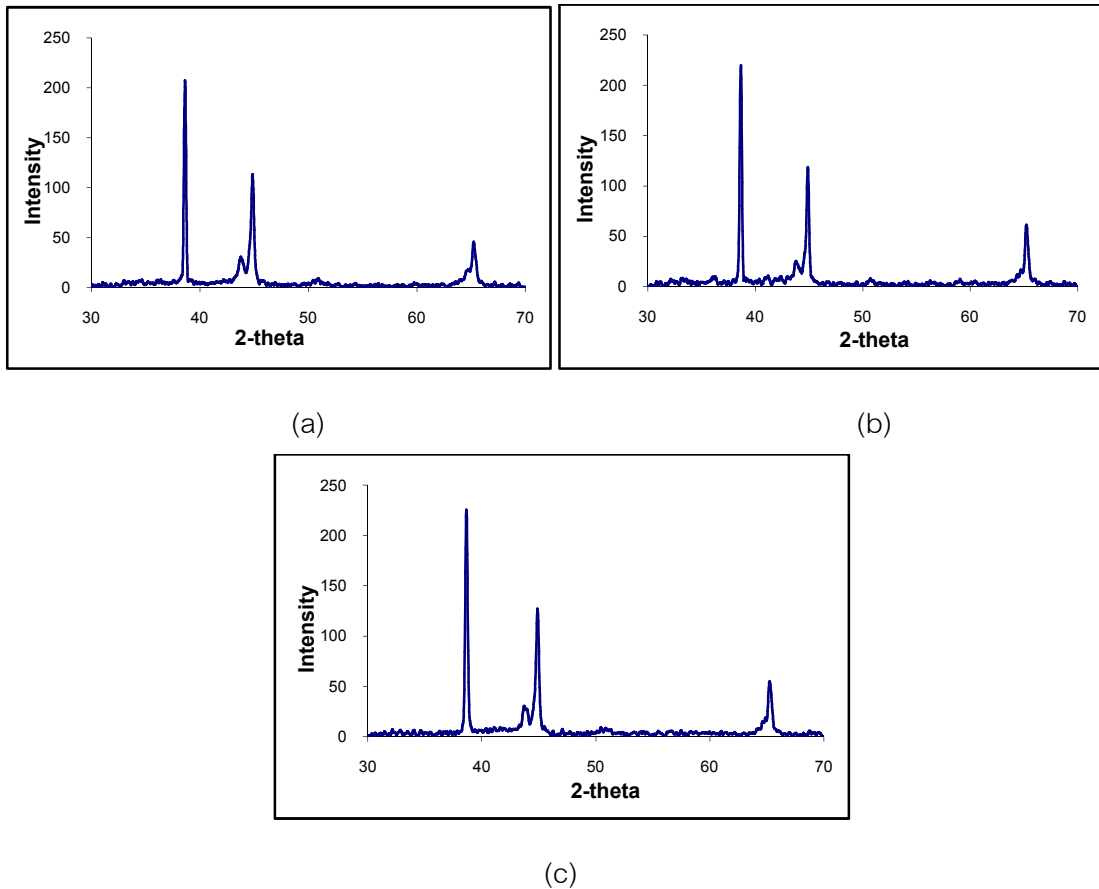
จากอัตราการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ดังรูปที่ 4.16 เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มบางจึงได้ทำการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเป็น 50 นาที 37.5 นาที และ 25 นาที สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ 200 วัตต์

300 วัตต์ และ 400 วัตต์ ตามลำดับ ทำให้ได้ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีค่าประมาณ 10 ไมโครเมตร (ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดเท่ากับ 0.96) ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่กำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์มบาง 200 ถึง 400 วัตต์

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอีกวิธีที่สามารถยืนยันได้ว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาที่ใกล้เคียงกัน โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะแสดงความเข้ม (Intensity) ของยอดสูง (Peak) ออกมามีความเข้ม (Intensity) ที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 การเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเป็นการเพิ่มปริมาณในการไอออไนซ์สำหรับแก๊สอาร์กอนที่ทำหน้าที่การชนเป้าเพื่อให้อะตอมของอะลูมิเนียมให้มีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้อะตอมของอะลูมิเนียมที่หลุดจากเป้ามี่จำนวนมากขึ้นตามไปด้วย หลังจากนั้นอะตอมอะลูมิเนียมก็จะสร้างพันธะกับอะตอมไนโตรเจนได้มากขึ้นตามไปด้วยเป็นสาเหตุให้อัตราการเคลือบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์สูงขึ้น โดยองค์ประกอบของฟิล์มบางไม่เปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

