



การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางแสงด้วยวิธีสเป็คโตรริง



พิพัฒน์ นันทกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางแสงด้วยวิธีสปัตเตอริง



พิพัฒน์ นันทกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

The deposition of the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films for the optical applications using sputtering  
method



PIPAT NANTAJUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE MASTER DEGREE OF SCIENCE

IN PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

BURAPHA UNIVERSITY

2021

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ พัทฒน์ นันทกุล ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัสถา รัตนะ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภ.พິงบุญ ปานศิลา)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา เกตุแก้ว)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัสถา รัตนะ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภ.พິงบุญ ปานศิลา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญจน์ชญา หงส์เลิศคง  
สกุล)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.นุจรี ไชยมงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

61910072: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: फिल्मบางอลูมิเนียม, फिल्मบางอลูมิเนียมออกไซด์, สเปกโตรริง, สมบัติทางแสง, ลักษณะพื้นผิว, โครงสร้างผลึก, ความทนทานต่อการกัดกร่อน

พื้พัฒนา นันทจุล : การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางแสงด้วยวิธีสปัตเตอริง. (The deposition of the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films for the optical applications using sputtering method) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: รัตนธธา รัตนะ, ภ. พึ่งบุญ ปานศิลา ปี พ.ศ. 2564.

ฟิล์มบางอลูมิเนียมถูกเคลือบบนกระจกสไลด์ ด้วยเทคนิคอานบาลานซ์ แมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยใช้เป้าโลหะอลูมิเนียมความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นเป้าสารเคลือบและใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม 1-15 นาที หลังจากนั้นทำการทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นฟิล์มบางสำหรับปกป้องพื้นผิว ด้วยวิธีแอคทีฟ อานบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง โดยใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สไวปฏิกิริยา แล้วศึกษาผลของระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ โดยวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความทนทานต่อการกัดกร่อน ด้วยเทคนิค UV-VIS spectrophotometer, XRD, SEM และ Potentiostat ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมส่งผลต่อลักษณะพื้นผิว ความเป็นผลึก ค่าการสะท้อนแสงและความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียม โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นระยะเวลา 10 นาที มีลักษณะพื้นผิวเป็นเกรนที่มีขนาดสม่ำเสมอ ทำให้สามารถสะท้อนแสงและทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในช่วงที่ตามองเห็นเท่ากับ 89.33% มีค่า  $I_{corr}$  และ  $E_{corr}$  เท่ากับ  $5.47 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  และ  $-1.89 \text{ V}$  ตามลำดับ และผลการทดลองการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ช่วยป้องกันการกัดกร่อนให้กับพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมแต่ทำให้ค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางมีค่าลดลง โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 10 นาทีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในช่วงที่ตามองเห็นเท่ากับ 81.92% มีค่า  $I_{corr}$  และ  $E_{corr}$  เท่ากับ  $1.36 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  และ  $-1.81 \text{ V}$  ตามลำดับ

61910072: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: Aluminium thin films, Aluminium oxide thin films, Sputtering, Optical properties, Surface morphology, Crystal structure, Corrosion resistance

PIPAT NANTAJUL : THE DEPOSITION OF THE AL/AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> THIN FILMS FOR THE OPTICAL APPLICATIONS USING SPUTTERING METHOD. ADVISORY COMMITTEE: TANATTHA RATTANA, Ph.D., P. PUNGBOON PANSILA, Ph.D. 2021.

Aluminium thin films were coated on glass by unbalanced magnetron sputtering deposition method. A high purity Al (99.999%) was used as the target. The deposition times were varied from 1 to 15 min. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films coated on Aluminium thin films for use as protective layer. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering by using oxygen gas as reactive gas. In this work, the effect of the deposition time on properties of Al thin films and the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films for protective layer on properties of Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films were investigated. The optical properties, crystal structure, surface morphology, and corrosion test were determined by using UV-VIS spectrophotometer, XRD, SEM, and potentiodynamic polarization technique, respectively. The results indicated the surface morphology, crystal structure, optical reflection, and corrosion resistance of Al thin films are significantly influenced by the deposition time. Al thin films deposited for 10 minutes exhibited the most evenly distributed grain sizes, resulting in the highest reflectance of 89.33% in the visible region. And also resulting in the highest corrosion resistance too. While  $I_{corr}$  and  $E_{corr}$  values were equal to  $5.47 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> and -1.89 V, respectively. In this experiment, the Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films showed higher corrosion resistance properties than Al thin films. But less reflectance than Al thin films. While Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films with Al thin films were deposited for 10 minutes resulting in the reflectance of 81.92% in the visible region and  $I_{corr}$  and  $E_{corr}$  values equal to  $1.36 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> and -1.81 V, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์และความช่วยเหลือจากผู้เกี่ยวข้องหลายท่าน ซึ่งให้การสนับสนุน ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนัสถา รัตนะ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภ. พึงบุญ ปานศิลา อาจารย์ประจำคณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรา เกตุแก้ว ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบและขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ทุกท่าน ซึ่งให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขทำให้โครงงานนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุรสิงห์ ไชยคุณ ที่กรุณาให้คำปรึกษารวมทั้งเป็นผู้สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือสำหรับใช้เคลือบฟิล์มบางในงานวิจัยนี้ อีกทั้งขอขอบคุณอาจารย์ ดร. อรรถพล เขยศุภเกตุ และคุณพลากร ขวัญสูงเนิน ที่ให้คำแนะนำ ประสานงานและให้ความช่วยเหลือในการทำงานในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบางเพื่อให้งานเป็นไปอย่างราบรื่น

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยบริการนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (SIF-IN-61910072) และได้รับทุนอุดหนุนทำวิจัยบางส่วนจากคณะวิทยาศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว รวมถึงผู้ที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาของการทำงานวิจัยนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการต่อยอดงานและการประยุกต์ใช้ในอนาคต ตลอดจนแก่ผู้สนใจทั่วไป รวมถึงเป็นแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคตด้วย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 .....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง.....	5
2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง .....	6
2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดีซี สปัตเตอร์ริง .....	8
2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง .....	10
2.5 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง .....	13
2.6 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอกตีฟ สปัตเตอร์ริง.....	14
2.7 โครงสร้างของฟิล์มบาง (Structure zone models).....	16



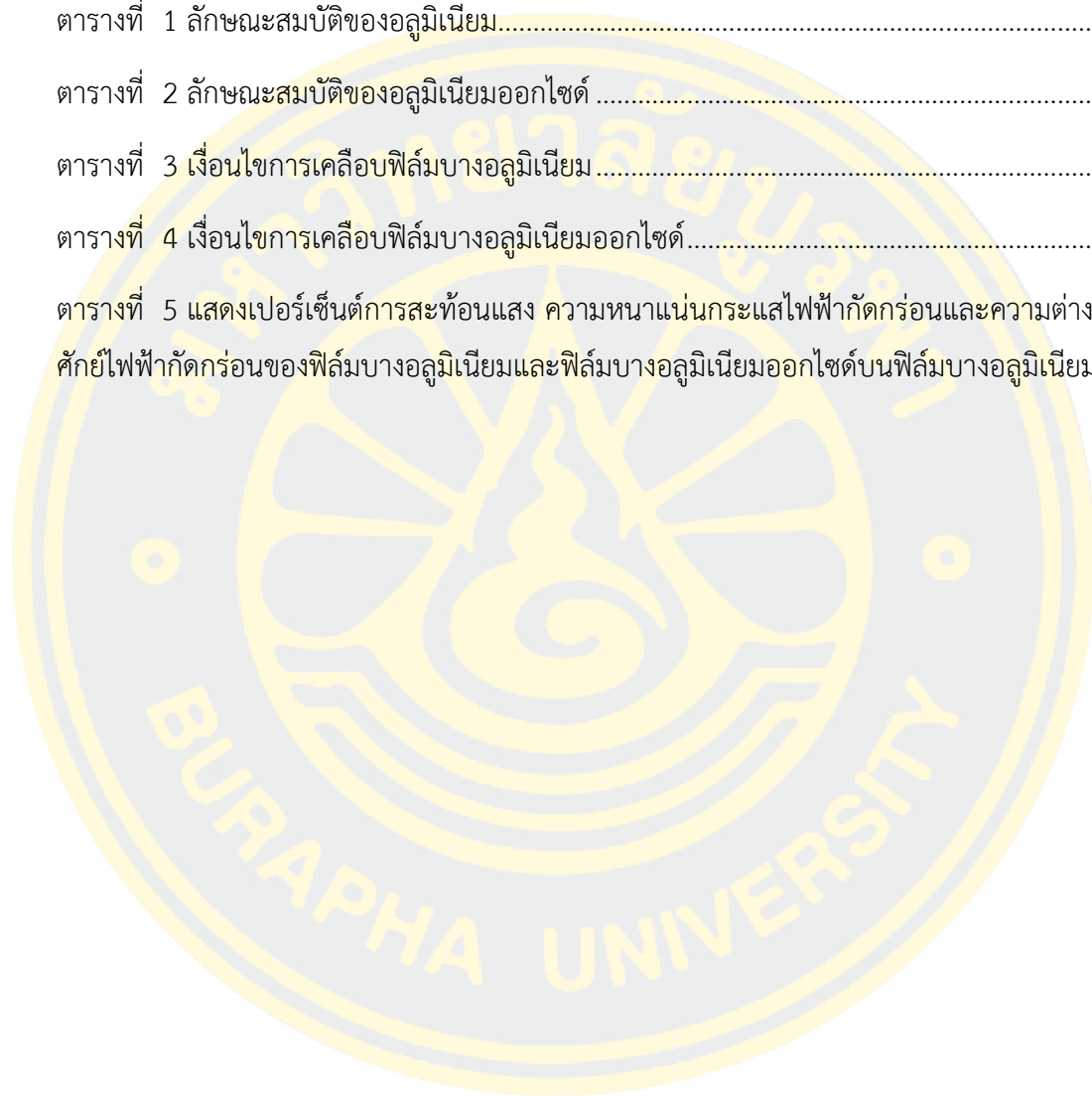
2.8	ฟิล์มบางอลูมิเนียม (Al thin films).....	17
2.9	ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thin films).....	20
2.10	การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง.....	22
2.10.1	ทฤษฎี UV-Visible spectrophotometer.....	22
2.10.2	การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	23
2.10.3	การศึกษาองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิครังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDX or EDS).....	26
2.10.4	การศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าหรือ โพเทนชิโอสแตต (Potentiostat).....	27
2.10.5	การศึกษาโครงสร้างวัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) .....	29
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3	.....	36
วิธีการดำเนินการวิจัย	.....	36
3.1	กรอบแนวคิดการวิจัย.....	36
3.1.1	การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธี ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	36
3.1.2	การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์.....	36
3.2	เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2.1	การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์.....	38
3.2.2	การศึกษาการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง ศึกษาลักษณะทางพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน.....	38
3.3	เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคทีฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	41
3.4	การสร้างภาวะสุญญากาศ.....	42
3.5	การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์.....	44

3.5.1 การทดลองที่ 1 วิธีการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียม.....	44
3.5.2 การทดลองที่ 2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์.....	46
3.6 การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ .....	48
บทที่ 4 .....	49
ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	49
4.1 ผลของการแปรค่าเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ .....	49
4.1.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ .....	49
4.1.2 ผลการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ .....	50
4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์.....	51
4.1.4 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์.....	52
4.1.5 ผลการศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมบน กระจกสไลด์.....	53
4.2 ผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์.....	54
4.2.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์.....	54
4.2.2 ผลการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์ .....	54
4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บน กระจกสไลด์.....	55
4.2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์กระจกสไลด์.....	57
4.3 ผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม .....	58
4.3.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม .....	58
4.3.2 ผลการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม .....	58
4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบาง อลูมิเนียม.....	59
4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว ภาคตัดขวางและองค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์ม บางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม.....	60

4.3.5 ผลการศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม.....	62
4.4 การเปรียบเทียบผลการสะท้อนแสงและความทนทานต่อการกัดกร่อนระหว่างฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม .....	64
4.4.1 ผลการสะท้อนแสง .....	64
4.4.2 การทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน .....	64
4.5 การอภิปรายผลการทดลอง.....	66
บทที่ 5 .....	69
สรุปผล .....	69
ผลของระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์.....	69
ผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม.....	70
บรรณานุกรม.....	72
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	79

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของอลูมิเนียม.....	19
ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์ .....	21
ตารางที่ 3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม .....	45
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์.....	46
ตารางที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักความร้อนและความต่างศักย์ไฟฟ้ากักความร้อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม...	65



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ .....	7
ภาพที่ 2 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง .....	8
ภาพที่ 3 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายึดและกระแสไฟฟ้าในระบบสปีดเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร .....	9
ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก .....	12
ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ .....	12
ภาพที่ 6 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอานาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง .....	14
ภาพที่ 7 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ .....	15
ภาพที่ 8 แสดงแบบจำลองบริเวณโครงสร้างของการเกิดฟิล์มบาง หรือ Structure zone models .....	17
ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างผลึกการจัดเรียงตัวของอะตอมของอลูมิเนียมในลักษณะ Face-Centered Cubic (FCC) Hexagonal Close – Packed (HCP) และ Body-Centered Cubic (BCC) .....	20
ภาพที่ 10 แสดงหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่อง UV-Visible spectrophotometer .....	23
ภาพที่ 11 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Electron Microscope .....	24
ภาพที่ 12 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง .....	25
ภาพที่ 13 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ ....	25
ภาพที่ 14 การลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้นต่าง ๆ มายังชั้น K ซึ่งเส้นทึบเป็นไปตามกฎการเลือก และเส้นประไม่เป็นไปตามกฎการเลือก .....	27
ภาพที่ 15 แสดงแผนผังอย่างง่ายของเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า .....	28
ภาพที่ 16 เงื่อนไขการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามสมการของแบรกก์ .....	30

ภาพที่ 17 วิธี Theta-2Theta ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ การจัดวางตัวอย่างเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และอุปกรณ์ตรวจวัด .....	31
ภาพที่ 18 กรอบแนวคิดการวิจัย .....	37
ภาพที่ 19 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอกติฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ที่ใช้ใน งานวิจัย .....	39
ภาพที่ 20 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer .....	39
ภาพที่ 21 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) .....	40
ภาพที่ 22 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) .....	40
ภาพที่ 23 เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat galvanostat .....	41
ภาพที่ 24 ไดอะแกรมระบบเครื่องสุญญากาศ ของระบบเคลือบแบบสเป็คเตอริง .....	43
ภาพที่ 25 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ (ก) 1 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที (ง) 15 นาที .....	49
ภาพที่ 26 เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลาต่าง ๆ .....	50
ภาพที่ 27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ .....	51
ภาพที่ 28 ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที .....	52
ภาพที่ 29 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยระยะเวลาต่าง ๆ .....	53
ภาพที่ 30 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 30 นาที .....	54
ภาพที่ 31 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ 30 นาที .....	55

ภาพที่ 32 ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 30 นาที.....	56
ภาพที่ 33 ภาคตัดขวางที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลต์อิมิชันของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 30 นาที.....	56
ภาพที่ 34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์.....	57
ภาพที่ 35 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยฟิล์มบางอลูมิเนียมใช้ระยะเวลาในการเคลือบ (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที.....	58
ภาพที่ 36 เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม 5, 10 และ 15 นาที.....	59
ภาพที่ 37 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ 5, 10 และ 15 นาที.....	60
ภาพที่ 38 (ก) (ค) และ (จ) แสดงลักษณะพื้นผิวและภาพที่ 38 (ข) (ง) และ (ฉ) แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ (ก),(ข) 5 นาที (ค),(ง) 10 นาที และ (จ),(ฉ) 15 นาที.....	61
ภาพที่ 39 อัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของธาตุอลูมิเนียมและออกซิเจนจากเทคนิค EDX ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมซึ่งใช้เวลาเคลือบ 15 นาที.....	62
ภาพที่ 40 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ 5, 10 และ 15 นาที.....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเคลือบฟิล์มบางลงบนผิววัสดุเป็นวิธีการหนึ่งสำหรับปรับปรุงสมบัติเชิงพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเฉพาะด้านซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในกลุ่มนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การเคลือบฟิล์มบาง (Deposition) สามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การเคลือบฟิล์มบางทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition : PVD) (Savale, 2016) การเคลือบฟิล์มบางทางเคมี (Chemical vapor deposition : CVD) (Creighton & Ho, 2001) และการเคลือบฟิล์มบางแบบที่ละชั้นอะตอม (Atomic layer deposition : ALD) (Pansila et al., 2015) สำหรับงานนี้ผู้วิจัยสนใจการเคลือบฟิล์มบางแบบกระบวนการทางฟิสิกส์ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น และสามารถเคลือบฟิล์มบางที่มีคุณภาพได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้วิธีการเคลือบฟิล์มบางแบบ PVD มีหลายวิธีการ เช่น การระเหยสาร (Evaporation) การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam (E-beam) evaporation) รวมถึงวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) (Faraj, Ibrahim, Eisa, & Alrajhi, 2014) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีเคลือบฟิล์มบางแบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (Unbalanced magnetron sputtering) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถเคลือบฟิล์มบางให้มีความหนาแน่นสูง มีความสามารถในการยึดติดที่ดีมากในระดับนาโน และเป็นวิธีเคลือบฟิล์มบางที่ทำปฏิกิริยาในสถานะสุญญากาศ ไม่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการ จึงไม่มีของเสียที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (ลิ้มสุวรรณ & รัตนะ, 2547)

ปัจจุบันวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีทางฟิสิกส์ ถูกนำมาใช้เคลือบผิววัสดุเพื่อใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น การเคลือบฟิล์มบางเพื่อการประยุกต์ใช้ทางแสง (Optical coating) (Chkhalo et al., 2018) การเคลือบฟิล์มบางเพื่อการประยุกต์ใช้กับเครื่องประดับ (Decorative coating) (da Silva Oliveira et al., 2018) และการเคลือบฟิล์มบางเพื่อการประยุกต์เพิ่มความแข็งให้กับผิววัสดุ (Hard coating) (Zhang & Zhang, 2012) เป็นต้น สำหรับการเคลือบฟิล์มบางเพื่อประยุกต์ใช้งานทางแสงนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายกรณี อาทิ การเคลือบฟิล์มบางเพื่อช่วยลดการสะท้อนแสง การเคลือบฟิล์มบางเพื่อให้แสงหักเห ตลอดจนการเคลือบฟิล์มบางเพื่อช่วยทำให้ผิววัสดุมีความมันวาวและมีสมบัติการสะท้อนแสงให้ดียิ่งขึ้น มีตัวอย่างดังนี้ การปรับปรุงสมบัติการสะท้อนแสงของกระจกใส แผ่นพลาสติก หรือเซรามิก สำหรับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมนั้น พบว่าเมื่อฟิล์มบางอลูมิเนียมมีความหนาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการสะท้อนแสงเพิ่มถึงร้อยละ 50 (Obwoya Kinyera,



2015) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อฟิล์มบางอลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานจะเกิดการทำปฏิกิริยากับแก๊สและไอน้ำในอากาศ จึงทำให้ผิวหน้าของชั้นฟิล์มบางมีการเกิดปฏิกิริยาบนผิว เกิดการหมองคล้ำของผิวหน้าฟิล์ม ทำให้ความสามารถในการสะท้อนแสงลดลง ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่าหากเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ลงบนผิวหน้าฟิล์มบางอลูมิเนียม จะช่วยให้ฟิล์มบางอลูมิเนียมทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Tarnish resistance) ดีขึ้น จึงมีแนวคิดที่จะเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเพื่อประยุกต์ใช้ในการสะท้อนแสงและเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ไว้ด้านบนเพื่อป้องกันการถูกกัดกร่อนของผิวอลูมิเนียม (Protective layer) นอกจากนี้หากเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ไว้ระหว่างวัสดุรองรับและฟิล์มบางอลูมิเนียม ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มความความสามารถในการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของชิ้นงานที่เป็นโลหะกับฟิล์มบางแบบโลหะหรือเรียกว่า บอนด์เลเยอร์ (Bond layer) ได้อีกด้วย (Singh, Vijaya, Krupashankara, Sridhara, & Shridhara, 2018) ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดบนผิวโลก สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ จึงพบว่ามีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในงานอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนเป็นองค์ประกอบภายในของสารกึ่งตัวนำอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบลงบนผิววัสดุสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สะท้อนแสงเพื่อประโยชน์ทางด้านพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เพราะฟิล์มบางอลูมิเนียมสามารถสะท้อนแสงในย่านที่ตามองเห็น รวมไปถึงย่านอินฟราเรดกลางและไกลได้ดีอีกด้วย (Faraj et al., 2014)