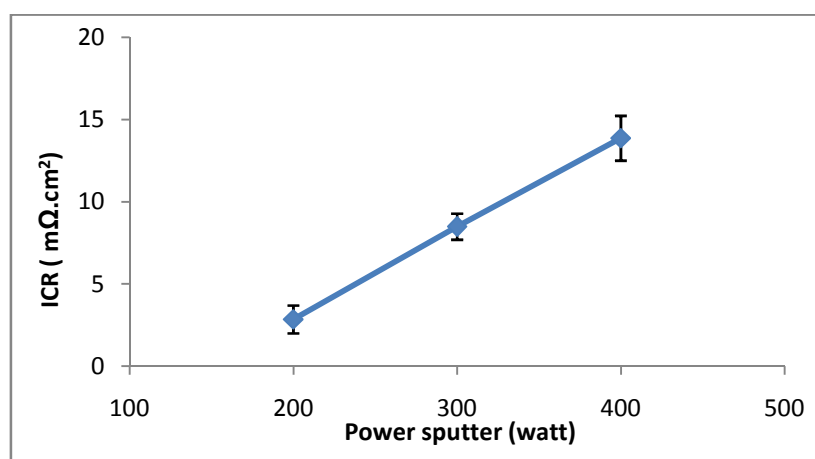


รูปที่ 4.18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่กำลังไฟฟ้า (a) 200 วัตต์ (b) 300 วัตต์ และ (c) 400 วัตต์

4.3.2 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

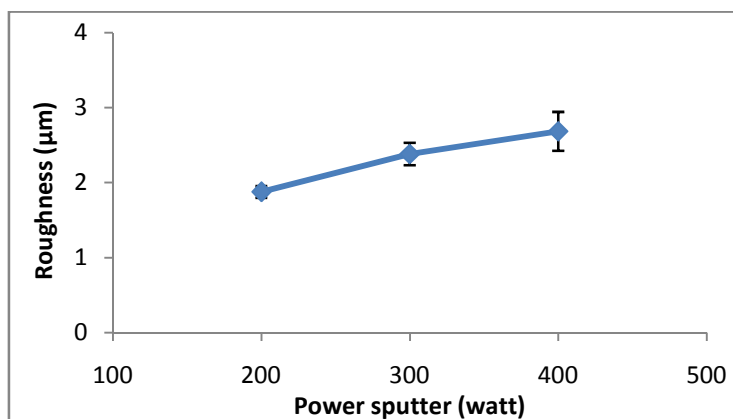
ผลของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ร้อยละ 5 และความหนาของฟิล์มบาง 10 ไมโครเมตร โดยค่ากำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนจาก 200 ถึง 400 วัตต์ ผลของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.19 (ที่ทอร์ค 200 lb.in) จากผลการทดลองพบว่า แนวโน้มของความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 200 วัตต์ ให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3 มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร อาจเนื่องมาจากการใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่างกันในการเคลือบฟิล์มบางส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

บางที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์



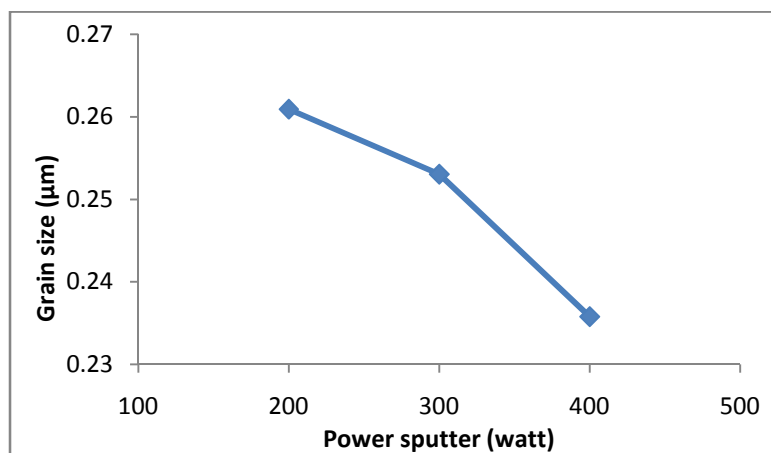
รูปที่ 4.19 ความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์

เมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ไปทดสอบหาความขรุขระ (Roughness) ของผิวฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ผลพบว่าแนวโน้มของความขรุขระ (Roughness) ของผิวฟิล์มบางเพิ่มตามการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง เนื่องจากการจัดเรียงของโมเลกุลของสารเคลือบที่มีอัตราการเคลือบฟิล์มบางต่ำบนสารรองรับ (Substrate) จะมีการจัดเรียงได้ดีกว่าการเคลือบฟิล์มที่มีอัตราการเคลือบฟิล์มบางสูง ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางจึงส่งผลต่อความขรุขระของผิวฟิล์มบาง กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 200, 300 และ 400 วัตต์ มีความขรุขระ 1.88, 2.38 และ 2.68 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อคิดเป็นร้อยละของการเพิ่มความขรุขระของฟิล์มบางสำหรับค่าน้อยที่สุดกับค่ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 43.07 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงพอที่จะส่งผลต่อปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์กับผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) ในขั้นตอนการอัดเพื่อทดสอบความต้านเชิงสัมผัสได้ ฟิล์มบางที่มีความขรุขระมากจะทำให้ปริมาณพื้นที่สัมผัสน้อยลง ดังนั้นความขรุขระของฟิล์มบางจึงเป็นอีกเหตุผลที่ทำให้แนวโน้มของความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์



รูปที่ 4.20 ความขรุขระของผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์

เมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ไปทดสอบหาขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบาง พบว่าแนวโน้มของขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางลดลงเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงของโมเลกุลของสารเคลือบที่อัตราการเคลือบฟิล์มบางต่ำ บนสารรองรับ (Substrate) จะมีการจัดเรียงได้ดีกว่าการเคลือบฟิล์มที่มีอัตราการเคลือบฟิล์มบางสูง ทำให้โมเลกุลของอะลูมิเนียมไนไตรด์สามารถจัดเรียงชิดกันได้ดีทำให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นหย่อมๆ หรือเรียกว่า Island ที่มีขนาดใหญ่กว่าการเคลือบด้วยอัตราการเคลือบสูงๆ [24] ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางจึงส่งผลให้ขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบาง และฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200, 300 และ 400 วัตต์ มีขนาดของเกรน 0.26, 0.25 และ 0.24 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อคิดเป็นร้อยละของการเพิ่มขนาดของเกรน (Grain size) ของผิวฟิล์มบางสำหรับค่าน้อยที่สุดกับค่ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 10.7 ถ้าสมมติว่าเกรนมีลักษณะเป็นวงกลมสามารถคิดเป็นร้อยละของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของเกรนสำหรับค่าน้อยที่สุดกับค่ามากที่สุดเป็นร้อยละ 22.5 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงพอที่จะส่งผลต่อปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์กับผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) ในขั้นตอนการอัดเพื่อทดสอบความต้านเชิงสัมผัสได้ ฟิล์มบางที่มีขนาดของเกรน (Grain size) น้อยจะทำให้ปริมาณพื้นที่สัมผัสลดลงตามไปด้วย ดังนั้นขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางจึงเป็นอีกเหตุผลที่ทำให้แนวโน้มของความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์



รูปที่ 4.21 ขนาดของเกรนของผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ค่ากำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์

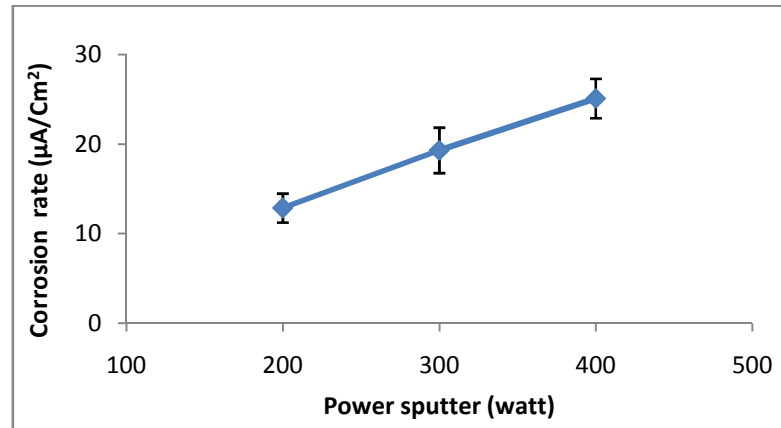
จากผลความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบางดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 สามารถยืนยันว่าการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าจะทำให้ความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของ ความขรุขระ (Roughness) และขนาดของเกรน (Grain size) ของฟิล์มบาง

4.3.3 ผลของกำลังไฟฟ้าต่ออัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5 และความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ 10 ไมโครเมตร และใช้กำลังไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 200, 300 และ 400 วัตต์ เมื่อนำมาทดสอบอัตราการกัดกร่อน ผลพบว่าแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบฟิล์มบางด้วยกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ แสดงค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 12.9 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