จากรายละเอียดข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม (ฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์) ด้วยวิธีอิมบิลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยใช้กระจกสไลด์เป็นวัสดุรองรับ เพื่อศึกษาการสะท้อนแสงของฟิล์มบางด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในย่านอัลตราไวโอเลตถึงแสงที่ตามองเห็น (UV-VIS Spectrophotometer) ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางโดยใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray ทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat galvanostat) และตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer เพื่อพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์สะท้อนแสงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีอิมัลชันแบบสปินโคตติ้ง
2. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ที่มีต่อการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความทนทานต่อการกัดกร่อน
3. เพื่อศึกษาผลของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีต่อการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความทนทานต่อการกัดกร่อน
4. เพื่อนำผลที่ได้ไปเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์สะท้อนแสงต่อไป

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีอิมัลชันแบบสปินโคตติ้งได้
2. ทราบผลของเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางที่มีต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้
3. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม (ฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์) ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สะท้อนแสงต่อไป

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาเทคนิคและขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีดีซี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สเปตโตริง โดยทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีเงื่อนไขเวลาในการเคลือบ 1, 5, 10 และ 15 นาที และเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม โดยใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที ซึ่งมีความดันพื้นก่อนเริ่มการเคลือบเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 4.0 และ 0.5 มาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที ตามลำดับ และมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ขณะเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ เท่ากับ 500 และ 700 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ โดยจะศึกษาผลของระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีต่อการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางที่เคลือบได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 โดยพื้นฐานแล้วแนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัวโดยการตกเคลือบของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่บางมากในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่า ฟิล์มบาง หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบาง ๆ อย่างไรก็ตามการระบุว่าเป็น “ฟิล์มบาง” นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (Surface Properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (Bulk Properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” ทั้งนี้จะเห็นว่า ฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็นทั้ง “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน (Bunshah, 1994)

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้ คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของของแข็งของเหลว ไอหรือแก๊สก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น
2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้
3. การควบแน่น (Deposition) เป็นการพอกพูนและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับส่วนของการควบแน่นและพอกพูนของชั้นฟิล์มบางนั้น จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

## 2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางที่เกิดจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเกิดเป็นฟิล์มบางในที่สุดกระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงแล้วมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ โดยอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ (Chapman & Vossen, 1981) สำหรับแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสปัตเตอริงของอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ เมื่อวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนี้

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ion and Neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

3. การฝังตัวของไอออน (Ion Implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่า 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในทองแดง

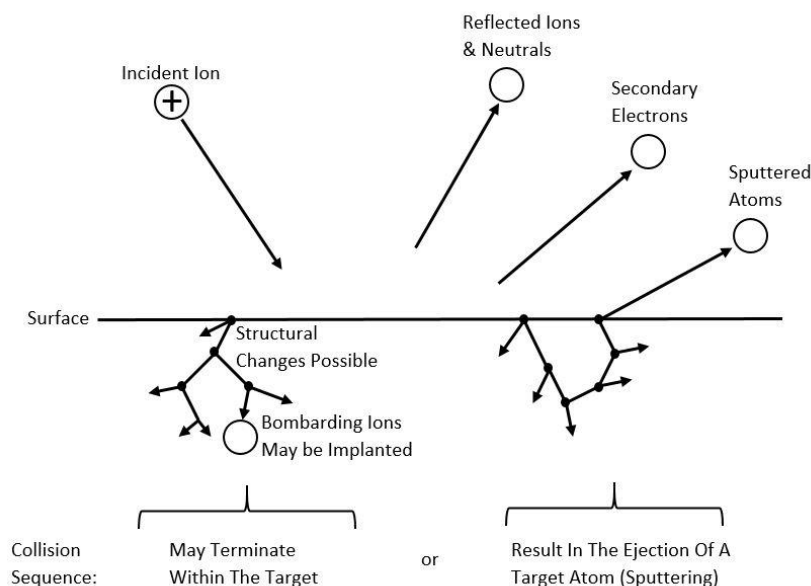
4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ (Target Material Structural Rearrangements) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของผลึก (Lattice Defect) โดยเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layer

5. การสปัตเตอริง (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอริง

กระบวนการสปัตเตอริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชน

กับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อุณหภูมิที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอริง คือ

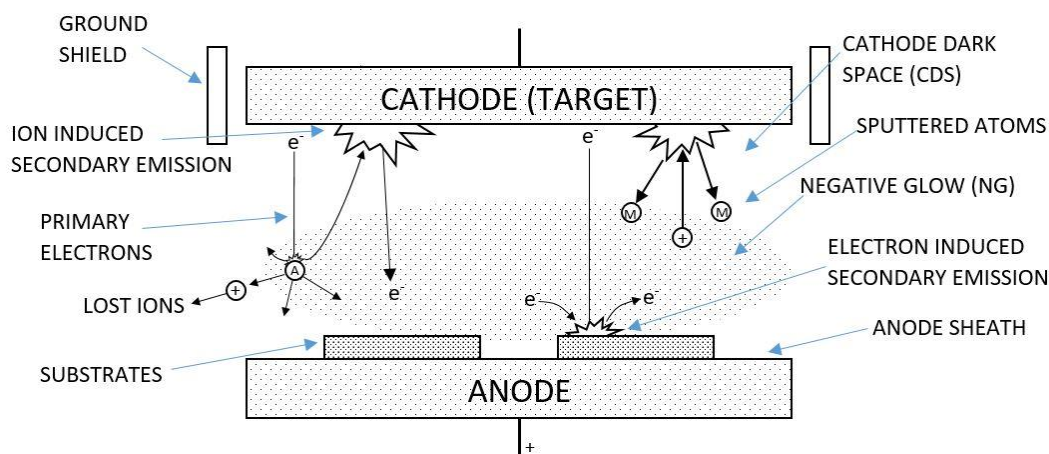
1. เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งวิ่งชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ
3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



ภาพที่ 1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ  
(Chapman & Vossen, 1981)

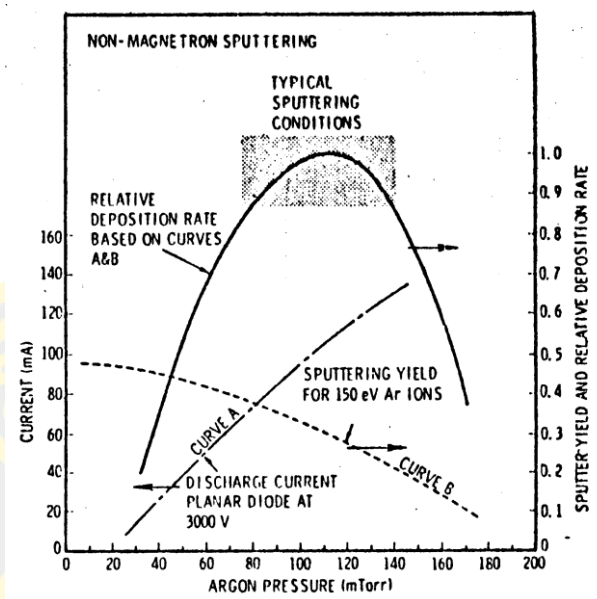
### 2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดีซี สปีดเตอริง

ภาพที่ 2 แสดงระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง อย่างง่ายที่สุดประกอบด้วย ขั้วคาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบและขั้วอโนด คือที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุจะอยู่ระหว่าง 4-10 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะดาร์คสเปซ อยู่ระหว่าง 1-4 เซนติเมตร โดยอโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอมบอร์มอลโกลว์ดีสชาร์จ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ยิลด์สูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกลว์ดีสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออไนเซชันจะรักษาสภาพโกลว์ดีสชาร์จไว้ตราบที่ระยะดาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะดาร์คสเปซขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาตรน้อย กระแสไฟฟ้าลดลงและอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar ระยะดาร์คสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด และกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปีดเตอริงอีก (Bunshah, 1994; Smith, 1995)



ภาพที่ 2 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง

(Bunshah, 1994)



ภาพที่ 3 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร (Kern & Vossen, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังภาพที่ 3 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านไปเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของ yield จากการสปัตเตอริงมีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 3 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่าง yield และกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอริงนิเกิลเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า  $2.6 \times 10^{-4}$  mbar และที่ความดันสูงกว่า  $1.6 \times 10^{-5}$  mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้นี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากภาพที่ 3 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ  $1.0 \times 10^{-5}$  mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1.0 \text{ mA/cm}^2$  ด้วยอัตราเคลือบ  $0.036 \text{ nm/min}$  ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (ลิ้มสุวรรณ & รัตนะ, 2547)



## 2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

เครื่องเคลือบอีกแบบหนึ่งที่พัฒนาต่อจากแบบดีซีสปีดเตอริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพคือ เครื่องเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง เนื่องจาก อัตราการสปีดเตอริงขึ้นกับผลคูณระหว่างอีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริงนอกจากทำได้โดยการเพิ่มอีลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ แต่ในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หรือเพิ่มความดัน ซึ่งมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1 \text{ mA/cm}^2$  และความดันประมาณ  $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  เท่านั้น ในระบบดีซี สปีดเตอริง อะตอมแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้เมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้แก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (Bunshah, 1994; Kern & Vossen, 1978; Maissel & Glang, 1970)

เครื่องเคลือบระบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ซึ่งได้รับการพัฒนาใหม่นี้เป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 4) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นด้วย

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่า ถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กอิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 5(a)) ด้วยรัศมี

$$r = \frac{3.37(W)^{1/2}}{B} \quad \text{สมการที่ (2-1)}$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV  
 $B$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน  
 $\nu = 2.8 \times 10^6 \text{ Hz}$

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มขึ้น เท่ากับ 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุน เท่ากับ  $2.8 \times 10^8 \text{ Hz}$  ภาพที่ 5(b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่ง

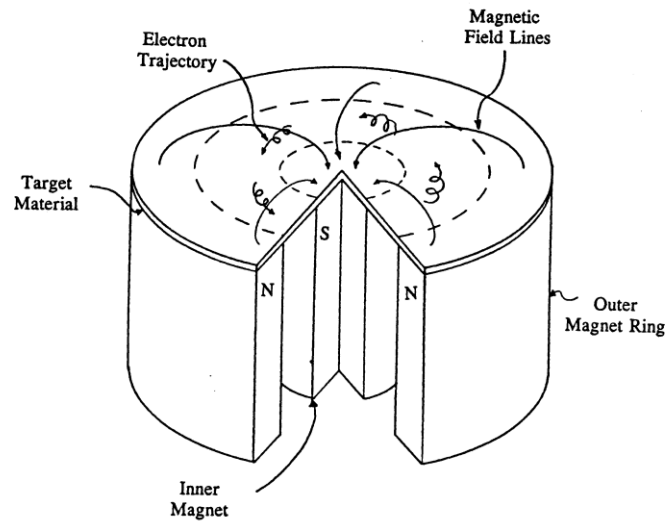
ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ภาพที่ 5(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift motion) มีค่าเท่ากับ

$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad \text{สมการที่ (2-2)}$$

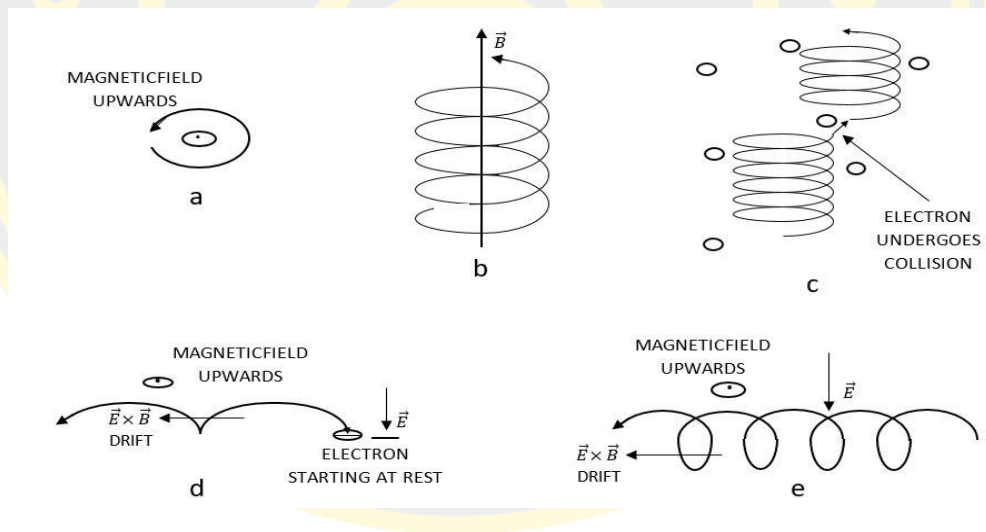
เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm

B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1000 V/cm และสนามแม่เหล็ก 100 gauss ค่าความเร็วลอยเลื่อนเท่ากับ 107 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูปไซคลอยด์ (Cycloid) ดังภาพที่ 5(d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนจะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกัน ดังแสดงในภาพที่ 5(e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมากถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ๆ ระหว่าง 50-500 gauss แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่าสนามตามยาว (Longitudinal field) จะทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพในไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลว์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ ศักดิ์ศรีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่าสนามตามขวาง (Transverse field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้หลังจากไอออนบวกเข้าชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 5(d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้แคโทดและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของแคโทด



ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก  
(Rickerby & Matthews, 1991)

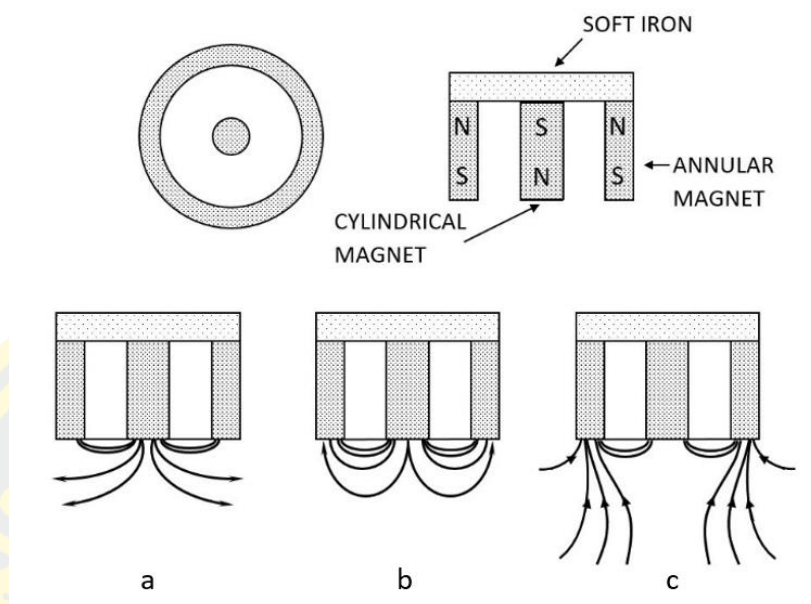


ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ  
(Bunshah, 1994)

## 2.5 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

ในการเคลือบฟิล์มพบว่าถ้าระดมยิงไอออนระหว่างกาเกิดฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงฟิล์มหลายอย่าง เช่น พฤติกรรมกาเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัวและสมบัติเชิงกล เป็นต้น ในกรณีแมกนีตรอน สปีดเตอริง ไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับ ซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ลบประมาณ 1-500 V ให้กับวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับ ระบบดีซี แมกนีตรอน ปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 0.05 - 0.10 ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rhode & Münz, 1991) สำหรับการเคลือบแข็ง (Hard coating) ฟิล์มบางที่ต้องการนั้นจะต้องมีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และทนต่อการขัดสี (Wear Resistance) มากยิ่งขึ้น โดยการลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับ แต่ก็ทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (Defects) ภายในเกรน (Grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลง ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออน (อัตราส่วนของไอออน/ อะตอมสารเคลือบ) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Unbalanced magnetron sputtering)

ระบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริงได้รับการคิดค้นและเผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดยทั้งสองพบว่ากาติดตั้งแม่เหล็กที่แคโทดของระบบสปีดเตอริงปกติ หากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้ว สนามแม่เหล็กที่แคโทดมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงที่วัสดุรองรับ (ฟิล์มบาง) นั้นมีปริมาณมากกว่าปกติซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยตรง การจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก ภาพที่ 6(a) หรือกลับกัน ภาพที่ 6(c) หรือใกล้เคียงกัน ภาพที่ 6(b) การจัดแม่เหล็กตาม ภาพที่ 6(a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25:1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตาม ภาพที่ 6(c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2:1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) (Rhode & Münz, 1991; Rohde, 1994)



ภาพที่ 6 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Rickerby & Matthews, 1991)

## 2.6 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง

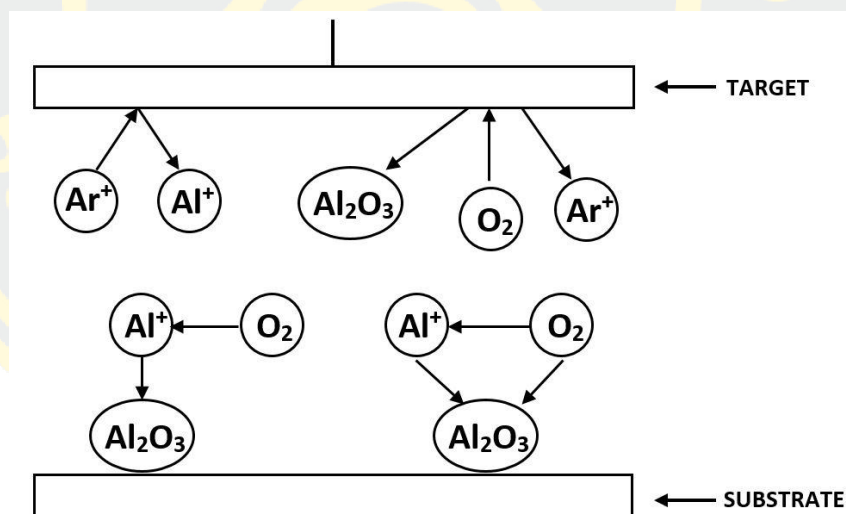
สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟ สปีดเตอริง (Reactive Sputtering) (ห่อประชุม, 2548) เป็นกระบวนการสปีดเตอริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับ การสปีดเตอริงที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ ถ้าป้อนแก๊สอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) หรือ มีเทน ( $CH_4$ ) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ อย่างไรก็ตามคาดว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออนแก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสภาวะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น อลูมิเนียม (Al) แล้วเกิดเป็นสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ตามภาพที่ 7 ได้เป็นลักษณะดังนี้

1. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่นแก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมอลูมิเนียมที่ผิวหน้าเป้าของสารเคลือบกลายเป็นสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์แล้วถูกสปีดเตอริงให้หลุดออกแล้ว ตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่า

ในการเกิดฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ที่เป้าสารเคลือบ ส่วนที่มีอัตราการสputเตอร์ต่ำปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สออกซิเจนรวมตัวกับอะตอมอลูมิเนียมที่ถูกสputเตอร์ ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเป็นไปได้ น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สออกซิเจน รวมตัวกับอะตอมอลูมิเนียมบนผิววัสดุรองรับ กระบวนการ รีแอคทีฟ สputเตอร์ริง โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดการโกลด์ติสซาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะโกลด์ติสซาร์จไว้ได้ ขณะเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น รีแอคทีฟ สputเตอร์ริง ยังต้องคำนึงถึงความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาให้มีค่าเหมาะสมกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ



ภาพที่ 7 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ

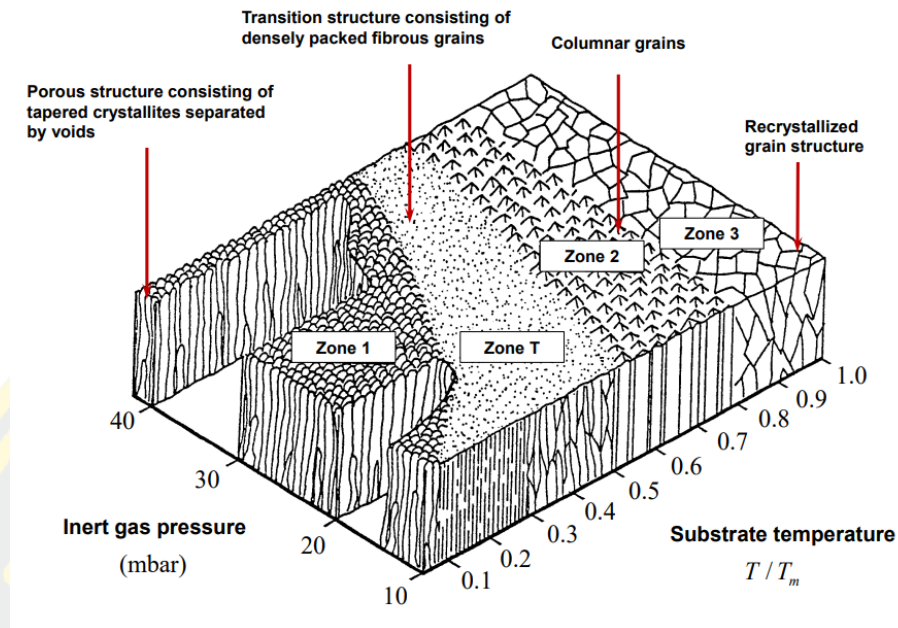
## 2.7 โครงสร้างของฟิล์มบาง (Structure zone models)

โครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิเคลือบกับอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T/T_m$ ) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ (ม่วงพัฒน์, 2544) ดังภาพที่ 8

1. บริเวณ 1 (Zone I) เป็นการเคลือบที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำและความดันแก๊สขณะเคลือบมีค่าสูงอะตอมที่อยู่บนผิววัสดุรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กกระจัดกระจายและเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยแหลมแบบ *tapers crystallines* จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำมีช่องว่าง ขนาดความกว้างในระดับร้อยอังสตรอม ที่  $T/T_m$  เท่ากับ 0-0.1 ที่ความดัน 1 mTorr ถ้าความดันแก๊สสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า  $T/T_m$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูง ความหนาแน่นของแก๊สในภาชนะสุญญากาศมีมากขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของสารเคลือบตกลงมาได้น้อย และขณะที่ตกลงมาอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อก่อตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ฟิล์มที่ขรุขระมักเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมีมาจก ไอออนที่ระดมยิงเป็นส่วนใหญ่

2. บริเวณ T (Zone T) เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์ โดยที่  $T/T_m$  อยู่ในช่วง 0.1-0.5 ที่ความดันแก๊สขณะเคลือบ 1 mTorr เกิดในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุรองรับจะมีปริมาณมากขึ้นและได้รับพลังงานการชน อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น ค่า Surface Mobility ก็เพิ่มขึ้นและโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็จะเข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous grain) เต็มพื้นที่และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้น จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้น เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจนกลายเป็นคอลัมน์ต่อไปโดยปราศจากช่องว่างที่บริเวณขอบ

3. บริเวณ 2 (Zone II) ที่บริเวณ 2 จะมีค่า  $T/T_m$  อยู่ระหว่าง 0.5-0.8 ที่ความดันแก๊สขณะเคลือบ 1 mTorr จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็นโครงสร้างคอลัมน์ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและอัตราการเคลือบเพิ่มขึ้น (มีผลต่อ Surface Mobility ของอะตอม) และขนาดคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคอลัมน์



ภาพที่ 8 แสดงแบบจำลองบริเวณโครงสร้างของการเกิดฟิล์มบาง หรือ Structure zone models

4. บริเวณ 3 (Zone III) บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุด  $T/T_m$  อยู่ระหว่าง 0.8-1.0 ที่ความดันแก๊สขณะเคลือบ 1 mTorr การแพร่จะมีค่าสูงและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีความต้านทานเท่ากันหมด ขนาดของคอลัมน์าร์จะมีขนาดใหญ่และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored strain energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบ เกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจากคอลัมน์าร์เป็นผลึกเดี่ยว

## 2.8 ฟิล์มบางอลูมิเนียม (Al thin films)

ธาตุอลูมิเนียมเป็น 1 ใน 6 ธาตุโลหะที่มีมากที่สุดในเปลือกของโลกมีสีเทาอ่อน (Light gray metallic) อลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีประจุไฟฟ้าลบเป็นอย่างมากและยังสามารถก่อสัมพันธ์เชิงปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนได้เป็นอย่างดี จึงทำให้ส่วนมากมักจะพบเห็นธาตุอลูมิเนียมที่อยู่ในรูปแบบของธาตุโลหะออกไซด์หรืออลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) โดยธาตุอลูมิเนียมมีคุณสมบัติหลัก 3 ประการสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งาน คือ มีความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลสูงและสุดท้ายเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก (Sheasby & Pinner, 2001) ซึ่งโลหะอลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะความบริสุทธิ์สูงมีค่าอีลด์เท่ากับ  $34.5 \text{ N/mm}^2$  มีความหนาแน่นเท่ากับ  $2.7 \text{ g/cm}^3$  และมีค่าความต้านทาน



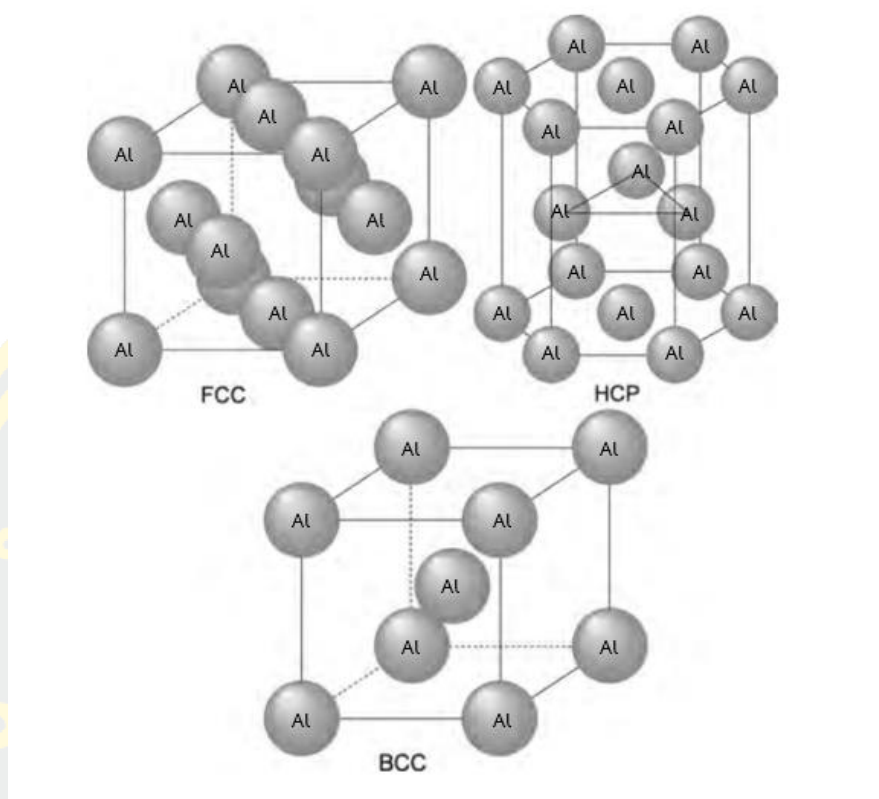
แรงดึงเท่ากับ  $90 \text{ N/mm}^2$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อลูมิเนียมจัดอยู่ในประเภทโลหะอ่อน ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงมีการนำธาตุอลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น ใช้ทำแผ่นฟอยล์อลูมิเนียม เมื่อเป็นโลหะผสมหรืออัลลอยส์สามารถใช้ทำตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้อลูมิเนียมยังมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากเมื่อธาตุอลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศจะทำให้เปิดเป็นชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนพื้นผิวซึ่งพื้นผิวนี้สามารถทนทานต่อกรดได้เป็นอย่างดีแต่ไม่ทนทานต่อด่าง อลูมิเนียมยังสามารถสะท้อนแสงในความยาวคลื่นตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงอินฟราเรด (UV-IR) ได้เป็นอย่างดีซึ่งในช่วงแสงที่ตามองเห็นนั้นอลูมิเนียมมีค่าการสะท้อนแสงได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ (Materials) โดยคุณสมบัติอื่น ๆ ของธาตุอลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องมีโครงสร้างแบบ Face-centered cubic (FCC) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอม (Space lattice) เท่ากับ  $4.0494$  อังสตรอม และได้มีการคำนวณหลักการทำนายการเปลี่ยนเฟส (phase) ไว้ว่าเป็นไปตามลำดับดังนี้ Face-centered cubic (FCC) - Hexagonal Close - packed (HCP) - Body Centered Cubic (BCC) ในช่วงที่ความดันมีค่าต่ำกว่า  $0.5$  เทระปาสกาล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดจากแรงกดอย่างมหาศาลจนทำให้เกิดการเสียรูปของความหนาแน่นประจุอิเล็กตรอนวงนอก (valence electrons) โดยการเปลี่ยนแปลงเฟสของอลูมิเนียมในเฟสของ FCC-HCP และ HCP-BCC จะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงกดประมาณ  $216 \pm 9$  และ  $321 \pm 12$  จิกะปาสกาล ตามลำดับ (Fiquet et al., 2019) โดยในภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างผลึกการจัดเรียงตัวของอะตอมของอลูมิเนียมในลักษณะ Face-Centered Cubic (FCC) Hexagonal Close - Packed (HCP) และ Body-Centered Cubic (BCC)

ในงานวิจัยของ Robert Lugolole และ Sam Kinyera Obwoya (Lugolole & Obwoya Kinyera, 2015) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้ทำวัสดุสะท้อนแสงโดยได้ทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนเซรามิกให้มีความหนาตั้งแต่  $12.3$  นาโนเมตรจนถึง  $750$  นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลของความหนาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของการสะท้อนแสงโดยค่าการสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์ม ซึ่งฟิล์มที่หนาที่สุดสามารถสะท้อนแสงได้มากกว่า  $90$  เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยของ Modh Zamir Pakhuruddin และคณะ (Pakhuruddin, Ibrahim, & Abdul Aziz, 2013) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนพลาสติกโพลีเมตเพื่อศึกษาการเกิดโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยพวกเขาพบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมมีการก่อเกิดผลึกในระนาบ (111) ที่ระนาบนี้มี d-spacing เท่ากับ  $2.338$  อังสตรอม (Pelco, 2021) โดยพบที่มุมเท่ากับ  $38.4$  องศา เป็นโครงสร้างหลักของฟิล์มบางอลูมิเนียมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hayk Khachatryan และคณะ

(Khachatryan, Lee, Kim, & Kim, 2018) ที่ได้ทำศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีต่อการเกิดผลึกโดยพวกเขาพบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีความหนาเพียง 10 นาโนเมตรนั้นไม่มีก่อเกิดผลึกหรือเรียกว่าออร์ฟิส ในขณะที่ฟิล์มบางที่หนาตั้งแต่ 30 นาโนเมตรขึ้นไปจะก่อเกิดผลึกในระนาบ (111)

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของอลูมิเนียม

ชื่อ	Aluminium, Aluminum
Atomic Number	13
Atomic Weight (g/mol)	26.98
Valency	3
Crystal Structure	FCC
Melting Point (°C)	660.2
Boiling Point (°C)	2480
Thermal Conductivity (0-100°C) (cal/cms. °C)	0.57
Electrical Resistivity at 20°C ( $\Omega$ .cm)	2.69
Density (g/cm)	2.6898



ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างผลึกการจัดเรียงตัวของอะตอมของอลูมิเนียมในลักษณะ Face-Centered Cubic (FCC) Hexagonal Close – Packed (HCP) และ Body-Centered Cubic (BCC) (Niinomi, 2008)

## 2.9 ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ thin films)

ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เป็นหนึ่งในฟิล์มบางที่มีการใช้งานทางด้านวัสดุที่เป็นฉนวนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีความเป็นไดอิเล็กทริกสูง ( $\epsilon_r = 9$ ) ทนทานต่อความร้อนและมีช่องว่างพลังงานที่สูง (8.7eV) โดยส่วนมากฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้คุณสมบัติระหว่างเคลือบต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส มักจะมีลักษณะโครงสร้างแบบแอมอร์ฟัส (amorphous) (Prasanna et al., 2013) นอกจากนี้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะใสและดัชนีหักเหแสง (refractive index) มีค่าเท่ากับ  $1.59 \pm 0.01$  (Segda, Jacquet, & Besse, 2001) ซึ่งงานวิจัยของ Baskar Thangaraj และ Krishnan Mahadevan (Thangaraj & Mahadevan, 2017) ได้กล่าวถึงฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็ง และสามารถต้านทานรอยขีดข่วนกับการกัดกร่อนได้ดี จึงนิยมใช้ประโยชน์

ในด้านการเคลือบเพื่อเป็นชั้นป้องกัน ความซับซ้อนของคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เป็นผลเนื่องจากฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สามารถจัดเรียงโครงสร้างผลึกได้หลายเฟส เช่น  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\theta$  และ k-alumina การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยทั่วไปกระบวนการทางเคมีจะให้โครงสร้างในเฟส  $\alpha$ ,  $\theta$  และ k-alumina ส่วนกระบวนการทางฟิสิกส์จะสร้างแบบ  $\alpha$ -alumina ในขณะที่โครงสร้างเฟส  $\gamma$  และ  $\eta$  สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันบนโลหะอลูมิเนียม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสภาพแวดล้อม จากผลการทดลองพบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของออกซิเจนและผลจากการทดลองความหนาแน่นต่อการกัดกร่อนยังแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานไม่ได้เคลือบ โดยอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 0.82174 และ 0.69528 มิลล์ต่อปีตามลำดับ นอกจากนี้ในรายงานวิจัยของ ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุญ (นิยมสรวนุญ, 2561) ยังมีการกล่าวถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ อลูมิเนียมออกไซด์ไว้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์

ชื่อ	Aluminium dioxide, alumina
สูตรโมเลกุล	$Al_2O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	101.96 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	3.5-3.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	2072 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2977 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	ผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ

## 2.10 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ลักษณะเฉพาะหรือสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง สามารถหาได้จากวิธีหรือเทคนิคต่าง ๆ หลายเทคนิค ในงานวิจัยนี้จะศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

### 2.10.1 ทฤษฎี UV-Visible spectrophotometer

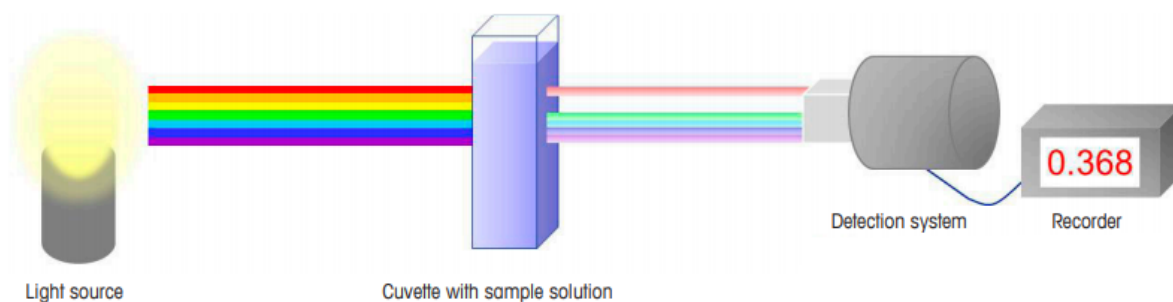
เครื่อง UV-Visible spectrophotometer นั้นเป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis spectroscopy ไปใช้งาน สำหรับใช้วัดค่าความเข้มของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นจึงเปรียบเทียบความเข้มของแสงระหว่างก่อนผ่านตัวอย่างและหลังผ่านตัวอย่างไปตรวจสอบ โดยส่วนประกอบหลักของเครื่องมือแสดงดังภาพที่ 10 ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง (light source) ตัวจับชิ้นงาน (sample holder) และอุปกรณ์สำหรับแยกคลื่นแสงหรือเกรตติง (เช่น monochromator) และเครื่องตรวจวัด (detector) ซึ่งการดูดกลืนแสงหรือรังสีจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงแสงที่ตามองเห็น มีความยาวคลื่นโดยประมาณ 185 ถึง 900 นาโนเมตร โดยแสงที่สร้างจากแหล่งกำเนิดต้องมีความคงที่อย่างต่อเนื่อง ส่วนมากจะนิยมใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดดิวทีเรียมซึ่งให้กำเนิดแสงในช่วง 160 ถึง 375 นาโนเมตรเป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวี แต่เนื่องจากแสงที่ได้นั้นมีมีความยาวคลื่นต่าง ๆ จึงต้องกระจายแสงออกโดยใช้เกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์เพื่อให้แสงที่ส่งไปยังชิ้นงานตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียว หลังจากนั้นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแล้วจะผ่านชิ้นงานตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ ซึ่งมีรูปร่างต่างกันไป โดยส่วนมากจะมีรูปแบบเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 1 เซนติเมตรซึ่งค่านี้จะเป็นค่าระยะทางของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างตามกฎของ Beer-Lambert จากนั้นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเดินทางผ่านชิ้นงานตัวอย่างไปยังเครื่องตรวจวัด และเครื่องตรวจวัดจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ซึ่งผลของสเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืน การส่งผ่านหรือการสะท้อนของแสงกับค่าความยาวคลื่น โดยสามารถนำผลค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่วัดได้ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต แสงตามองเห็นและช่วงใกล้อินฟราเรด มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน/การส่งผ่านเฉลี่ยได้ด้วยสมการที่ (2-1) ("Basic Statistics,")

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{N} \quad \text{สมการที่ (2-3)}$$

เมื่อ  $\bar{R}$  คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อน/การส่งผ่านแสง

$\sum R$  คือ ผลรวมของค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน/การส่งผ่านแสง

$N$  คือ จำนวนความยาวคลื่น



ภาพที่ 10 แสดงหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่อง UV-Visible spectrophotometer (METTLER TOLEDO)

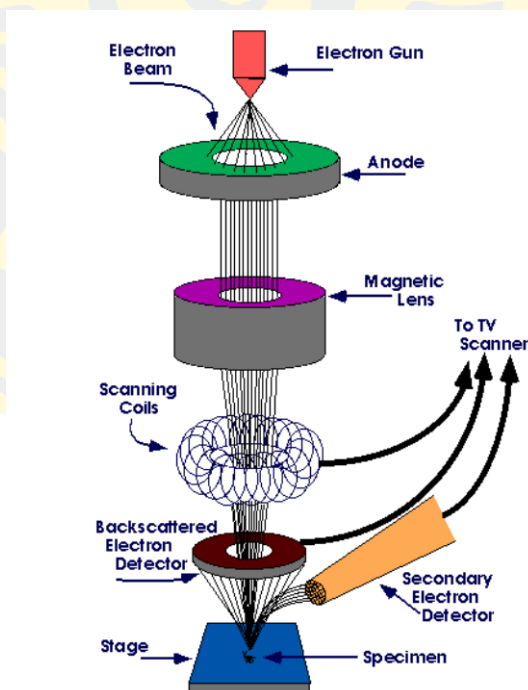
### 2.10.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา (อุดมกิจเดชา, 2543) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องไว้ดังนี้ เทคนิค Scanning Electron Microscope สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron detector; SE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron detector; BSE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 11

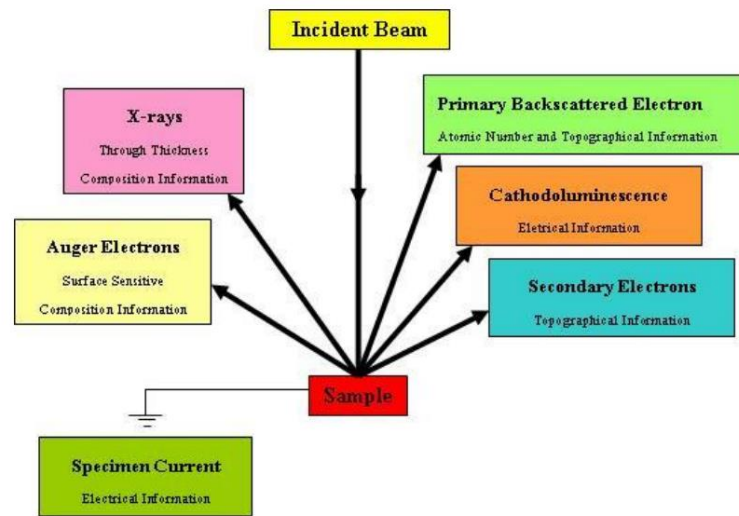
อิเล็กตรอนทุติยภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นแอโนดภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7}$  torr และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอนจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดีและลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัสดุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 nm โดยมีชุดลดความคมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่างขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา (ภาพที่ 12 และภาพที่ 13) สัญญาณภาพที่ได้

จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิด คือ

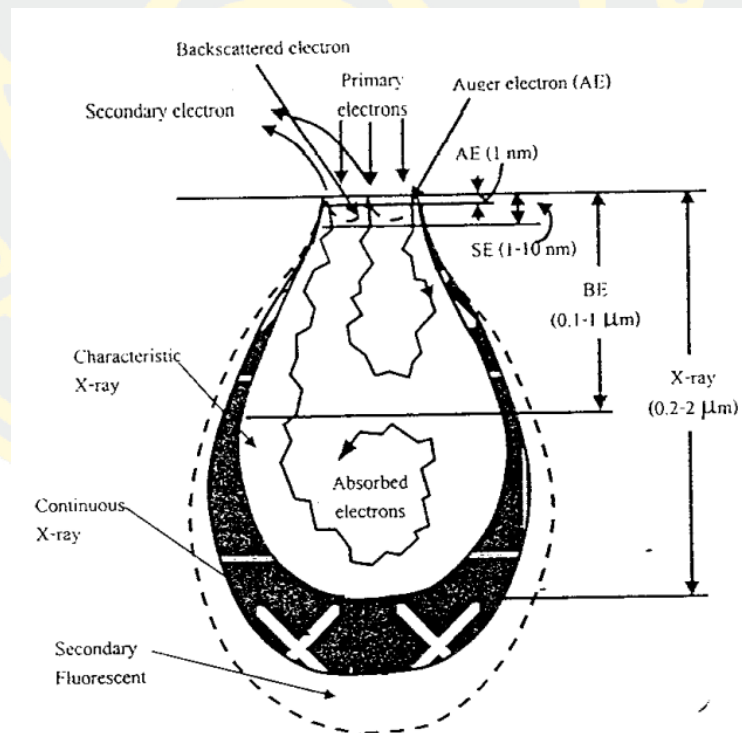
1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 eV เกิดที่พื้นผิวระดับไมล์ิกโดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ
2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image; BEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานเป็นบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา
3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-ray Electron Image; XRI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ (K, L, M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปมาแทนที่และต้องลดระดับพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่ระดับพลังงานสูงกว่าโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับวงโคจรที่ไปแทนที่ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละธาตุจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ



ภาพที่ 11 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (Walock, 2012)



ภาพที่ 12 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง  
(อุดมกิจเดชา, 2543)



ภาพที่ 13 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ  
(อุดมกิจเดชา, 2543)



### 2.10.3 การศึกษาองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิครังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDX or EDS)

การศึกษาลักษณะเฉพาะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางคือองค์ประกอบธาตุที่มีในเนื้อฟิล์มที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิค EDX ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ คือเมื่ออะตอมถูกไอออนไนซ์โดยการระดมยิงด้วยอิเล็กตรอนเข้าไปในวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้น K ทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกทำให้เกิดช่องว่างจากนั้นอะตอมจะเกิดความไม่เสถียรและอิเล็กตรอนวงนอกจะเข้ามาแทนที่การที่อิเล็กตรอนวงนอกจะเข้ามาแทนที่ได้นั้นจะต้องมีพลังงานเท่ากัน อิเล็กตรอนวงนอกนั้นมีพลังงานสูงกว่าจึงต้องปลดปล่อยพลังงานออกมาและพลังงานที่ปล่อยออกมานั้นอยู่ในรูปรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะตัว (Characteristic X-ray) (ภาพที่ 13) หากอิเล็กตรอนที่เข้ามาแทนที่นั้น มาจากชั้น L จะเรียกรังสีเอกซ์ที่ได้นั้นว่ารังสีเอกซ์  $K\alpha$  ถ้าหากอิเล็กตรอนที่เข้ามาแทนที่นั้นมาจากชั้น M ก็จะได้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานอีกค่าหนึ่ง เราเรียกรังสีเอกซ์ที่ได้นั้นว่า รังสีเอกซ์  $K\beta$  สำหรับการเกิดไอออนไนซ์ที่ชั้น L แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในวง M หรือ N เข้ามาแทนที่จะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่เรียกรังสีเอกซ์  $L\alpha$  หรือ  $L\beta$  ตามลำดับ แต่ถ้าหากรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมานั้นมีพลังงานที่จะสามารถไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดออกมาจากอะตอมอีกเราจะเรียกอิเล็กตรอนตัวที่หลุดออกมานั้นว่า ไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) อิเล็กตรอนวงนอกอื่น ๆ ยังสามารถเข้ามาแทนที่ช่องว่างที่อิเล็กตรอนวงในนั้น หลุดออกได้แม้จะไม่ทั้งหมดซึ่งต้องเป็นไปตามกฎการเลือก (Selection rules) ในวิชา กลศาสตร์ควอนตัม

$$\Delta n > 0 \text{ เช่น } L \rightarrow K, M \rightarrow K \text{ ห้าม } L_3 \rightarrow L_2 \quad \text{สมการที่ (2-4)}$$

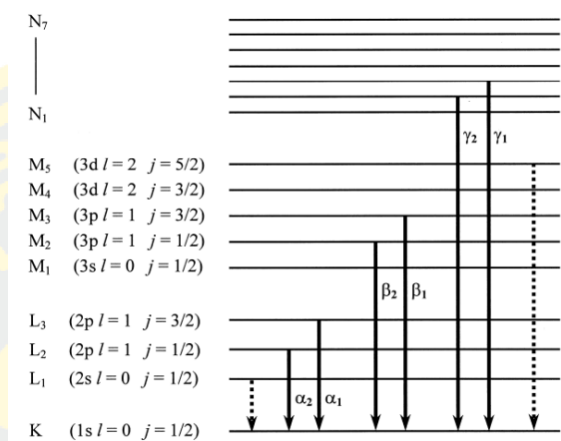
$$\Delta l = \pm 1 \text{ และ } \Delta j = -1, 0, +1 \quad \text{สมการที่ (2-5)}$$

เมื่อ  $n$  คือ เลขควอนตัมหลัก (Principle quantum number)  
 $L$  คือ เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum quantum no.)  
 $j$  คือ เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุมรวม  
 (Total angular momentum quantum no.)

$$j = l \pm s \quad \text{สมการที่ (2-6)}$$

เช่น การรวมกันของโมเมนตัมออร์บิทัลและสปิน ซึ่งเรียกว่า กฎการเลือกชั่วครู่ที่ช่วยให้การคาดการณ์ของการเปลี่ยนวงโคจรที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและพลังงานของรังสีเอกซ์ แสดงได้ดังภาพที่ 14 ซึ่งเป็นการลดระดับลงมาที่ชั้น K ที่เส้นที่บจะได้พลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะค่าและเส้นประนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้เพราะไม่เป็นไปตาม

กฎการเลือก ในระบบการวิเคราะห์ในปัจจุบันนิยมใช้หัววัดรังสีแบบ Si(Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1-30 keV หรือหัววัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High purity)



ภาพที่ 14 การลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้นต่าง ๆ มายังชั้น K ซึ่งเส้นทึบเป็นไปตามกฎการเลือก และเส้นประไม่เป็นไปตามกฎการเลือก (Bubert & Jenett, 2003)

#### 2.10.4 การศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าหรือโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat)

โพเทนชิโอสแตตคืออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ทั้งสองขั้วไฟฟ้านี้ประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้านั้นจะสามารถทำการควบคุมได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary หรือ Counter Electrode) โดยส่วนมากเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าจะใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟ้าช่วย ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ของเครื่องคือเซลล์ศักย์ไฟฟ้า (cell potential) และตัวแปรที่วัดได้คือเซลล์กระแสไฟฟ้า (cell current)

เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้านั้นต้องใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าจำนวน 3 ขั้ว

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode)

ขั้วไฟฟ้าทำงาน คือขั้วสำหรับควบคุมศักย์ไฟฟ้าและเป็นตำแหน่งในการวัดกระแสไฟฟ้าในหลาย ๆ การทดลอง ขั้วไฟฟ้าทำงานมักจะเป็นวัสดุที่มีความเสถียรสูง (inert) ในการทำปฏิกิริยาเช่น

ทอง แพลทินัม หรือคาร์บอนอสัณฐาน เป็นต้น ซึ่งสำหรับกรณีเหล่านี้ ขั้วไฟฟ้าทำงานจะทำหน้าที่เป็นพื้นผิวที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

ในการทดสอบการกัดกร่อนนั้น ชิ้นงานตัวอย่างโลหะสำหรับทดสอบการกัดกร่อนจะถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ขณะที่โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าชนิดนี้อาจจะไม่ได้มีโครงสร้างที่โลหะ แต่จะเป็นชิ้นงานตัวอย่างขนาดเล็กที่สามารถเป็นทั้งโลหะเปลือยหรือโลหะที่ถูกเคลือบได้ทั้งสองอย่าง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันกับการทดสอบโดยใช้เทคนิค Weight-loss coupons และเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าสามารถเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ได้โดยตรงกับขั้วแอโนดหรือแคโทดของแบตเตอรี่ได้เลย

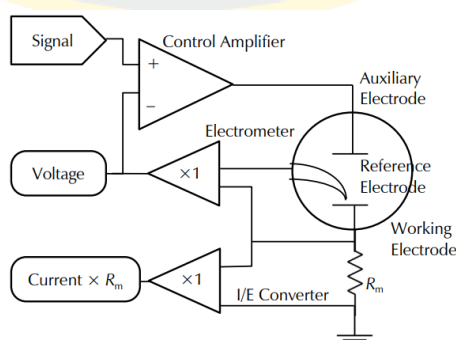
### 2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนั้นจะถูกใช้สำหรับวัดความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน ในขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้ว ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ควรมีความคงที่ของศักย์ไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้า โดยส่วนมากขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะเป็นขั้วไฟฟ้าคาโลเมลอิ่มตัว (saturated calomel electrode : SCE) และขั้วไฟฟ้า silver/silver chloride (Ag/AgCl)

### 3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary หรือ Counter Electrode)

ขั้วไฟฟ้าช่วย คือขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อให้เซลล์วงจรไฟฟ้าสมบูรณ์ ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้โดยทั่วไปจะเป็นตัวนำเฉื่อย (inert conductor) เช่น แพลทินัม หรือ กราไฟท์ เป็นต้น โดยในกระบวนการนั้นขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่สารละลายผ่านทางขั้วไฟฟ้าทำงานและออกจากสารละลายผ่านทางขั้วไฟฟ้าช่วย

ขั้วไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ จะถูกแช่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยองค์ประกอบต่าง ๆ ทั้งขั้วไฟฟ้า สารละลายและภาชนะที่บรรจุสารละลายเรียกว่า เซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยแผนผังโดยง่ายเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของแกมมี (Gamry Instruments') แสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงแผนผังอย่างง่ายของเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (instruments)

### 2.10.5 การศึกษาโครงสร้างวัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

ลักษณะที่สำคัญของฟิล์มบางอย่างหนึ่งคือการศึกษาโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถใช้เทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์โดยอาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Power Diffraction Standard) ของสารนั้น ๆ สุธรรม ศรีหล่มสัก (ศรีหล่มสัก, 2554) ได้อธิบายไว้ว่าในอดีตนั้น การศึกษาโครงสร้างผลึกทำได้แต่ดูลักษณะภายนอกของผลึกที่ปรากฏตามธรรมชาติเท่านั้น จนกระทั่งปี ค.ศ. 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ Max von Laue เป็นคนแรกที่มีแนวคิดว่าการจัดตัวของอะตอมภายในผลึกน่าจะจัดเป็นระเบียบเหมือนกับรูปร่างภายนอกที่ปรากฏให้เห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้นจริง ผลึกน่าจะสามารถทำให้เกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของแสงได้โดยเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะระหว่างอะตอมในผลึก เขาจึงจัดการทดลองขึ้นโดยฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic X-ray) ผ่านไปยังผลึกของ Copper sulfate ( $\text{CuSO}_4$ ) แล้วพบว่าผลึก Copper sulfate ( $\text{CuSO}_4$ ) สามารถทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามที่คาดไว้จริง ๆ ต่อมานักฟิสิกส์ฟออลูก W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอม ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ โดยลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจะมีความเข้มสูง หากผลต่างทางเดิน (Path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ และได้ใช้สมการคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ มาอธิบายผลการทดลองของ Laue และนำไปคำนวณหาโครงสร้างผลึก NaCl ได้ผลสำเร็จเป็นครั้งแรก

ภาพที่ 16 แสดงการเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นเริ่มจากลำรังสีเอกซ์ AX และ BY ตกกระทบบนที่ผลึกระนาบ P,Q ตามลำดับ มุมตกกระทบบเท่ากับ  $\theta$  ตามทฤษฎีการสะท้อนแสง มุมตกกระทบบเท่ากับมุมสะท้อน ดังนั้น มุมสะท้อนเท่ากับ  $\theta$  ด้วย เมื่อสะท้อนได้ลำแสงสะท้อน XD และ YE ออกมา เนื่องจากระนาบ Q อยู่ลึกกว่า ระนาบ P ดังนั้นลำแสง BYE จะยาวกว่า AXD อยู่  $GY + YH$  ตามทฤษฎีเรขาคณิตมุม  $GXY$  และมุม  $YXH$  เท่ากับ  $\theta$  ด้วย ดังนั้น  $GY$  และ  $YH = d \sin\theta$  เพราะฉะนั้นระยะทางที่ BYE เดินทางยาวกว่า AXD  $= d \sin\theta$  เมื่อ  $d$  คือระยะระหว่างระนาบ (Interplanar spacing)

เนื่องจากการเลี้ยวเบนคือการที่แสงเกิดการสะท้อนแบบเสริมกัน ดังนั้น การเลี้ยวเบนจะเกิดต่อเมื่อเฟส (Phase) ของคลื่นที่สะท้อนออกมาซ้อนตรงกันพอดี กรณีดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อ

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

สมการที่ (2-7)

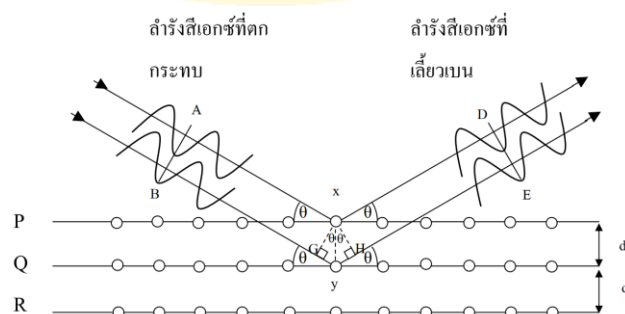
- เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $n$  คือ ลำดับการเลี้ยวเบน โดยเท่ากับ 1,2,3,4,5,...

เรียกสมการข้างต้นว่า สมการของแบรกก์ถ้าฉายรังสีเอกซ์ไปยังผลึกเชิงเดี่ยว (Single Crystal) ซึ่งประกอบด้วยระนาบต่าง ๆ หลายผลึก โดยหมุนผลึกไปรอบ ๆ จะมีบางมุมที่ระนาบบางระนาบในผลึกสามารถเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามสมการของแบรกก์พอดีที่มุม  $\theta$  นั่นก็จะเกิดจุดบนฟิล์มที่เอาไปติดไว้ที่รอบ ๆ ผลึกถ้าวัดมุม  $\theta$  แล้วแทนค่า  $\theta$  นั้นไปตามสมการของแบรกก์ก็จะคำนวณหา  $d$  ของระนาบที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ นำค่า  $d$  ของหลาย ๆ ระนาบไปคำนวณหา  $a, b, c$  ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบกับค่าคงที่แลตทิซที่เลี้ยวเบนในแต่ละระนาบ และมุม  $\alpha, \beta, \gamma$  ซึ่งเป็นยูนิตเซลล์ของพารามิเตอร์บนผลึกได้และเมื่อคำนวณหาค่ายูนิตเซลล์พารามิเตอร์ได้ก็จะบอกโครงสร้างของผลึกได้อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาขนาดของผลึกจากความกว้างของพีคที่เกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

สมการที่ (2-8)

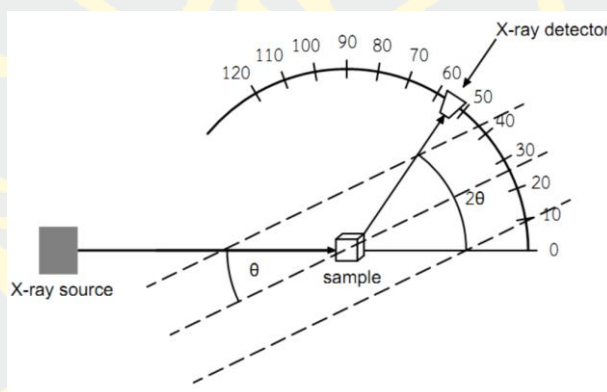
- เมื่อ  $L$  คือ ขนาดผลึก  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของเชอร์เรอร์ที่ขึ้นกับรูปร่างของผลึก (Shape Factor)  
 $\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum ; FWHM) ซึ่งอยู่ในหน่วยเรเดียน  
 $\theta$  คือ ครึ่งของมุมที่ศูนย์กลางพีค



ภาพที่ 16 เงื่อนไขการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามสมการของแบรกก์

ในการทดสอบบางครั้งมุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อาจมีการเลื่อนไปในตำแหน่งมุมที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความเค้น ตกค้าง (Residual stress) ในผิวของสารเคลือบ ส่วนความเข้ม (Intensity) ของสัญญาณที่ได้นั้นอาจจะไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Prefer orientation) ต่างกันของอะตอมในชั้นเคลือบ นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บ่งบอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase composition) และค่าแลตทิซ (Lattice) อีกด้วย

ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้วิธี  $\theta$ - $2\theta$  ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ( $\theta$ - $2\theta$  Diffractometer Method) เทคนิคนี้ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณของรังสีเอกซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ (ชนบุญสมบัติ, 2544) ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 วิธี Theta-2Theta ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ การจัดวางตัวอย่างเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และอุปกรณ์ตรวจจับ

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Chu (Chu, 1996) ได้ศึกษาแผ่นฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอน โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อแก้ไขโครงสร้างแล้วตรวจสอบผลกระทบของความหนาและคุณสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียม การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนทำให้ชั้นฟิล์มบางเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำฟิล์มบางมาใช้เพื่อทดสอบ ซึ่งจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดโดยเฉลี่ยในโครงสร้างรวมของฟิล์มบางอลูมิเนียมแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางมีความแข็งแรงขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มลดลง ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นนัยสำคัญกับจำนวนรอบของการปรับโครงสร้างด้วยความร้อน

Quintana (Quintana, Oliva, Ceh, Corona, & Aguilar, 1999) ศึกษาเกี่ยวกับความหนาที่ต่างกันของแผ่นฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีการระเหยสาร โดยเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยความหนาที่ต่างกันบนพื้นวัสดุรองรับที่แตกต่างกันด้วยวิธีระเหยสารในระบบระเหยสุญญากาศแบบเดิม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อฟิล์มหนาขึ้น การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ความขรุขระของพื้นผิวจะลดลงจนเริ่มคงที่ เมื่อวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ สามารถอธิบายทิศทางของความหนาและความเค้นหลังการเตรียมฟิล์ม ซึ่งผลลัพธ์นี้อาจเป็นประโยชน์ในการเตรียมสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์

Semaltianos (Semaltianos, 2001) ทำการศึกษาฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้วิธีระเหยสารด้วยความร้อน โดยเคลือบบนควอทซ์ที่มีความหนาระหว่าง 18 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยอัตราการระเหย 1 ถึง 2 อังสตรอม/วินาที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้ากึ่งโปร่งใสในการทดลองฟลูออโรไโดเซชันที่รวดเร็ว ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพบนควอทซ์ในฐานะที่เป็นขั้วไฟฟ้ากึ่งโปร่งใสและยังสามารถส่งผ่านแสงได้สูงสุดที่ 337 นาโนเมตร

Qiu (Qiu et al., 2002) ศึกษาผลของอัตราการสะสมของฟิล์มบางอลูมิเนียมต่อสมบัติโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้า โดยทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมที่มีความหนา 30 ถึง 650 นาโนเมตรบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกโดยไม่มีการให้ความร้อนขณะเคลือบ ด้วยวิธีระเหยลำอิเล็กตรอน อัตราการปลดปล่อยถูกควบคุมที่ 10 และ 33 นาโนเมตรต่อนาที ตามลำดับ จากการศึกษาโดยใช้ AFM AES และวัดความต้านทาน ได้ผลคือ ขนาดเกรนของฟิล์มบางอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและความขรุขระของผิวฟิล์มลดลงจาก 2.5 เป็น 1.5 นาโนเมตร และอัตราการปนเปื้อนของออกซิเจนภายในฟิล์มจะลดลงเมื่ออัตราการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้น

Müller (Mueller et al., 2006) ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบด้วยวิธีอิเล็กโตรเพลตติงและฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงด้วย XRD และ EBSD เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมจากวิธีต่างกันข้างต้น ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มบางที่มีความหนาต่างกันจะมีโครงสร้างผลึกต่างชนิดกันปะปนกันอยู่ในชั้นฟิล์มบางไม่เหมือนกัน

Amusan (Amusan et al., 2010) ศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบในสุญญากาศโดยวิธีระเหยด้วยความร้อน บนกระจกแบบไม่โครสโคปิก จากการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยโพรบสี่ขา (four-point probe) แสดงให้เห็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ  $-4.6 \times 10^{-6}$  โอห์มเซนติเมตร และ  $-2.17391 \times 10^5$  /โอห์ม/เซนติเมตร

ตามลำดับ จากการศึกษา<sup>11</sup>แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบได้สามารถนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพในโซลาร์เซลล์ชนิดฟิล์มบางได้

Panta (Panta & Subedi, 2013) ศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีทางฟิสิกส์หรือ PVD บนวัสดุรองรับที่เป็นกระจก โดยได้ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาระหว่าง 0.1483 ถึง 0.225 ไมโครเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยโพรบสี่ขา (four-point probe) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานของฟิล์มจะลดลงตามความหนาของฟิล์ม