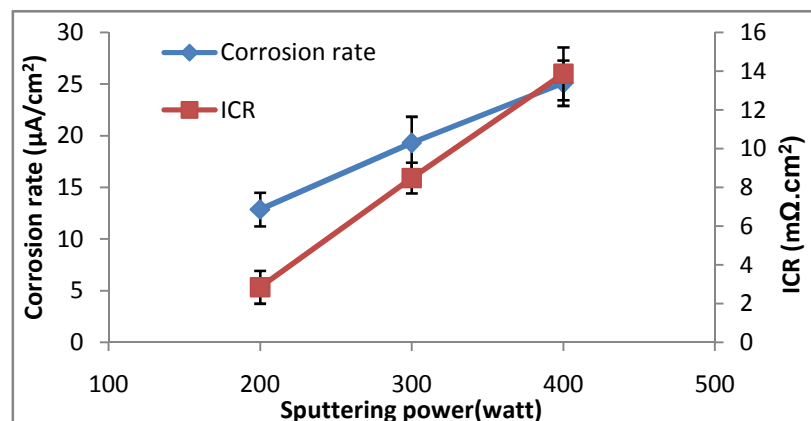
เมื่อพิจารณาผลของค่าความขรุขระ (Roughness) ของผิวฟิล์มบางที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ซึ่งฟิล์มบางที่มีความขรุขระ (Roughness) ของผิวน้อยจะช่วยลดพื้นที่สัมผัสกับกรดให้น้อยลงหรือเป็นการลดขนาดของหลุมที่จะให้กรดแทรกตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของฟิล์มบางทำให้ป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion) [25] ได้ดีกว่าฟิล์มบางที่มีความขรุขระมากๆ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่า

อัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.22 อัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่ กำลังไฟฟ้า 200 ถึง 400 วัตต์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์จะไดดังรูปที่ 4.23 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าที่ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง 200 วัตต์ แสดงค่าของสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนมีค่าต่ำที่สุด เป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการยอมรับได้สำหรับสมบัติพื้นฐานสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [10] ดังที่ได้กล่าวไว้ในภาค ส่วนของทฤษฎี



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและสมบัติการกัดกร่อนที่ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง 200 ถึง 400 วัตต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยศึกษาผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบาง และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ที่ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยการสปัตเตอริงเป้าสารเคลือบที่เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 สามารถสรุปได้ดังนี้

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง โดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ความดัน 6×10^{-3} มิลลิบาร์ ใช้กำลังไฟฟ้าในการสปัตเตอริง 300 วัตต์ ที่อุณหภูมิห้องที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนต่างๆ พบว่าสามารถเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ Wurtzite (hexagonal) บนสารรองรับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ Wurtzite (hexagonal) จะปรากฏชัดเจนเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 10 ส่วนค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 3 และ 5 พบว่ายอดสูงของพีคของอะลูมิเนียมไนไตรด์ในฟิล์มบางจะเด่นชัดกว่า ส่วนผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบางพบว่า ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 3 ไม่สามารถระบุค่าได้เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนภายในฟิล์มมีน้อยเกินไป ส่วนค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5, 10 และ 50 พบว่ามีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบโดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสูตรอย่างง่ายได้เป็น $\text{AlN}_{0.08}$ $\text{AlN}_{0.54}$ และ $\text{AlN}_{0.6}$ ตามลำดับ ในส่วนของผลอัตราการกัดกร่อนพบว่า แนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงเมื่อค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดได้จากค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 5.8 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และผลของการทดสอบความต้านทานเชิงสัมผัสพบว่า แนวโน้มของความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มปริมาณองค์ประกอบไนโตรเจนภายในฟิล์มบาง หรือเพิ่มตามค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้จากค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 มีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้จากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง

อะลูมิเนียมไนไตรด์ ดังนั้นจึงสนใจที่จะนำค่าความต้านย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 เป็นตัวแปรควบคุมสำหรับการศึกษิตัวแปรต่อไป

ส่วนการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางต่อสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ซึ่งการเพิ่มความหนาของฟิล์มบางโดยการเพิ่มเวลาในการเคลือบฟิล์มบางให้มากขึ้น โดยการสับเตอริงที่ความต้านย่อยของแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางจากร้อยละ 5 และกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ พบว่า มีอัตราการเคลือบฟิล์มบาง 0.3 ไมโครเมตรต่ออนาที โดยความหนาของฟิล์มบางที่เวลาการเคลือบ 15 30 45 และ 60 นาที มีความหนาเป็น 4.53 10.01 13.74 และ 18.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบความต้านทานเชิงสัมผัสพบว่า แนวโน้มของความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้จากฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที และ 60 นาที มีค่าเป็น 5.5 และ 5.8 มิลลิโอมิตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่ามีความต้านทานที่ต่ำที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงเมื่อค่าความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดได้จากค่าความต้านย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 และเวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 60 นาที มีค่าเท่ากับ 8.2 ไมโครแอมปีต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบฟิล์มบางเพื่อป้องกัน (Protective layer) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมคือใช้เวลาในการเคลือบ 60 นาที (หนา 18 ไมโครเมตร)

ผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า 200 300 และ 400 วัตต์ โดยการสับเตอริงที่ความต้านย่อยของแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางจากร้อยละ 5 และควบคุมความหนาของฟิล์มบางให้มีค่าประมาณ 10 ไมโครเมตร พบว่าอัตราการเคลือบของฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มตามการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ผลการทดสอบความต้านทานเชิงสัมผัสพบว่า แนวโน้มของความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งฟิล์มบางที่เคลือบด้วยการใช้กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางที่เคลือบด้วยการใช้กำลังไฟฟ้า 300 และ 400 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 2.9 มิลลิโอมิตารางเซนติเมตร ส่วนแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดได้จากค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 200 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 12.9 ไมโครแอมปีต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นในส่วนการศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางต่อสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่น

เหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ สามารถสรุปได้ว่าการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ 200 วัตต์ มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นเงื่อนไขในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ เพื่อเป็นชั้นของการป้องกัน (Protective layer) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

จากผลขององค์ประกอบของไนโตรเจนภายในฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบาง และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 ความหนาของฟิล์มบางประมาณ 10 ไมโครเมตร และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 200 วัตต์ มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นภาวะในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์ เพื่อเป็นชั้นของการป้องกัน (Protective layer) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. การอบฟิล์มบาง (Annealing) เป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารรองรับหลังการเคลือบเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์
2. เหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้เป็นสารรองรับควรมีความหนากว่านี้ เพื่อลดความโค้งงอของขณะอยู่ระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไนไตรด์

รายการอ้างอิง

- [1] Middleman, E., Kout, W., Vogelaar, B., Lenssen, J., and Dewaal, E. Bipolar plate for PEM fuel cells, *Journal of Power Source* 118 (2003):44-46.
- [2] Muller, A., Kauranen, P., Ganski, A.V., and Hell, B. Injection moulding of graphite composite bipolar plates, *Journal of Power Sources* 154 (2006):467-471.
- [3] Santagata, D.M., Sere, P.R., Elsner, C.I., and Sarli, A.R. Evaluation of the surface treatment effect on the corrosion performance of paint coated carbon steel, *Progress in Organic Coatings*, 33 (1998):44-54.
- [4] Habib, M.A., Gan, S.W. and Rahman, M. Fabrication of complex shape electrodes by localized electrochemical deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009):4453-4458.
- [5] Ensinger, w., Klein, J., Usedom, P. and Rauschenbach, B. Characteristic features of an apparatus for plasma immersion ion implantation and physical vapour deposition, *Surface and Coatings Technology*, 93 (1997):175-180.
- [6] Laimer, J., Fink, M., Mitterer, C., and Sto ri, H. Plasma CVD of alumina—Unsolved problems, *Vacuum*, 80 (2005):141-145.
- [7] Metha, V. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of power sources*, 114 (2003): 32-53.
- [8] Peighambardoust, S.J., Rowshanzamir, S. and Amjadi, M. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications, *International journal of hydrogen energy*, 35(2010):9349 - 9384.
- [9] Wen, C.Y., Lin, Y.S. and Lu, C.H. Performance of a proton exchange membrane fuel cell stack with thermally conductive pyrolytic graphite sheets for thermal management, *Journal of Power Sources*, 189 (2009):1100-1105.
- [10] Dhakate, S.R., Mathur, R.B., Kakati, B.K., and Dhami, T.L. Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell. *Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007): 4537-4543.