Yu-Qing (Xiong et al., 2012) ศึกษาลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของฟิล์มบางโลหะอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยเทคโนโลยีอิเล็กตรอน ชิงโครตรอน เรโซแนนซ์ พลาสมาแอสซิสต์ อะตอมมิก เลเยอร์ ดีพอสิตชัน บนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกและซิลิกอนแบบ p-type โดยใช้ไตรเมธิลอลูมิเนียมและไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นและสารไวปฏิกิริยาตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเคลือบฟิล์มได้ด้วยวิธี PA-ALD ซึ่งทำให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้นของโลหะในระดับอนุภาค และโครงสร้างทางเคมีจะไม่มีผลต่อการนำไฟฟ้า แต่ผลึกจะเป็นตัวกำหนดที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ผลที่ได้จากการหลอมเหลวมีความสำคัญมากสำหรับการทำให้อลูมิเนียมมีความต้านทานต่ำ ด้วยการเพิ่มขนาดของผลึกและลดการปนเปื้อนหลังจากการหลอมเหลวทำให้เชื่อว่าฟิล์มจะเพิ่มการนำไฟฟ้าให้ดีขึ้น

Park (Park & Park, 2014) ศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยวิธีแบบไม่ทำลายพื้นผิวของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค dispersion characteristic of surface acoustic wave ในงานวิจัยได้เคลือบฟิล์มที่มีความหนาตั้งแต่ 200 นาโนเมตรจนถึง 1000 นาโนเมตรบนซิลิกอนระนาบ 100 ด้วยเทคนิค ดีซี สปีดเตอริง และวัดความหนาโดยใช้ SEM การศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อฟิล์มมีความหนาที่เพิ่มขึ้น อัตราเร็วของคลื่นเสียงจะลดลง ดังนั้นความหนาของฟิล์มบางสามารถวัดด้วยการใช้เทคนิค dispersion characteristic of surface acoustic wave

Chatpawee (Hom-on et al., 2018) ศึกษาความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี DC reactive magnetron sputtering และ RF reactive magnetron sputtering โดยได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความดันขณะเคลือบ กำลังสปัตเตอร์ และโหมดของการเคลือบ (DC และ RF) ที่มีผลต่อความหนาพื้นผิวของฟิล์มบาง พบว่าถ้าความดันขณะเคลือบมีค่าต่ำจะทำให้ฟิล์มบางมีพื้นผิวที่เรียบกว่าการใช้ความดันขณะเคลือบที่มีค่าสูง และที่กำลังสปัตเตอร์มีค่าสูงจะทำให้พื้นผิวฟิล์มบางที่ความหนาพื้นผิวที่สูง และผลการทดลองยังแสดงอีกว่าฟิล์มบางที่เคลือบ



ด้วยวิธี DC reactive magnetron sputtering มีความหนาแน่นผิวมากกว่า RF reactive magnetron sputtering

Muralidhar Singh (Singh et al., 2018) ศึกษาฟิล์มบางแบบโครงสร้างหลายชั้นที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ โดยในงานวิจัยได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์บนเซรามิก เพื่อนำฟิล์มบางอลูมิเนียมมาใช้สำหรับสะท้อนแสง (Reflective layer) โดยมีฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เป็นชั้นสำหรับการป้องกัน (Protective layer) และชั้นสำหรับเชื่อมต่อ (Bond layer) ระหว่างเซรามิกและชั้นสะท้อนแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการแปรค่าความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ให้มีค่าเท่ากับ 100 200 และ 300 นาโนเมตรโดยการเพิ่มความดันขณะเคลือบ เพื่อศึกษาผลของการสะท้อนแสง ความแข็งของฟิล์มบางและความหนาแน่นผิวของฟิล์มบางแบบหลายชั้น จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความดันขณะเคลือบจะทำให้ฟิล์มบางมีความแข็งมากขึ้นและมีความหนาแน่นผิวเพิ่มขึ้น และผลจาก UV-VIS-NIR พบว่าฟิล์มบางมีการสะท้อนแสงในช่วงใกล้เคียวกอินฟราเรด และช่วงที่ตามองเห็นดีขึ้นจากร้อยละ 84 เป็นร้อยละ 96 แต่มีการสะท้อนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตลดลง

K. Koski (Koski, Hölsä, & Juliet, 1999) ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์อันประกอบไปด้วย อัตราส่วนระหว่าง ออกซิเจนและอลูมิเนียม ความหนาแน่น ความแข็งในระดับนาโนเมตร ความเครียดภายใน โครงสร้างผลึกและความหนาแน่นผิว ซึ่งในการทดลองเป็นการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์โดยใช้ กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน โลหะสแตนเลสและพอลีคาร์บอนเนตเป็นวัสดุรองรับ โดยวิธี DC reactive magnetron sputtering จากผลการศึกษาพบว่า การใช้แรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสและความดันขณะเคลือบต่ำนั้นทำให้ฟิล์มบางมีความแข็งสูงและมีความเครียดภายในต่ำ การใช้ความดันขณะเคลือบที่สูง แรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสสูง และแรงดันไฟฟ้าที่เป่าต่ำนั้นทำให้ได้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความหนาแน่น การใช้ความดันขณะเคลือบต่ำและใช้แรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสสูง จะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีพื้นผิวเรียบ และอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับอลูมิเนียมสามารถควบคุมได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป่าสารเคลือบ โดยปริมาณของออกซิเจนนั้นแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า

E. Koushki (Koushki, Mousavi, & Baedi, 2016) ศึกษาปริมาณของออกซิเจนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี Reactive magnetron sputtering โดยใช้ Soda glass เป็นวัสดุรองรับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นการจัดเรียงตัวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ในเฟสของคิวบิก (Cubic aluminium oxide phase) จากการใช้กล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดหรือ SEM แสดงให้เห็นถึงขนาดของเกรนมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 25 นาโนเมตร ผลกระทบจากปริมาณของแก๊สออกซิเจนต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์นั้นพบว่า ความโปร่งแสงของฟิล์มบางนั้นมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 70% เมื่อสังเกตจากแสงในย่านที่ตามองเห็น และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สออกซิเจนในระหว่างกระบวนการเคลือบ นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่าดัชนีหักเห (Refractive index) มีค่าลดลงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Extinction coefficient) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้น

S. Prasanna (Prasanna et al., 2013) ศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี DC reactive magnetron sputtering ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ซิลิกอนระนาบ 100 เป็นวัสดุรองรับ และความดันของแก๊สออกซิเจนที่ 0.03 ปาสคาลกับกำลังสปัตเตอร์ 60 วัตต์ ในงานวิจัยวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางโดยใช้ X-ray photoelectron spectroscopy ตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้ X-ray diffraction, Scanning electron microscopy และ Atomic force microscopy และมีการเคลือบฟิล์มบางแบบหลายชั้น Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al บนซิลิกอนแบบ p-type เพื่อสร้างเป็นตัวเก็บประจุสำหรับศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของธาตุออกซิเจนต่อธาตุอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 1.72 โครงสร้างของฟิล์มนั้นเป็นแบบอสัณฐานถึงแม้ว่าจะอบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสแล้วก็ตาม แต่ความหนาแน่นผิวลดลงเมื่อชิ้นงานได้รับการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสโดยมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.73 นาโนเมตร และจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 15 ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

G.R. Argade (Argade, Panigrahi, & Mishra, 2012) ศึกษาผลของขนาดเกรนที่มีต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของโลหะผสมระหว่างแมกนีเซียมและนีโอไดเมียม โดยขนาดเกรนที่ทำการศึกษาามีค่าตั้งแต่ 70 ไมโครเมตรจนถึง 0.7 ไมโครเมตร ทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt.% ซึ่งผลจากกราฟโพลาไรเซชันของการต้านทานการกัดกร่อนแสดงให้เห็นว่าเกรนที่มีขนาดละเอียดสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเกรนที่มีความหยาบ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงกรอบแนวคิดการวิจัย อุปกรณ์ เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย การเตรียมวัสดุตลอดจนถึงขั้นตอนและวิธีการทดลองสำหรับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางแสง รวมถึงวิธีการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

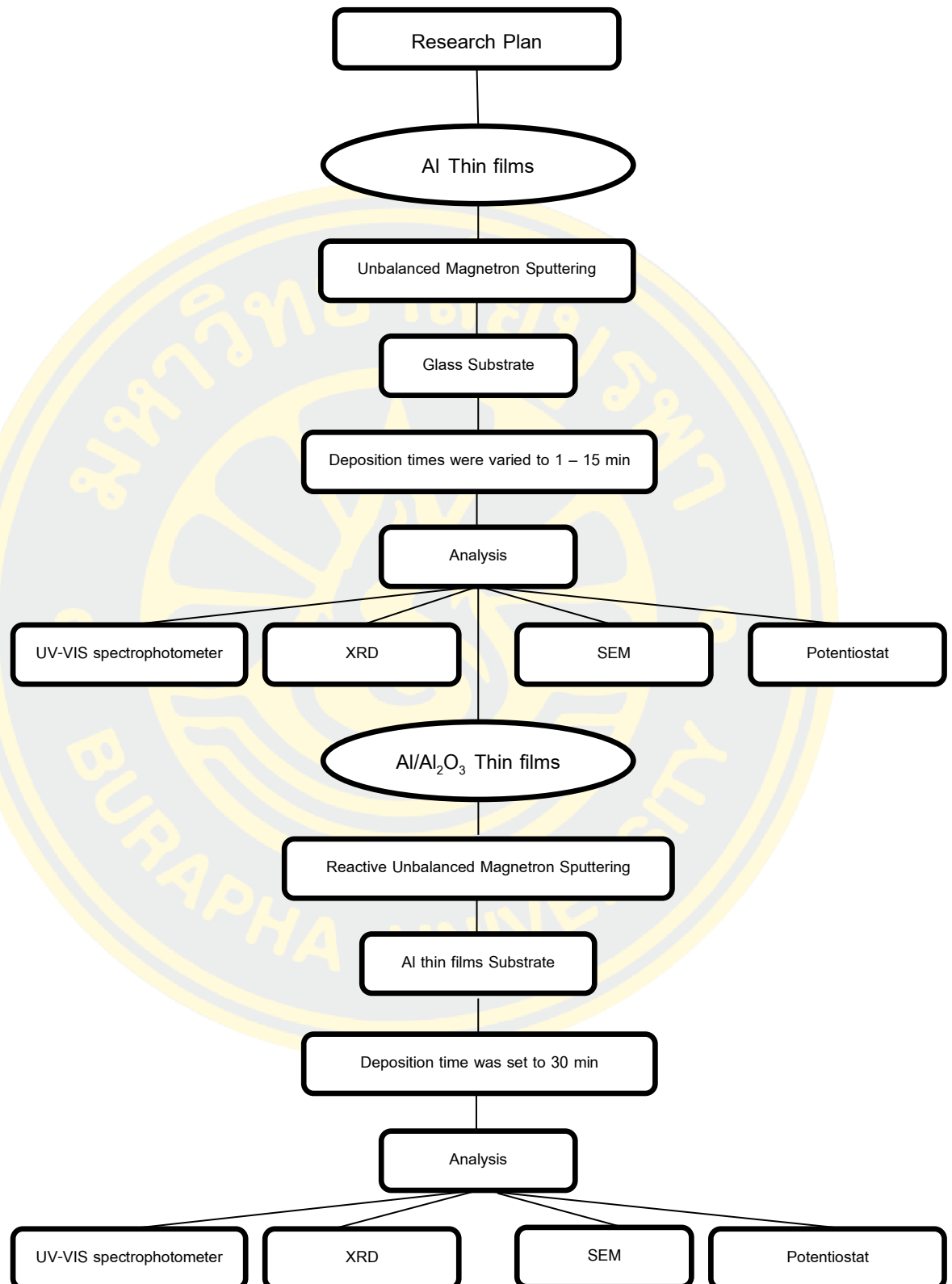
##### 3.1.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธี ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

- การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ เตรียมโดยใช้วิธีการเคลือบแบบอับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง
- การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบบนกระจกสไลด์ เตรียมโดยใช้วิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟ อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

##### 3.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์

- ศึกษาการสะท้อนแสง
- ศึกษาโครงสร้างผลึก
- ศึกษาลักษณะพื้นผิว
- ศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อน

ซึ่งรายละเอียดกรอบแนวคิดการวิจัยของงานวิทยานิพนธ์นี้แสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 กรอบแนวคิดการวิจัย

### 3.2 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การเตรียมฟิล์มบาง อลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ (2) การศึกษาการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง ศึกษา ลักษณะทางพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.2.1 การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์

- เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบรีแอกตีฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเปตเตอร์ที่ใช้ในงานนี้คือ เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบางภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (ภาพที่ 19)

- วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- เป่าสารเคลือบเป็นเป้าอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.999 % ขนาด 3 นิ้ว

- วัสดุรองรับ คือ กระดาษสไลด์

- แก๊ส ประกอบด้วยแก๊ส 2 ชนิดคือ

- แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% เป็นแก๊สสเปตเตอร์

- แก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.995% เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา

#### 3.2.2 การศึกษาการสะท้อนแสง โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง ศึกษาลักษณะทางพื้นผิว

องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน

- ศึกษาการสะท้อนแสงของฟิล์มด้วย UV-VIS Spectrophotometer ซึ่งเป็น Model Shimadzu 2600 with Integrating Sphere Attachment ของหน่วยบริการนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (ภาพที่ 20)

- ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8-Discover ของสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ภาพที่ 21)

- ความหนา ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางศึกษาด้วย Scanning electron microscope (SEM) ซึ่งเป็นยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1450VP ของศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (ภาพที่ 22)

- องค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์มศึกษาด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งของเครื่อง SEM ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1450VP ของศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (ภาพที่ 22)

- ทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วย เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat galvanostat ยี่ห้อ Auto lab รุ่น PGSTAT302N ของวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ภาพที่ 23)



ภาพที่ 19 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอกติฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเทอริง ที่ใช้ใน งานวิจัย



ภาพที่ 20 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer



ภาพที่ 21 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)



ภาพที่ 22 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)



ภาพที่ 23 เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat galvanostat

### 3.3 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคทีฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบรีแอคทีฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ในการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ ระบบของเครื่องเคลือบฟิล์มบางนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) ทำจากสแตนเลส รูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 310.0 มิลลิเมตร สูง 370.0 มิลลิเมตร ภายในมีฐานสำหรับวางวัสดุรองรับ และท่อสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) โดยปั๊มสุญญากาศใช้ทำหน้าที่สูบน้ำออกจากภาชนะสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศแบบแพร่ไอระเหยระบายความร้อนด้วยน้ำสำหรับสูบลู่วสุญญากาศระดับสูง และ ปั๊มสุญญากาศโรตารีสำหรับสูบลู่วสุญญากาศหยาบและใช้เป็นเครื่องสูบน้ำหลัง ในส่วนของการวัดความดัน ใช้มาตรวัดความดันของ Balzers รุ่น TPG 300 โดยใช้หัววัดแบบพิรานี รุ่น TPR 010 และหัววัดแบบ เบนนิง รุ่น IKR 050

3.3.2 ระบบเคลือบ (Coating system) เป็นส่วนเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์ ประกอบด้วยวัสดุรองรับ แมกนีตรอนแคโทดแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เป้าสารเคลือบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวนสองชุด ระบบจ่ายไฟ (Power supply) กระแสตรง 3 แอมแปร์ แรงดันสูง 1000 โวลต์ ระบบควบคุมแก๊ส (Mass flow controller) ด้วยเครื่องควบคุมการไหลมวล แก๊สของ BOC-EDWARDS รุ่น 825 Series B สำหรับทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส



### 3.4 การสร้างภาวะสุญญากาศ

การเคลือบฟิล์มบางในภาวะสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง จำเป็นต้องลดความดันภายในภาวะสุญญากาศที่ระดับสุญญากาศสูง (High vacuum) ความดันประมาณ  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-5}$  มิลลิบาร์ เพื่อลดการปนเปื้อนของฟิล์มบางที่เคลือบได้เนื่องจากแก๊สชนิดอื่นนอกเหนือจากแก๊สที่ต้องการเคลือบภาวะสุญญากาศ (Residual gas) โดยการสร้างสภาวะสุญญากาศจะใช้ระบบเครื่องสุญญากาศประกอบด้วยปั๊มแบบแพร่ไอ (Diffusion pump) หนุนหลังด้วยปั๊มกลโรตารี (Rotary pump) ที่ต่อเข้ากับภาวะสุญญากาศด้วยท่อและมีวาล์วควบคุมการเปิด-ปิด ตอนต้นของการเริ่มการทดลองนั้นจะทำการลดความดันภายในภาวะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศเป็นความดันต่ำประมาณ  $10^{-2}$  มิลลิบาร์โดยการใช้ปั๊มกลโรตารี จากนั้นจึงใช้ปั๊มแพร่ไอลดความดันต่อจาก  $10^{-2}$  มิลลิบาร์ให้ถึงความดันช่วง  $10^{-5}$  มิลลิบาร์

สำหรับองค์ประกอบของเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (ภาพที่ 24) และขั้นตอนการสร้างสภาวะสุญญากาศมีดังนี้

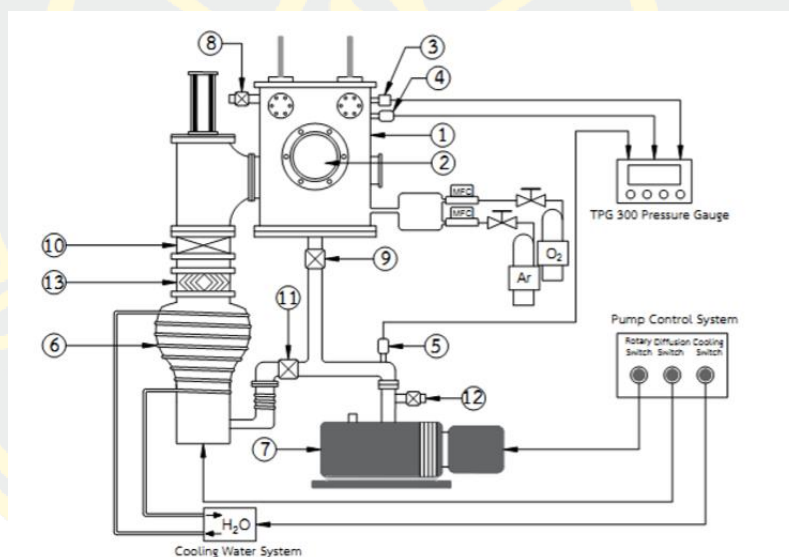
1. ตรวจสอบวาล์วสุญญากาศหยาบ (หมายเลข 9) วาล์วส่วนท้าย (หมายเลข 11) และวาล์วสุญญากาศสูง (หมายเลข 10) ให้อยู่ในสภาพปิดทั้งหมด
2. เปิดสวิตช์หลัก เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบต่าง ๆ ของเครื่อง เช่น ระบบวัดความดันและระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสุญญากาศ เป็นต้น หลังจากนั้นเปิดสวิตช์ปั๊มกลโรตารีเพื่อเปิดการใช้งานปั๊ม (หมายเลข 7)
3. สูบอากาศออกจากปั๊มสุบแบบแพร่ไอโดยใช้ปั๊มสุบกลโรตารี โดยการเปิดวาล์วส่วนท้าย เพื่อให้ปั๊มกลโรตารีสูบอากาศจากปั๊มสุบแบบแพร่ไอ (หมายเลข 6) จนความดันในปั๊มสุบแบบแพร่ไอมีค่าน้อยกว่า  $10^{-2}$  มิลลิบาร์ ซึ่งสามารถอ่านค่าความดันได้จากมาตรวัดความดันแบบพิรานี (หมายเลข 4) ที่ความดันระดับนี้เป็นความดันที่ปั๊มสุบแบบแพร่ไอสามารถทำงานได้ พร้อมทั้งเปิดสวิตช์ปั๊มสุบแบบแพร่ไอ เพื่อให้ทำความร้อนของปั๊มทำงาน เป็นการเริ่มต้นต้มน้ำมันโดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที
4. ในระหว่างการต้มน้ำมัน นำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบฟิล์มบางวางในภาวะสุญญากาศโดยก่อนวางวัสดุรองรับต้องตรวจความดันในภาวะสุญญากาศว่ายังคงอยู่ในสภาวะสุญญากาศหรือไม่ ถ้ายังเป็นสุญญากาศก็ทำการเปิดวาล์วสำหรับปล่อยให้อากาศเข้าไปในภาวะสุญญากาศ เพื่อให้อากาศเข้าสู่ภาวะสุญญากาศ จนความดันในภาวะสุญญากาศเท่ากับความดัน

บรรยากาศ หลังจากนั้นทำการเปิดฝาครอบภาชนะสุญญากาศออก นำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบไปวาง ปิดฝาครอบและปิดวาล์วปล่อยอากาศให้สนิท

5. สร้างสภาวะสุญญากาศขั้นต้นในภาชนะสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุบกลโรตารี โดยการปิดวาล์วส่วนท้าย แล้วเปิดวาล์วสุญญากาศหยาบเพื่อให้ปั๊มกลโรตารีสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $10^{-2}$  มิลลิบาร์ เพื่ออ่านความดันจากมาตรวัดความดันแบบช่วงกว้าง (หมายเลข 3)