- [11] HARC center for fuel cells research and applications. Carbon filled polymer blend based bipolar plates for PEM fuel cell stack. Technology brief [Online]. 2006. Available from: [http://files.harc.edu/Projects/FuelCell/Reports/ Core Technical Report/BipolarPlates.pdf](http://files.harc.edu/Projects/FuelCell/Reports/Core%20Technical%20Report/BipolarPlates.pdf). [2006,July].
- [12] Hermann, A., Chudhuri, T., and Spagnol, P. Bipolar plate for PEM fuel cells: A review. *Journal of Hydrogen Energy*, 30 (2005): 1297-1302.
- [13] Lee, S.H., Huang, C.H., and Chen, Y.P. Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell. *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (2003): 688-693.
- [14] Lee, S.J., Lai J.J., and Huang, C.H. Stainless steel bipolar plates, *Journal of Power Sources* 145 (2005):362–368.
- [15] Metha, V. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of power sources* 114 (2003): 32-53.
- [16] Pecker, D., and Bernstein, I.M. *Handbook of Stainless Steel*, New York: Mc Graw Hill, 1977.
- [17] Litimein, F., Bouhaf, B., Dridi, Z., and Ruterana, Z. The electronic structure of wurtzite and zincblende AlN: an ab initio comparative study, *New Journal of Physics* 4 (2002) 64:64.1–64.12.
- [18] Mortet, V., Nesladek, M., Haenen, K., Morel, A., D'Olieslaeger, M., and Vanecek, M. Physical properties of polycrystalline aluminium nitride films deposited by magnetron sputtering, *Diamond and Related Materials*, Volume 13, Issues 4-8, April-August 2004:1120-1124.
- [19] Xiong, J., Gu, H., Hu, K., and Hu, M. Influence of substrate metals on the crystal growth of AlN films, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* Volume 17, Number 1, February 2010:Page 98.
- [20] Nakamura, Y., Watanabe, Y., Hirayama, S., and Naota, Y. Effect of ion beam energy on the synthesis of oriented aluminium nitride thin films, *Surface and Coatings Technology* 76-77 (1995):337-340.

- [21]. Kar, J.P., Bose, G., and Tuli, S. Influence of nitrogen concentration on grain growth, structural and electrical properties of sputtered aluminum nitride films, *Scripta Materialia* 54 (2006): 1755–1759.
- [22] Ohring, M. *The Materials Science of Thin Films*. San Diego: Academic Press, 1992.
- [23] Poonaudom, K. Preparation of Zinc Oxide Transparent Conducting Films. Master's thesis, Department of Physics Faculty of Science Chulalongkorn University, 1997.
- [24] Chapman, B. *Glow Discharge Process, Sputtering and Plasma Etching*. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [25] Schafer, H., and Stock, H.R. Improving the corrosion protection of aluminium alloys using reactive magnetron sputtering, *Corrosion Science*, 47 (2005):953–964.
- [26] Vacandio, F., Massiani, Y., Gergaud, P., and Thomas, O. Stress, porosity measurements and corrosion behaviour of AlN films deposited on steel substrates, *Thin Solid Films*, 359 (2000):221-227.
- [27] Altun, H., and Sen, S. The effect of DC magnetron sputtering AlN coatings on the corrosion behaviour of magnesium alloys, *Surface & Coatings Technology*, 197 (2005):193– 200.
- [28] Wang, B., Lai, Z.W., and Jiang, C.B. Study of the corrosion protection properties of Al–Zn films synthesized by IBAD, *Journal of Materials Processing Technology* 74 (1998):122–125.
- [29] Chen, W., Liu, Q., Zhu, L., and Wang, L. A combinatorial study of the corrosion and mechanical properties of Zn–Al material library fabricated by ion beam sputtering, *Journal of Alloys and Compounds*, 459 (2008):261–266.
- [30] Zhu, J. Shape dependent full width at half maximum of the absorption band in gold nanorods, *Physics Letters A*, Volume 339, Issue 6, 30 May 2005:466-471
- [31] Diffrac Plus # 1 software of the Bruker Analytical X-Ray System (D8 Immediate Measurement) Interpreted using Eva Program which Search – match routine based on a Power Diffraction File and used the PDF-2 Database.

- [32] พรชัย ชินสา, การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตเคลือบโลหะ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [33] ปฐมพงศ์ ชนะนิล, ผลของพารามิเตอร์ในการสับเตอรต่อการปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ก-1 สมบัติของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 301

ตาราง ก1 องค์ประกอบของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 301 ที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบ	ร้อยละ
คาร์บอน	0.15
แมกนีเซียม	2.00
โพแทสเซียม	0.045
กำมะถัน	0.030
ซิลิกอน	0.75
โครเมียม	16.00-18.00
นิกเกิล	6.00-8.00
ไนโตรเจน	0.10
เหล็ก	Balance