6. เมื่อต้มน้ำมันจนครบ 20 นาทีแล้ว ทำการสร้างสภาวะสุญญากาศสูงเพื่อให้ปั๊มสุบแบบแพร่ไอสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อลดความดันในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับสภาวะสุญญากาศสูง หรืออยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-6}$  มิลลิบาร์

7. จับเวลาและรอจนกว่าความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความดันพื้นฐาน ( $P_b$ ) ก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางต่อไป



ภาพที่ 24 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบลูสุญญากาศ ของระบบเคลือบแบบสปีดเตอร์ริง

- |   |  |
|---|--|
| 1. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)           | 8. วาล์วสำหรับปล่อยอากาศ (Vent Valve)    |
| 2. หน้าต่าง (Window)                        | 9. วาล์วสุญญากาศหยาบ (Roughing Valve)    |
| 3. มาตรวัดความดันแบบเพนนิ่ง (Penning Guage) | 10. วาล์วสุญญากาศสูง (High Vacuum Valve) |
| 4. มาตรวัดความดันแบบพิรานี (Pirani Guage)   | 11. วาล์วส่วนท้าย (Backing Valve)        |
| 5. มาตรวัดความดันแบบพิรานี (Pirani Guage)   | 12. วาล์วสำหรับปล่อยอากาศ (Vent Valve)   |
| 6. ปั๊มสุบแบบแพร่ไอ (Diffusion Pump)        | 13. แบริล (Baffle)                       |
| 7. ปั๊มสุบโรตารี (Rotary Pump)              |  |

### 3.5 การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยวิธีรีแอคทีฟ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้ ติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับระบบเคลือบ โดยให้ ศักย์ไฟฟ้าลบบต่อเข้ากับแมกนีตรอนแคโทด และศักย์ไฟฟ้าบวกต่อลงกราวด์ร่วมกับภาชนะสุญญากาศ ติดตั้งเป้าอลูมิเนียมเข้ากับแมกนีตรอนแคโทด โดยด้านหลังจะมีระบบไหลเวียนน้ำเย็นเพื่อให้ระบาย ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าเป้าสารเคลือบเนื่องจากถูกสปีดด้วยไอออนอาร์กอน และวางวัสดุ รองรับบนแผ่นรองรับซึ่งสามารถปรับระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับได้ โดยมีแผ่นบัง (Shutter) กั้นระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับในขณะที่ทำการสปีดเตอร์เพื่อทำความสะอาด ผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (Pre-sputtering) และอุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส Mass Flow Controller (MFC) จะต่อเข้ากับระบบเพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนที่เข้าสู่ ภาชนะสุญญากาศอย่างละเอียด มีหน่วยเป็นมาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที หรือ Standard Cubic Centimeter per Minute at STP (sccm)

#### 3.5.1 การทดลองที่ 1 วิธีการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียม

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของเวลาในการเคลือบที่มีต่อการสะท้อนแสง ลักษณะพื้นผิว ความทนทานต่อการกัดกร่อนและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียม

##### แนวทางการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังข้อมูลใน ตารางที่ 3 จากนั้นนำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ ได้แก่ การสะท้อนแสงของฟิล์ม บางโดย UV-VIS spectrophotometer ลักษณะพื้นผิววิเคราะห์โดยเทคนิค SEM ทดสอบความ ทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat และศึกษาโครงสร้างผลึกโดย เทคนิค XRD เพื่อหาระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเป็นฟิล์ม สะท้อนแสง

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม

เงื่อนไข	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	อลูมิเนียม (99.999%)
แก๊สสปัตเตอร์	แก๊สอาร์กอน (99.999%)
วัสดุรองรับ	กระจกสไลด์
ความดันพื้น (มิลลิบาร์)	$5.0 \times 10^{-5}$
กระแสไฟฟ้าที่เป้าสารเคลือบ (มิลลิแอมแปร์)	500
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (มาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)	4.0
ระยะเวลาการเคลือบ (นาที)	1, 5, 10, 15

- ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม

- นำวัสดุรองรับที่ทำความสะอาดแล้ววางบนแผ่นวางวัสดุรองรับ นำไปวางในภาชนะสุญญากาศ แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศ
- ลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้เท่ากับ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ กำหนดเป็นค่าความดันพื้นฐาน ( $P_0$ ) ของระบบก่อนทำการเคลือบฟิล์ม บันทึกค่าความดันพื้นฐานที่อ่านได้
- ปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบโดยตั้งค่าอัตราการไหลให้เท่ากับเงื่อนไขที่ตั้งไว้ เปิดแผ่นกั้นระหว่างเป้าสารเคลือบและกระจกสไลด์ แล้วป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้แคโทดจนเกิดการโกล์ดดิสชาร์จเพื่อทำความสะอาดหน้าเป้าสารเคลือบด้วยกระบวนการ Pre-sputtering เป็นเวลา 5 นาทีพร้อมกับเปิดระบบระบายความร้อนของแมกนีตรอนแคโทด
- ปรับค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่โดยให้มีค่าตามที่กำหนด จากนั้นนำแผ่นบังที่กั้นอยู่ระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับออก เริ่มจับเวลาในการเคลือบฟิล์มบางให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด
- หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า ปิดแก๊สอาร์กอน ปิดวาล์วสุญญากาศทั้งหมดไม่ให้ภาชนะสุญญากาศเชื่อมต่อกับท่อใด ๆ ปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศเพื่อนำวัสดุรองรับที่เคลือบฟิล์มบางแล้วออกจากภาชนะสุญญากาศ

### 3.5.2 การทดลองที่ 2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ ได้แก่ การสะท้อนแสง ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบธาตุทางเคมี ความทนทานต่อการกัดกร่อนและโครงสร้างผลึกที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียม

#### แนวทางการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์และฟิล์มบางอลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังข้อมูลในตารางที่ 4 จากนั้นนำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ ได้แก่ การสะท้อนแสงของฟิล์มบางโดย UV-VIS spectrophotometer ลักษณะพื้นผิวและวิเคราะห์โดยเทคนิค SEM ศึกษาองค์ประกอบธาตุทางเคมีโดยเทคนิค EDX ทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat และศึกษาโครงสร้างผลึกโดยเทคนิค XRD

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

เงื่อนไข	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	อลูมิเนียม (99.999%)
แก๊สสปัตเตอร์	แก๊สอาร์กอน (99.999%)
แก๊สไวปฏิกิริยา	แก๊สออกซิเจน (99.999%)
วัสดุรองรับ	กระจกสไลด์ ฟิล์มบางอลูมิเนียม
ความดันพื้น (มิลลิบาร์)	$5.0 \times 10^{-5}$
กระแสไฟฟ้าที่เป้าสารเคลือบ (มิลลิแอมแปร์)	700
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (มาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)	4.0
อัตราการไหลแก๊สออกซิเจน (มาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)	0.5
ระยะเวลาการเคลือบ (นาที)	30

- ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

1. นำวัสดุรองรับที่เตรียมไว้แล้ววางบนแผ่นวางวัสดุรองรับ นำไปวางในภาชนะสุญญากาศ แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศ

2. ลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้เท่ากับ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ กำหนดเป็นค่าความดันพื้นฐาน ( $P_0$ ) ของระบบก่อนทำการเคลือบฟิล์ม บันทึกค่าความดันพื้นฐานที่อ่านได้

3. ปลดปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบโดยตั้งค่าอัตราการไหลให้เท่ากับเงื่อนไขที่ตั้งไว้ เปิดแผ่นกั้นระหว่างเป้าสารเคลือบและกระจกสไลด์ แล้วป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้แคโทดจนเกิดการโกลด์ดิสชาร์จ เพื่อทำความสะอาดหน้าเป้าสารเคลือบด้วยกระบวนการ Pre-sputtering เป็นเวลา 5 นาทีพร้อมกับเปิดระบบระบายความร้อนของแมกนีตรอนแคโทด

4. ปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ระบบโดยตั้งค่าอัตราการไหลเท่ากับเงื่อนไขที่กำหนด

5. ปรับค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่โดยให้มีค่าตามที่กำหนด จากนั้นนำแผ่นบังที่กั้นอยู่ระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับออก เริ่มจับเวลาในการเคลือบฟิล์มบางให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด

6. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า ปิดแก๊สอาร์กอน ปิดวาล์วสุญญากาศทั้งหมดไม่ให้ภาชนะสุญญากาศเชื่อมต่อกับท่อใด ๆ ปลดปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศเพื่อนำวัสดุรองรับที่เคลือบฟิล์มบางแล้วออกจากภาชนะสุญญากาศ

7. นำฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ไปศึกษาลักษณะเฉพาะเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเป็นฟิล์มบางสะท้อนแสงต่อไป

### 3.6 การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์

1. ศึกษาค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ นำกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์แล้วไปทำการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงด้วย UV-VIS spectrophotometer โดยเริ่มจากความยาวคลื่นเท่ากับ 300 นาโนเมตรจนถึงความยาวคลื่นเท่ากับ 900 นาโนเมตร
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ นำกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์แล้วไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อหาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เกิดขึ้น โดยใช้วิธี  $\theta$ - $2\theta$  ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ ซึ่งจะทำการวัดในรูปแบบ grazing mode กำหนดมุมตกกระทบของลำรังสีเอกซ์ 2 องศา และทำการสแกนมุม  $2\theta$  ในช่วง 20-80 องศา ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $2\theta$  และความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดการเลี้ยวเบนจากผลึก จากนั้นนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน JCPDS
3. ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ นำกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์แล้วไปทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FE-SEM) วัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์
4. ศึกษาองค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ นำกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์แล้วไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) โดยจะวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ข้อมูลที่ได้จะเป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุที่มีอยู่ในเนื้อฟิล์มบาง
5. ทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน นำกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์แล้วไปทำการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat) โดยทำการแช่ชิ้นงานลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -2 โวลต์จนถึง 1.3 โวลต์ ซึ่งใช้ระยะเวลาแช่ฟิล์มบางเพื่อทดสอบการกัดกร่อนเป็นเวลา 1 นาที

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

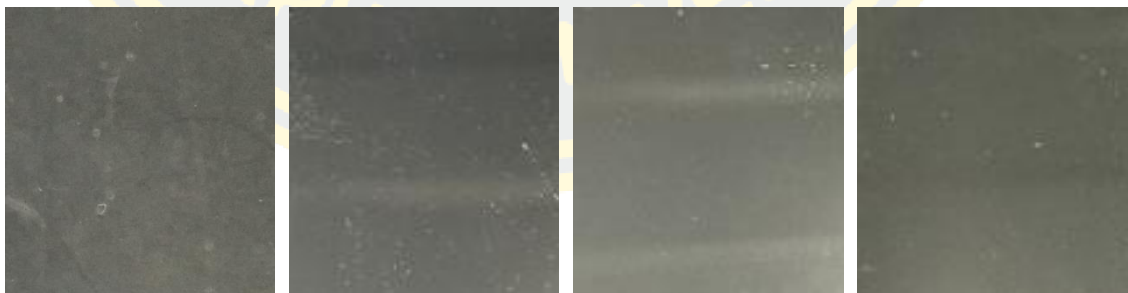
บทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามแนวทางการศึกษาในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบบนกระจกสไลด์และฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลของการแปรค่าเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

ส่วนนี้เป็นข้อมูลจากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซี อับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง โดยแปรค่าเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นเวลา 1, 5, 10 และ 15 นาที ซึ่งประกอบไปด้วย ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ การสะท้อนแสง โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความทนทานต่อการกัดกร่อน

##### 4.1.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

ภาพที่ 25 แสดงภาพถ่ายลักษณะฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ ที่ใช้เวลาเคลือบ 1, 5, 10 และ 15 นาที พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขมีการยึดเกาะกับกระจกสไลด์ได้ดี สีของผิวอลูมิเนียมที่เคลือบมีลักษณะสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน



(ก)

(ข)

(ค)

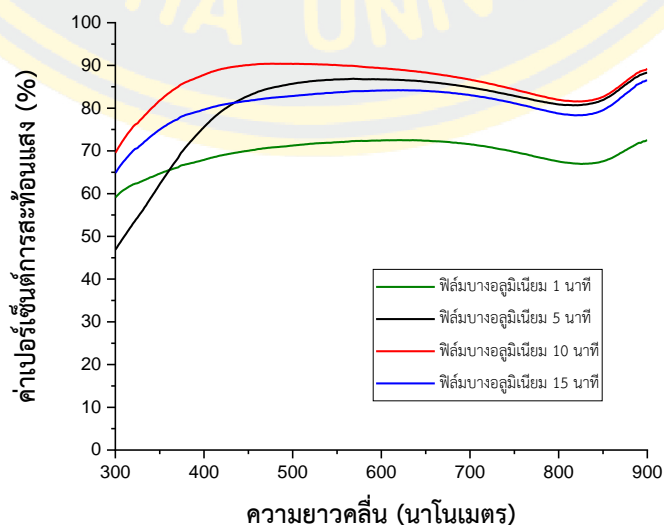
(ง)

ภาพที่ 25 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ (ก) 1 นาที (ข) 5 นาที (ค) 10 นาที (ง) 15 นาที



#### 4.1.2 ผลการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

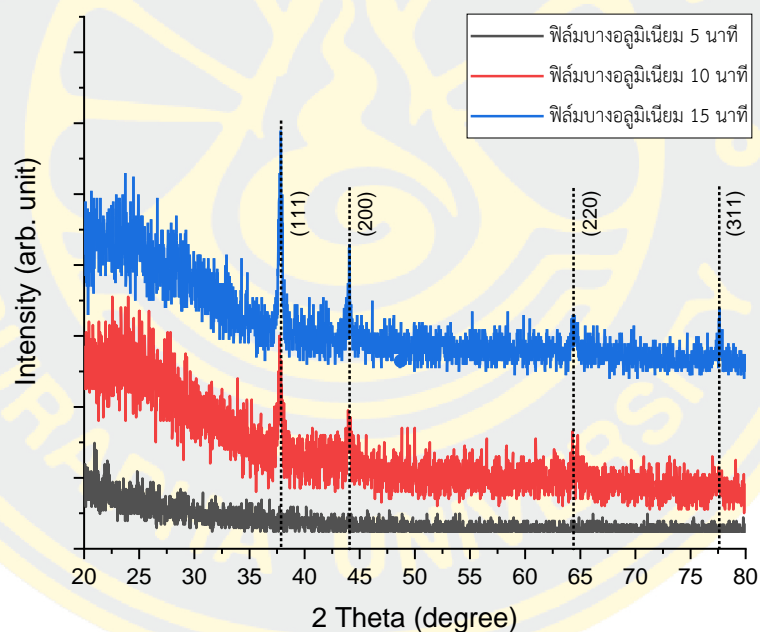
ภาพที่ 26 แสดงกราฟค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 1, 5, 10 และ 15 นาที โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง พบว่าฟิล์มบางมีลักษณะการสะท้อนแสงโดยรวมที่คล้ายคลึงกัน โดยมีลักษณะดังนี้ มีการสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 500 นาโนเมตร จากนั้นการสะท้อนแสงของฟิล์มบางมีการลดลงในความถี่ช่วง 500 ถึง 850 นาโนเมตร และมีลักษณะการสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นอีกครั้งในความยาวคลื่นช่วง 850 ถึง 900 นาโนเมตร ซึ่งสามารถกล่าวรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้ ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาทีมีความสามารถในการสะท้อนแสงดีที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางที่เคลือบด้วยเวลา 5 และ 15 นาที ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 900 นาโนเมตร แต่ฟิล์มบางที่เคลือบด้วยเวลา 5 นาทีสามารถสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 440 ถึง 900 นาโนเมตรได้ดีกว่าฟิล์มบางที่เคลือบเป็นเวลา 15 นาที แต่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 440 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้น้อยกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 15 นาที ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นระยะเวลา 1 นาที ชั้นฟิล์มมีความหนาน้อยมากจึงทำให้แสงบางส่วนสามารถส่งผ่านผิวฟิล์มได้ จึงทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบเป็นระยะเวลา 1 นาทีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงน้อยที่สุด ทำให้เงื่อนไขเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นระยะเวลา 1 นาทีจึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปเป็นฟิล์มบางสำหรับการสะท้อนแสง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ 5, 10 และ 15 นาทีสำหรับนำไปใช้เป็นฟิล์มบางสะท้อนแสงและเป็นฐานสำหรับเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์



ภาพที่ 26 เปอร์เซนต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลาต่าง ๆ

#### 4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

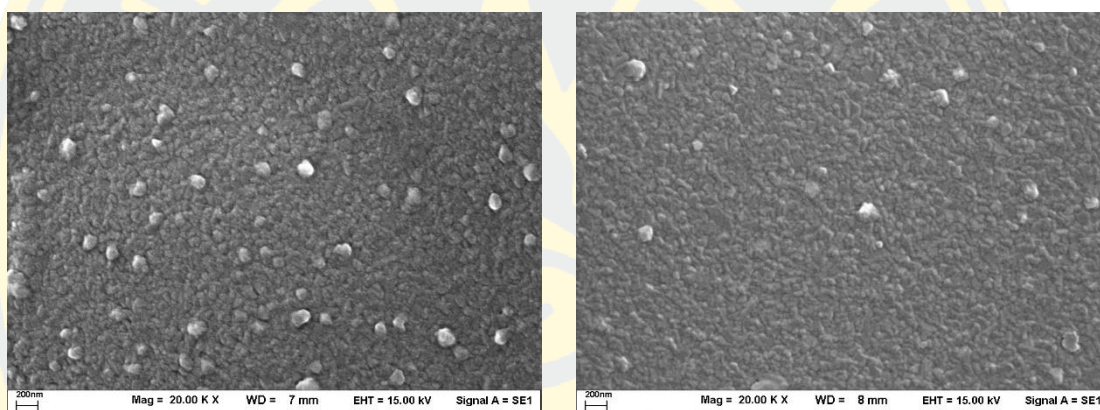
ภาพที่ 27 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบ 5, 10 และ 15 นาที พบว่าไม่ปรากฏการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5 นาที ส่วนฟิล์มบางที่เคลือบเป็นเวลา 10 และ 15 นาทีนั้นพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมประมาณ 37.78, 44.16, 64.54 และ 77.69 ตรงกับระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ของธาตุอลูมิเนียมตามลำดับ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (Face Centered Cubic ; FCC) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 04-0787 นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณขนาดผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมจากพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมประมาณ 37.78 ซึ่งตรงกับระนาบ (111) ของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 10 และ 15 นาทีได้เท่ากับ 22.21 และ 27.63 นาโนเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

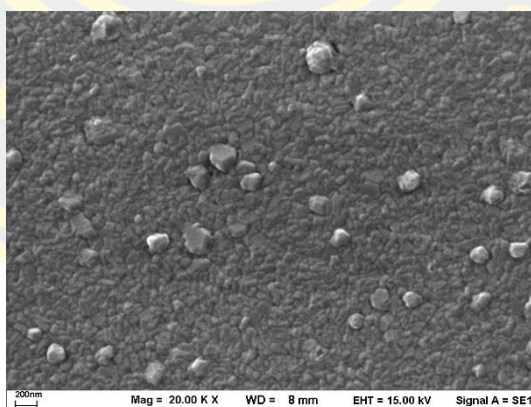
#### 4.1.4 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

ภาพที่ 28 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาที พื้นผิวของฟิล์มบางปรากฏเกรนที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิวฟิล์มบาง ในขณะที่ฟิล์มบางที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 5 นาทีพบลักษณะพื้นผิวมีรูพรุนระหว่างเกรนกระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิว ส่วนฟิล์มบางที่ใช้เวลาการเคลือบ 15 นาทีปรากฏเกรนที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ไม่สม่ำเสมอกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว



(ก)

(ข)

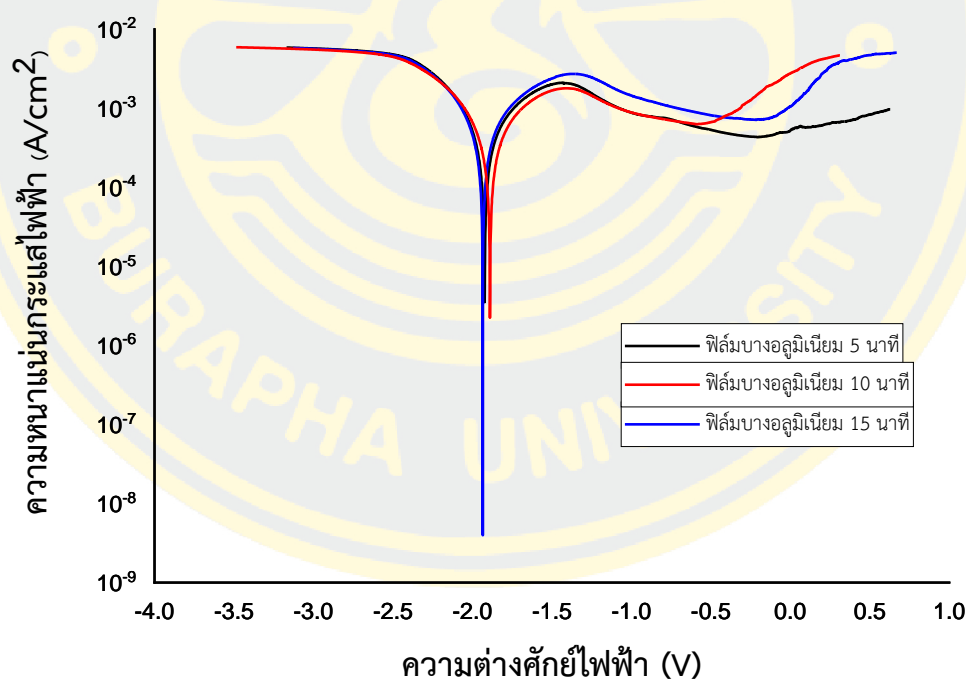


(ค)