ตาราง ก2 สมบัติกายภาพของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 301 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติกายภาพ	ค่า/หน่วย SI
ความหนาแน่น	7.88 g/ cm ³
ความต้านทานการนำไฟฟ้า	69.5 $\mu\Omega$.cm
ความจุความร้อนจำเพาะ	0.5 kJ/(kg.K)
การนำความร้อน	16.2 w/(m.K)
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน	18.4 $\mu\text{m}/(\text{m.K})$
ความยืดหยุ่น	193,000 MPa
จุดหลอมเหลว	1399-1421 C ^o

ก-2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD)

Model	Bruker AXS, Germany/D8 Advance
Target/Wavelength	Cu/1.5406 °A
Voltage/Current	40 kV/30 mA
Condition	2-theta 10-80 degree, Increment 0.02 degree, scan speed 1 degree per minute
Program used	Diffrac Plus # 1 software of the Bruker Analytical X-Ray System (D8 Immediate Measurement) Interpreted using Eva Program which Search – match routine based on a Power Diffraction File and used the PDF-2 Database

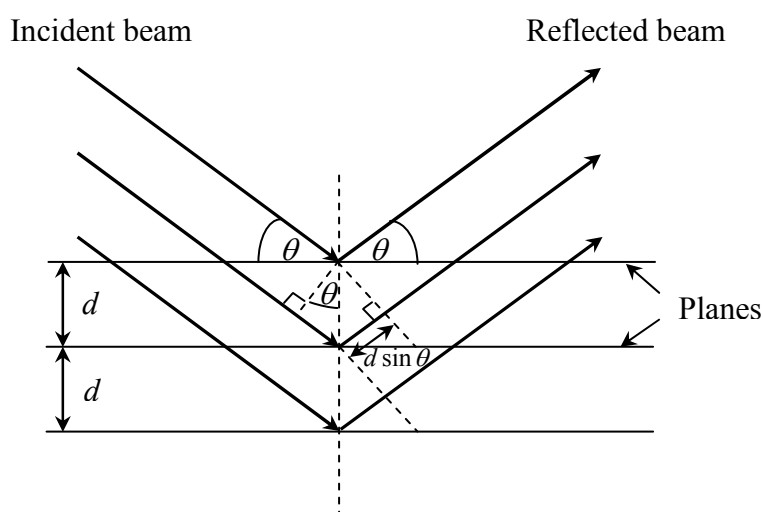
ก-3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

โครงสร้างผลึกของฟิล์มสามารถศึกษาได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ซึ่งทฤษฎีที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ดีมาก และเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นเหมาะสำหรับการนำมาศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยมีความยาวคลื่นในช่วง 0.5 Å ถึง 3 Å ซึ่งสั้นกว่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ของผลึก ในการเกิดการเลี้ยวเบนระนาบของอะตอมต้องเรียงขนานกันในผลึก จากนั้นรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบจะสะท้อนจากแต่ละระนาบของโครงสร้างผลึก โดยการสะท้อนของแต่ละระนาบจะสะท้อนคลื่นในปริมาณที่น้อย ซึ่งมุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน ถ้าของการเลี้ยวเบนจะมีการรวมกันของรังสีสะท้อนจากระนาบที่ขนานกันตามรูปที่ ก-1 ผลต่างของระยะทางที่รังสีเอกซ์สะท้อนจากระนาบที่อยู่ติดกันคือ $2d \sin \theta$ การเลี้ยวเบนของรังสีเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของระยะทางของรังสีเอกซ์เป็นจำนวนเต็ม n ของความยาวคลื่น λ จึงได้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (\text{ก-1})$$

สมการที่ ก-1 รู้จักกันในชื่อของ Bragg's law รูปแบบการรวมรังสีเอกซ์สามารถสังเกตได้จาก การวัดความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 2θ ต่างๆ ซึ่งเป็นมุมของรังสีสะท้อนและรังสีตกกระทบ สำหรับธาตุหรือวัสดุชนิดเดียวกัน ความเข้มของรังสีที่รวมกันจะสูงที่สุดที่มุมการเลี้ยวเบนเดียวกัน ระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) นี้สามารถกำหนดให้เป็น $d = d_{hkl}$ เมื่อ h, k และ l คือดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices)



รูปที่ ก1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบที่ขนานกันในผลึกตาม Bragg's law

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1 การคำนวณค่าความต้านทานเชิงสัมผัส

ข้อมูลการทดลอง ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 301) เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมใน
ไตรต์ โดยรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ความดันแก๊สย่อยของแก๊ส
ไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางร้อยละ 5 และเวลาในการ
เคลือบ 30 นาที

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

$$R_1 = \text{วัดค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด (m}\Omega\cdot\text{cm}^2)$$

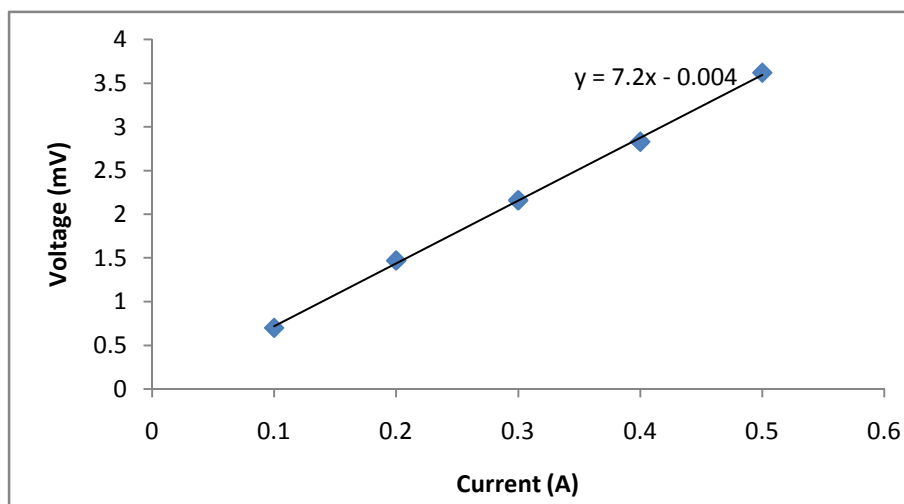
$$R_2 = \text{วัดค่าความต้านทานผิวสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (m}\Omega\cdot\text{cm}^2)$$

วัดค่าความต้านทานสัมผัสเครื่องมือวัด R_1

A คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผ้าคาร์บอน, $A = 1 \text{ cm}^2$
ที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว

I(A)	V(mV)
0	0.7
0.1	1.47
0.2	2.16
0.3	2.83
0.4	3.62
0.5	0.7

นำไปเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม $V = IR$



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของเครื่องมือ

ค่าความต้านทาน

$$R = 7.2 \text{ m}\Omega$$

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือวัด

$$R_1 = R \times A$$

$$R_1 = 7.2 \times 1$$

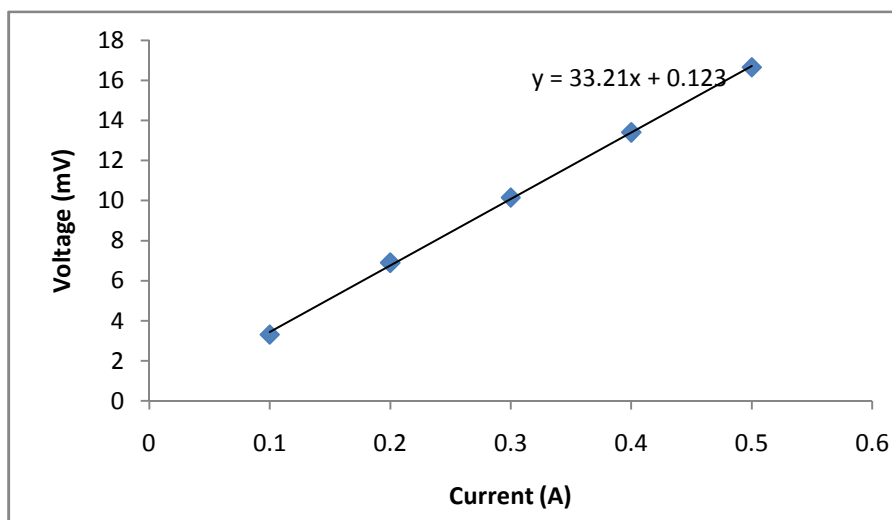
$$R_1 = 7.2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$$

วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสชิ้นงาน R_2

A คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและผ้าคาร์บอน, $A = 1 \text{ cm}^2$

I(A)	V(mV)
0	3.31
0.1	6.9
0.2	10.15
0.3	13.41
0.4	16.66
0.5	3.31

นำไปเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม $V = IR$



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของชิ้นงาน

ค่าความต้านทาน	$R = 32.21 \text{ m}\Omega$
ค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน	$R_2 = R \times A$
	$R_2 = 32.21 \times 1$
	$R_2 = 32.21 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$

หาค่าความต้านทานสัมผัสรวมตามสมการการหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส

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

$$(ICR) = (32.21 - 7.2)/2$$

$$(ICR) = 12.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เชาวลิต สีโสภา เกิดวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษา จากโรงเรียนศรีกระนวนวิทยาคม จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551