ภาพที่ 28 ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที

#### 4.1.5 ผลการศึกษาความหนาแน่นต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

ภาพที่ 29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า หรือ โปเทนชิโอสแตต (Potentiostat) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีระยะเวลาแช่ฟิล์มบางเพื่อทดสอบการกัดกร่อนเป็นเวลา 1 นาที ของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 5, 10 และ 15 นาที พบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของกราฟที่คล้ายคลึงกันของฟิล์มบางอลูมิเนียมทั้ง 3 เงื่อนไข โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 5, 10 และ 15 นาทีมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนหรือ  $E_{\text{corr}}$  เท่ากับ -1.92, -1.89 และ -1.93 โวลต์ตามลำดับ และมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือ  $I_{\text{corr}}$  เท่ากับ  $6.59 \times 10^{-4}$ ,  $5.47 \times 10^{-4}$  และ  $6.66 \times 10^{-4}$  แอมป์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 29 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยระยะเวลาต่าง ๆ

## 4.2 ผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์

ส่วนนี้เป็นข้อมูลจากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซี รีแอคทีฟ อันทาลานซ์ แมกนีตรอน สเปคโตรริง โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เป็นเวลา 30 นาทีและมีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 4.0 และ 0.5 มาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งประกอบไปด้วยผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์ การส่งผ่านแสง ลักษณะพื้นผิว ภาคตัดขวางและโครงสร้างผลึก

### 4.2.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์

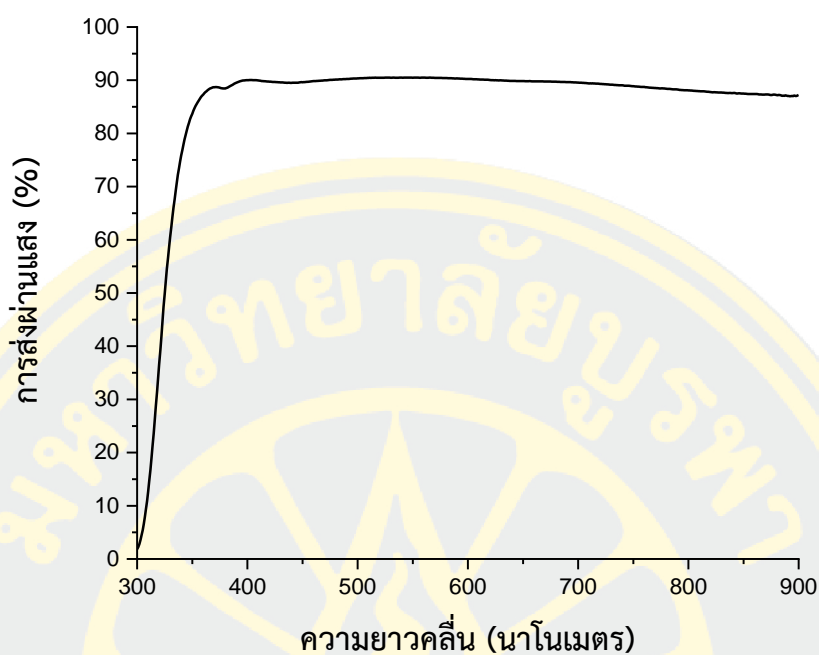
ภาพที่ 30 แสดงภาพถ่ายลักษณะฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์มีลักษณะใสมากและแสงสามารถส่งผ่านได้



ภาพที่ 30 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 30 นาที

### 4.2.2 ผลการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์

ภาพที่ 31 แสดงกราฟค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง พบว่าลักษณะการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางมีลักษณะการส่งผ่านแสงที่คงที่ตั้งแต่ความยาวคลื่นประมาณเท่ากับ 350 นาโนเมตรจนถึง 900 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแสงที่อยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นจนถึงแสงช่วงเข้าใกล้อินฟราเรด โดยมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านเท่ากับ 89.20%

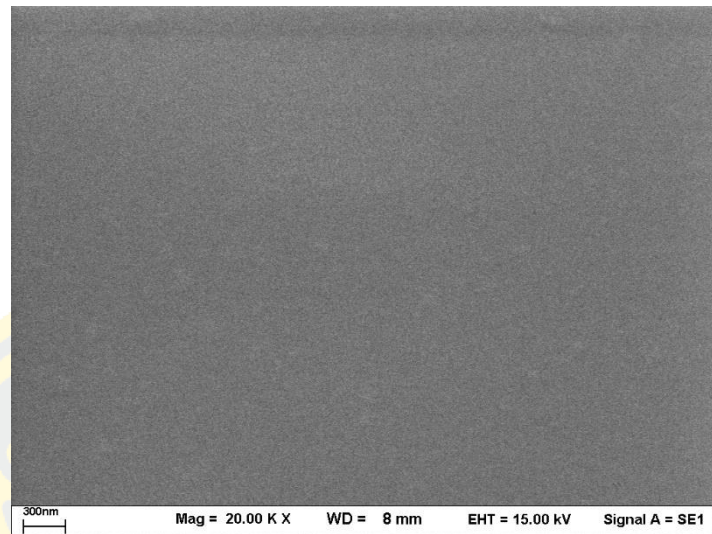


ภาพที่ 31 เปรอ์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ 30 นาที

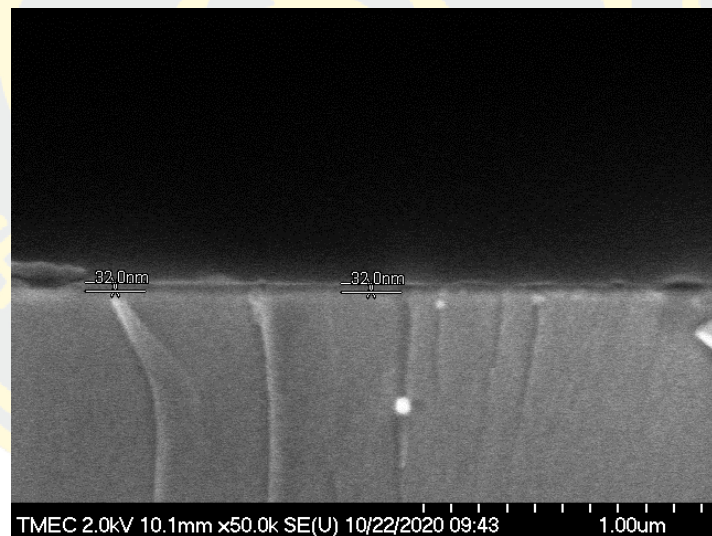
#### 4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังแสดงในภาพที่ 32 พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะเรียบเนียน

จากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope ; FE-SEM) ดังแสดงในภาพที่ 33 พบว่ามีการเกิดชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ โดยมีความหนาประมาณ 32 นาโนเมตร



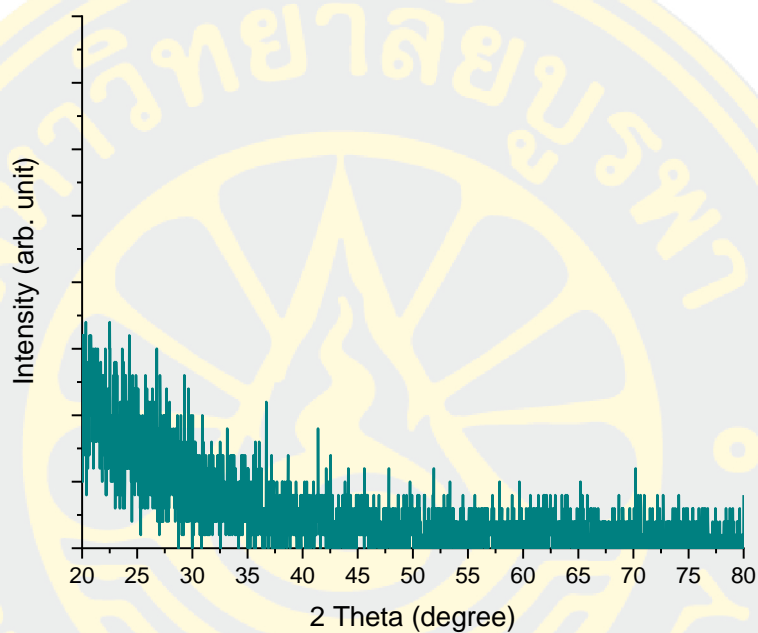
ภาพที่ 32 ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 30 นาที



ภาพที่ 33 ภาคตัดขวางที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชันของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 30 นาที

#### 4.2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์กระจกสไลด์

ภาพที่ 34 แสดงรูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าไม่ปรากฏการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์



ภาพที่ 34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์



#### 4.3 ผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

ส่วนนี้เป็นข้อมูลจากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เตรียมโดยวิธีดีซี รีแอคทีฟ ออานาลานซ์ แมกนีตรอน สเปคโตรริง โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เป็นเวลา 30 นาทีและมีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 4.0 และ 0.5 มาตรฐานลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งประกอบไปด้วยผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม การสะท้อนแสง โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ภาคตัดขวาง องค์ประกอบธาตุทางเคมีและความทนทานต่อการกัดกร่อน

##### 4.3.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

ภาพที่ 35 แสดงภาพถ่ายลักษณะฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมส่งผลให้สีของผิวฟิล์มที่มีลักษณะเข้มขึ้น และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้น

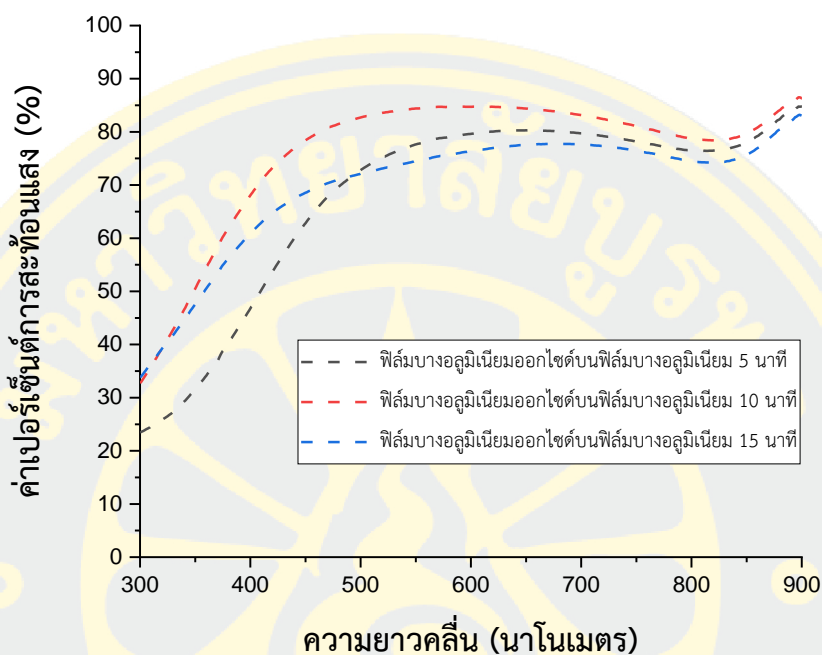


ภาพที่ 35 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยฟิล์มบางอลูมิเนียมใช้ระยะเวลาในการเคลือบ (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที

##### 4.3.2 ผลการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

ภาพที่ 36 แสดงกราฟค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง พบว่าลักษณะการสะท้อนแสงของฟิล์มบางยังคงมีลักษณะการสะท้อนแสงที่คล้ายคลึงกับการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมแต่ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงโดยรวมลดลง โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10 นาทีสามารถสะท้อนแสงในช่วงความยาว

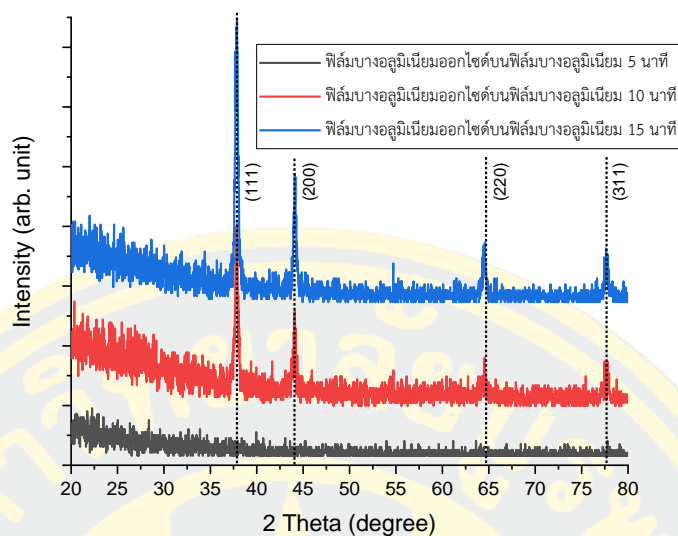
คลื่น 400 ถึง 900 นาโนเมตรได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยเวลา 5 และ 15 นาที



ภาพที่ 36 เปอร์เซนต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม 5, 10 และ 15 นาที

#### 4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

ภาพที่ 37 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 10 และ 15 นาทีปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมประมาณ 37.78, 44.16, 64.54 และ 77.69 ตรงกับระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของธาตุอลูมิเนียมตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าไม่มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณขนาดผลึกที่มุมประมาณ 37.78 ซึ่งตรงกับระนาบ (111) ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 10 และ 15 นาทีได้เท่ากับ 29.15 และ 32.98 นาโนเมตรตามลำดับ จากผลการคำนวณขนาดของผลึก พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางมากขึ้นขนาดของผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน



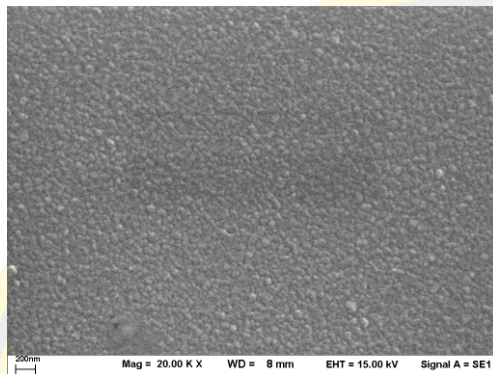
ภาพที่ 37 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ 5, 10 และ 15 นาที

#### 4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว ภาคตัดขวางและองค์ประกอบธาตุทางเคมีของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

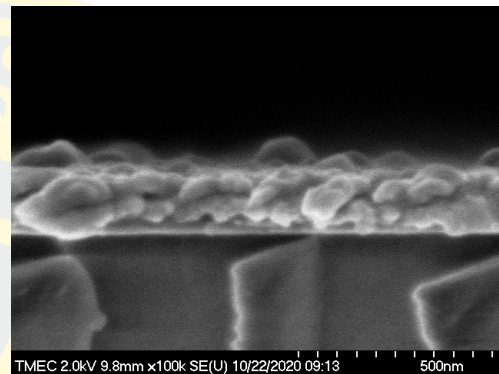
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบลงบนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยฟิล์มบางอลูมิเนียมใช้เวลาในการเคลือบ 5, 10 และ 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 38 (ก) (ค) และ (จ) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบ 5, 10 และ 15 นาที มีลักษณะเช่นเดียวกันกับพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียม กล่าวคือ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะที่สอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียม

ภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียม แสดงในภาพที่ 38 (ข) (ง) และ (ฉ) จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope ; FE-SEM) พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 5, 10 และ 15 นาที มีความหนาดังต่อไปนี้ 155, 235 และ 304 นาโนเมตร ตามลำดับ จากลักษณะของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่แสดงโดยภาคตัดขวางนั้น แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยฟิล์มบางที่ใช้เวลาเคลือบ 10 นาทีพื้นผิวของฟิล์มบางปรากฏเกรนที่มีขนาด

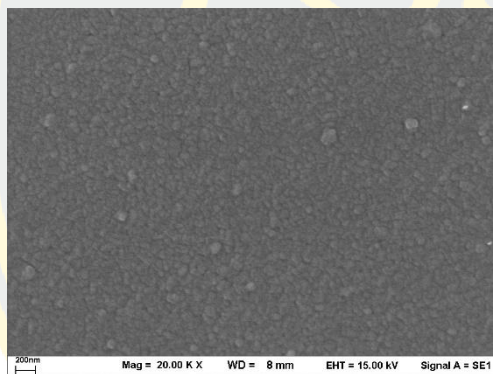
เล็กและสม่ำเสมอมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางที่เคลือบเป็นระยะเวลา 5 และ 15 นาที ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมจะส่งผลให้ความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น



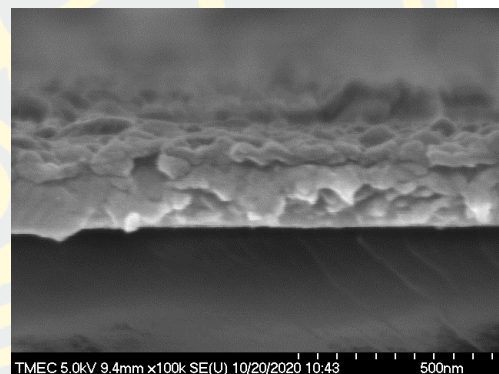
(ก)



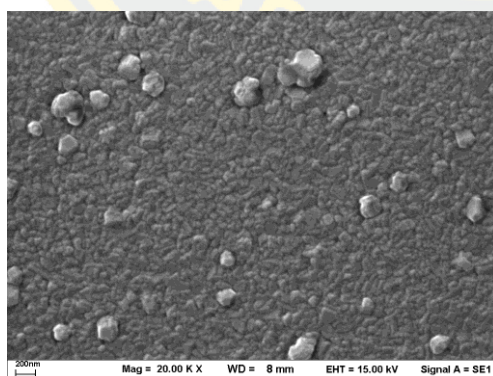
(ข)



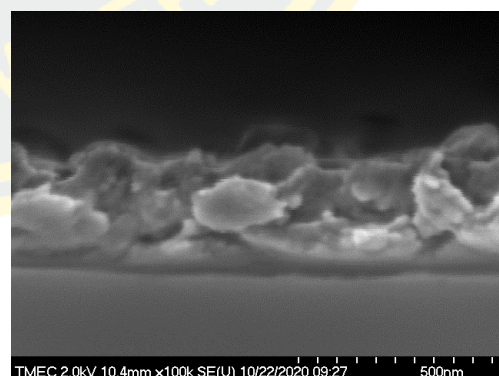
(ค)



(ง)

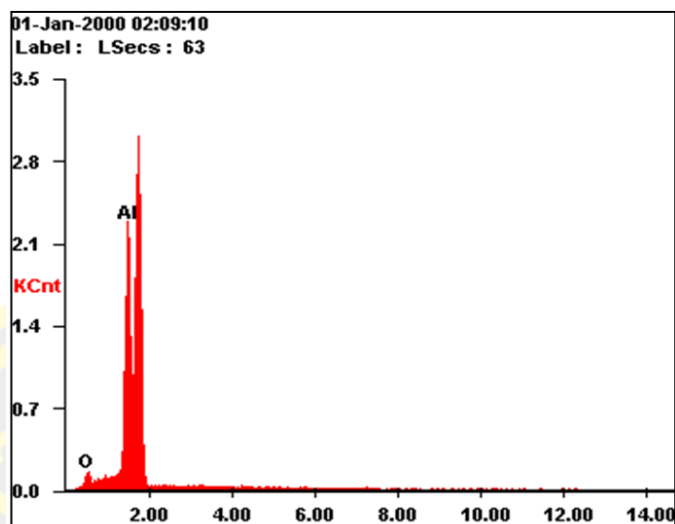


(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 38 (ก) (ค) และ (จ) แสดงลักษณะพื้นผิวและภาพที่ 38 (ข) (ง) และ (ฉ) แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ (ก),(ข) 5 นาที (ค),(ง) 10 นาที และ (จ),(ฉ) 15 นาที



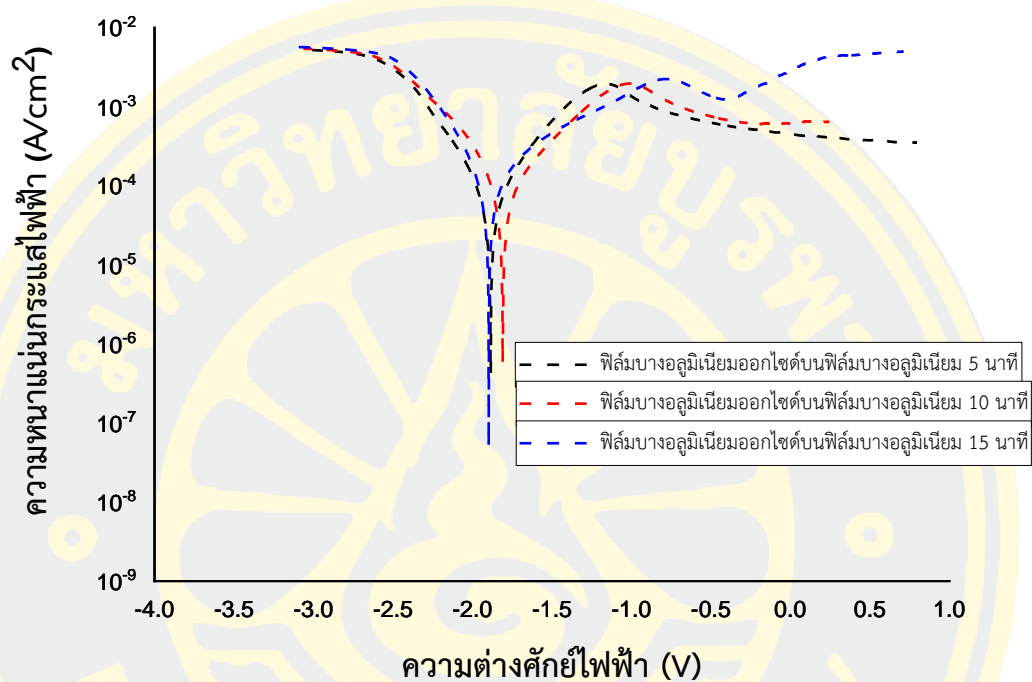
ภาพที่ 39 อัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของธาตุอลูมิเนียมและออกซิเจนจากเทคนิค EDX ของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมซึ่งใช้เวลาเคลือบ 15 นาที

เมื่อนำฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมซึ่งใช้เวลาเคลือบ 15 นาทีไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 78.44% และค่าเปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 21.56% โดยปริมาณธาตุออกซิเจนที่พบเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางอลูมิเนียมดังแสดงในภาพที่ 39

#### 4.3.5 ผลการศึกษาความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

ภาพที่ 40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที ที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใช้ระยะเวลาแช่ฟิล์มบางเพื่อทดสอบการกัดกร่อนเป็นเวลา 1 นาที โดยพบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อเพิ่มความต่าง ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มบางอลูมิเนียม แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าน้อยลง โดยมีค่าดังนี้ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์ม

บางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาทีเท่ากับ -1.89, -1.81 และ -1.90 โวลต์ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ  $1.97 \times 10^{-4}$ ,  $1.36 \times 10^{-4}$  และ  $2.02 \times 10^{-4}$  แอมป์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 40 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเท่ากับ 5, 10 และ 15 นาที

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการสะท้อนแสงและความทนทานต่อการกัดกร่อนระหว่างฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

##### 4.4.1 ผลการสะท้อนแสง

การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมพบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 380 ถึง 750 นาโนเมตร หรือช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible range ; Vis) มีลักษณะดังต่อไปนี้ ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบ 5, 10 และ 15 นาทีมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเท่ากับ 84.91%, 89.33% และ 83.04% ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาทีมีค่าเท่ากับ 72.98%, 81.92% และ 73.21% ตามลำดับ จากค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นเวลา 10 นาทีมีค่าการสะท้อนแสงได้ดีที่สุด ฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นเวลา 15 นาทีมีค่าการสะท้อนแสงได้น้อยที่สุด โดยค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม ในแต่ละความยาวคลื่นแสงแสดงในตารางที่ 5

##### 4.4.2 การทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน

เมื่อทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางทั้งหมดด้วยเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat) พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 5, 10 และ 15 นาทีมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนหรือ  $E_{corr}$  เท่ากับ -1.92, -1.89 และ -1.93 โวลต์ ตามลำดับ และมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนหรือ  $I_{corr}$  เท่ากับ  $6.59 \times 10^{-4}$ ,  $5.47 \times 10^{-4}$  และ  $6.66 \times 10^{-4}$  แอมป์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียม มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน เท่ากับ -1.89, -1.81 และ -1.90 โวลต์ ตามลำดับ และมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ  $1.97 \times 10^{-4}$ ,  $1.36 \times 10^{-4}$  และ  $2.02 \times 10^{-4}$  แอมป์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมและอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 5

โดยที่ปริมาณค่า  $E_{\text{corr}}$  และ  $I_{\text{corr}}$  ที่วัดได้จะแสดงถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบาง ซึ่งค่า  $E_{\text{corr}}$  ที่มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า  $I_{\text{corr}}$  ที่มีค่าลดลงจะแสดงถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของพื้นผิวของฟิล์มบางที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 10 นาทีมีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุดและฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 15 นาทีมีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 5 และ 10 นาที และในทำนองเดียวกันฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 10 นาทีมีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุด และฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 15 นาทีมีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 5 และ 10 นาที

ตารางที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและความต่างศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

ฟิล์มบาง	%R - UV (nm)	%R - Visible (nm)	%R - Near IR (nm)	$I_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{corr}}$ (V)
Al 5 นาที	61.90	84.91	83.01	$6.59 \times 10^{-4}$	-1.92
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5 นาที	32.85	72.98	78.68	$1.97 \times 10^{-4}$	-1.89
Al 10 นาที	80.78	89.33	84.16	$5.47 \times 10^{-4}$	-1.89
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10 นาที	50.51	81.92	80.99	$1.36 \times 10^{-4}$	-1.81
Al 15 นาที	74.12	83.04	80.99	$6.66 \times 10^{-4}$	-1.93
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15 นาที	47.56	73.21	76.69	$2.02 \times 10^{-4}$	-1.90



#### 4.5 การอภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองเมื่อใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นระยะเวลา 5, 10 และ 15 นาที พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียม การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถอธิบายโดยใช้ Structure zone models ของ Thornton ซึ่งเป็นการอธิบายการเกิดโครงสร้างของฟิล์มบางที่เป็นไปตามเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิของวัสดุรองรับกับอุณหภูมิหลอมเหลวของสารเคลือบ ( $T/T_m$ ) ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสันนิษฐานได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มมากขึ้น อุณหภูมิของวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจากอะตอมของอลูมิเนียมที่ตกเคลือบบนผิววัสดุรองรับนานขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมอลูมิเนียมและส่งผลต่อการเกิดเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนผิววัสดุรองรับ โดยฟิล์มบางที่เคลือบด้วยระยะเวลา 5 นาทีเป็นฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการเคลือบน้อย อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลือบจึงมีค่าต่ำ อะตอมที่อยู่บนผิวของวัสดุรองรับจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้ฟิล์มบางไม่เกิดการก่อตัวเป็นผลึกและพบรูพรุนเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางจากสาเหตุดังกล่าวทำให้ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค XRD เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมเป็นระยะเวลา 10 นาที ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับวัสดุรองรับระหว่างการเคลือบมีค่าสูงขึ้นเพราะได้รับพลังงานจากการชนของอนุภาคสารเคลือบมากขึ้น จึงทำให้ผิวของวัสดุรองรับมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางอลูมิเนียมเกิดการก่อตัวเป็นผลึกได้ดีขึ้น ทำให้พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุมเท่ากับ 37.78, 44.16, 64.54 และ 77.69 ตรงกับระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ของธาตุอลูมิเนียมตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มบางที่เคลือบด้วยระยะเวลา 15 นาทีเป็นฟิล์มบางที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบนานที่สุด จึงมีอุณหภูมิสูงสุดเพราะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานจากการชนของอะตอมสารเคลือบบนพื้นผิววัสดุรองรับเป็นเวลานานที่สุด ส่งผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้นด้วยแต่เกรนมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวของฟิล์มอลูมิเนียมจะส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่วัดได้ โดยฟิล์มบางที่เคลือบด้วยระยะเวลา 5 และ 15 นาที ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าฟิล์มบางที่เคลือบเป็นระยะเวลา 10 นาที เป็นผลเนื่องจากลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยระยะเวลา 5 นาทีมีรูพรุนเกิดขึ้นระหว่างเกรนบนพื้นผิว และเกรนของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยระยะเวลา 15 นาทีมีขนาดเล็กและใหญ่ไม่สม่ำเสมอ แสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวจึงมีการสะท้อนในทิศทางต่าง ๆ ไม่อยู่ในแนว

เดียวกัน ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยระยะเวลา 10 นาทีที่เกรนมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอจนตลอดทั้งพื้นผิวฟิล์มบาง เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นผิวจึงสะท้อนไปในทิศทางใกล้เคียงกันมากขึ้น ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 10 นาทีจึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงมากที่สุด และในรายงานผลการวิจัยของ Argade และคณะ (Argade et al., 2012) พบว่าเกรนขนาดเล็กและละเอียด (fine grain) มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเกรนที่มีขนาดใหญ่และหยาบ (coarse grain) รวมถึงงานวิจัยของ Muhammad Rifai และคณะ (Rifai, Miyamoto, & Fujiwara, 2015) ที่พบว่าพื้นผิวของโลหะเหล็กผสมโครเมียม (Fe-20%Cr) ที่มีความเรียบเนื่องจากพื้นผิวประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กและละเอียดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะทำให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยนี้ โดยในงานนี้ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 10 นาทีที่เกรนมีขนาดเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอ ทำให้มีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 5 ซึ่งมีรูพรุนระหว่างเกรนและ 15 นาทีที่เกรนมีขนาดเล็กและใหญ่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความสม่ำเสมอของขนาดเกรนส่งผลต่อค่าการสะท้อนแสงและความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียม

และเมื่อทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมมีลักษณะพื้นผิวสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลาต่าง ๆ กัน โดยมีขนาดเกรนเล็กและใหญ่ตามลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียม จากสาเหตุดังกล่าวค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมระยะเวลาในการเคลือบต่าง ๆ กัน จะมีค่าสอดคล้องกับค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบต่าง ๆ กัน โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 10 นาทีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้เวลาเคลือบ 5 และ 15 นาที โดยที่ค่าการสะท้อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมลดลงจากค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมเล็กน้อย เนื่องจากผลการทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนกระจกสไลด์ชี้ให้เห็นว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีลักษณะโปร่งใส มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรดได้เท่ากับ 89.20% ดังนั้นเมื่อมีชั้นของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มาปกคลุมฟิล์มบางอลูมิเนียม ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงบางส่วนในชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ก่อนจะผ่านไปถึงฟิล์ม

บางอลูมิเนียมที่เป็นชั้นสำหรับการสะท้อนแสง ในส่วนการวิเคราะห์ความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมพบว่าค่า  $I_{corr}$  มีค่าลดลงและ  $E_{corr}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์ แสดงให้เห็นว่าการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงขึ้น เนื่องจากชั้นของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (Mirhashemihaghighi et al., 2016; Thangaraj & Mahadevan, 2017) แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มบางประเภทออกไซด์ที่เคลือบบนโลหะอลูมิเนียมเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำก็สามารถมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้ จึงสันนิษฐานได้ว่าด้วยเหตุนี้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าเมื่อถูกทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีจึงให้ผลความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมซึ่งเป็นฟิล์มโลหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า โดยจะเห็นว่าเงื่อนไขฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 10 นาทีที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูงสุดรวมถึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นมากกว่า 80% ซึ่งเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่มีค่าใกล้เคียงกับกระจกอลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์รวมแสงจากแสงอาทิตย์ (parabolic-trough solar collectors) สำหรับนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการรวมแสงไปใช้ประโยชน์ (Fernández-García, Zarza, Valenzuela, & Pérez, 2010) ทำให้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม 10 นาทีเป็นเงื่อนไขที่น่าสนใจสำหรับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนผิววัสดุเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สะท้อนแสงต่อไป

## บทที่ 5

### สรุปผล

บทนี้เป็นการสรุปผลการวิจัยการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางแสงด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### ผลของระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมบนกระจกสไลด์

จากผลการทดลองพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนกระจกสไลด์ได้ โดยเมื่อระยะเวลาในการเคลือบมากขึ้นโครงสร้างของฟิล์มบางจะมีความเป็นผลึกมากขึ้น ทำให้เกรนและลักษณะพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อค่าการสะท้อนแสงและความทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยเวลา 10 นาทีมีเกรนขนาดเล็กและสม่ำเสมอว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5 และ 15 นาที

2. จากการศึกษาพบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 10 และ 15 นาทีมีการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ Face-Centered Cubic (FCC) ที่ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) โดยมีมุมเท่ากับ 37.78, 44.16, 64.54 และ 77.69 ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาในการเคลือบที่นานขึ้นทำให้มีการตกเคลือบของอะตอมอลูมิเนียมมากขึ้นซึ่งมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น จึงก่อให้เกิดการจัดเรียงตัวผลึกในฟิล์มบางได้ดีขึ้น

3. เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 10 นาทีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในช่วงที่ตามองเห็นเท่ากับ 89.33% ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 1, 5 และ 15 นาที

4. ฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 10 นาทีมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนเท่ากับ  $5.47 \times 10^{-4}$  แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดทำให้มีความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาเคลือบ 5 และ 15 นาที

ดังนั้นระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมส่งผลต่อลักษณะพื้นผิว ขนาดของเกรนและโครงสร้างผลึก โดยที่ลักษณะพื้นผิวที่เกรนมีขนาดสม่ำเสมอจะทำให้ฟิล์มบางสามารถสะท้อนแสงและป้องกันการกัดกร่อนได้ดี

### ผลของการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียม

จากผลการทดลองพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ลงบนฟิล์มบางอลูมิเนียมได้ โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีลักษณะโปร่งใส และมีลักษณะพื้นผิวเป็นไปตามพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมทำให้ส่งผลต่อค่าการสะท้อนแสงและความทนทานต่อการกัดกร่อนสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมมีลักษณะพื้นผิวที่สอดคล้องกับฟิล์มบางอลูมิเนียมโดยที่ฟิล์มบางอลูมิเนียม/อลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบเป็นเวลา 10 นาที เกรนมีขนาดเล็กและขนาดของเกรนมีความสม่ำเสมอกว่าเมื่อเทียบกับที่เคลือบบนฟิล์มบางอลูมิเนียมซึ่งเคลือบด้วยเวลา 5 และ 15 นาที

2. ผลการศึกษาโครงสร้างผลึก พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยระยะเวลา 10 และ 15 นาที มีการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ Face-Centered Cubic (FCC) ของซึ่งเป็นของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) โดยมีมุมเท่ากับ 37.78, 44.16, 64.54 และ 77.69 ตามลำดับ แต่ไม่พบการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

3. ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงโดยรวมลดลงจากค่าของฟิล์มบางอลูมิเนียม เนื่องจากฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรดได้เท่ากับ 89.20% ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงบางส่วนก่อนจะผ่านไปถึงชั้นของฟิล์มบางอลูมิเนียม โดยที่ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยเวลา 10 นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในช่วงที่ตามองเห็นเท่ากับ 81.92% ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบเป็นเวลา 5 และ 15 นาที

4. ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 10 นาทีมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนเท่ากับ  $1.36 \times 10^{-4}$  แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดทำให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุดในเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมใช้ระยะเวลาเคลือบ 5 และ 15 นาที และยังดีที่สุดในเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมทุกเงื่อนไขการเคลือบ

ดังนั้นเมื่อเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมจะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงโดยรวมลดลง แต่เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เงื่อนไขระยะเวลาการเคลือบ 10 นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน

แสงตั้งแต่แสงช่วงที่ตามองเห็นจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรดดีที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ระยะเวลาเคลือบ 5 และ 15 นาที และสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับผลการทดลองจากทุกเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางของงานวิจัยนี้ ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เงื่อนไขการเคลือบ 10 นาทีจึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเป็นฟิล์มบางสำหรับการประยุกต์ใช้ทางแสงต่อไป



## บรรณานุกรม

- Amusan, J., Akinola, O., Alayande, S., Ojuh, D., James, C., Ibiyemi, A., . . . Wasiu, A. (2010). Electrical Characterization of Vacuum Thermally Deposited Aluminium Thin Film. *Research Journal of Applied Sciences*, 5, 96-100. doi:10.3923/rjasci.2010.96.100
- Argade, G., Panigrahi, S., & Mishra, R. (2012). Effects of grain size on the corrosion resistance of wrought magnesium alloys containing neodymium. *Corrosion Science*, 58, 145–151. doi:10.1016/j.corsci.2012.01.021
- Basic Statistics. Retrieved from <https://www.cec.health.nsw.gov.au/Quality-Improvement-Academy/quality-improvement-tools/basic-statistics>
- Bubert, H., & Jenett, H. (2003). *Surface and Thin Film Analysis*: Dortmund Germany: Federal Republic of Germany.
- Bunshah, R. F. (1994). Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings - Science, Technology and Applications (2nd Edition). In: William Andrew Publishing/Noyes.
- Chapman, B., & Vossen, J. (1981). Glow discharge processes: sputtering and plasma etching. *Physics Today*, 34, 62.
- Chkhalo, N., Kuzin, S., Lopatin, A. Y., Luchin, V. I., Salashchenko, N., Zuev, S. Y., & Tsybin, N. (2018). Improving the optical and mechanical characteristics of aluminum thin-film filters by adding thin cap layers. *Thin Solid Films*, 653. doi:10.1016/j.tsf.2018.03.051
- Chu, E. C. (1996). *Temperature-Dependent Yield Properties of Passivated Aluminum Thin Films on Silicon Wafers*. (Master of Science in Materials Science and Engineering). Massachusetts Institute of Technology,
- Creighton, J., & Ho, P. (2001). Introduction to Chemical Vapor Deposition (CVD). *ASM International*.
- da Silva Oliveira, C. I., Martinez-Martinez, D., Al-Rjoub, A., Rebouta, L., Menezes, R., & Cunha, L. (2018). Development of a statistical method to help evaluating the transparency/opacity of decorative thin films. *Applied Surface Science*, 438, 51-

58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.017>

Faraj, M., Ibrahim, K., Eisa, M., & Alrajhi, M. (2014). Comparison of Aluminium Thin Film deposited on different polymer substrates with thermal evaporation for Solar Cell Applications. *Journal of Ovonic Research*, *10*, 231-235.

Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., & Pérez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(7), 1695-1721. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>

Fiquet, G., Narayana, C., Bellin, C., Shukla, A., Estève, I., Ruoff, A. L., . . . Mezouar, M. (2019). Structural phase transitions in aluminium above 320GPa. *Comptes Rendus Geoscience*, *351*(2), 243-252.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.006>

Hom-on, C., Horprathum, M., Eiamchai, P., Limwichean, S., Patthanasettakul, V., Nuntawong, N., . . . Jaroenapibal, P. (2018). Surface roughness of aluminum oxide thin films deposited by DC and RF reactive magnetron sputtering. *Materials Today: Proceedings*, *5*(7, Part 1), 15228-15232.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.088>

instruments, G. (2021 Apr 16). Potentiostat Fundamentals. Retrieved from <https://www.gamry.com/application-notes/instrumentation/potentiostat-fundamentals/>

Kern, W., & Vossen, J. L. (1978). Thin film processes.

Khachatryan, H., Lee, S.-N., Kim, K.-B., & Kim, M. (2018). Deposition of Al Thin Film on Steel Substrate: The Role of Thickness on Crystallization and Grain Growth. *Metals*, *9*, 12. doi:10.3390/met9010012

Koski, K., Hölsä, J., & Juliet, P. (1999). Deposition of aluminium oxide thin films by reactive magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, *116-119*, 716-720. doi:[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00087-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00087-0)

Koushki, E., Mousavi, S. H., & Baedi, J. (2016). Oxygen amount effect on optical properties of aluminium oxide nanostructured films prepared by reactive magnetron sputtering. *Optik*, *127*(11), 4635-4638.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.02.007>

Lugolole, R., & Obwoya Kinyera, S. (2015). The Effect of Thickness of Aluminium Films



- on Optical Reflectance. *Journal of Ceramics*, 2015, 1-6.  
doi:10.1155/2015/213635
- Maissel, L. I., & Glang, R. (1970). *Handbook of Thin Film Technology*. New York: McGraw-Hill.
- Materials, A. Aluminium: Specifications, Properties, Classifications and Classes. Retrieved from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>
- Mirhashemihaghighi, S., Światowska, J., Maurice, V., Seyeux, A., Zanna, S., Salmi, E., . . . Marcus, P. (2016). Corrosion protection of aluminium by ultra-thin atomic layer deposited alumina coatings. *Corrosion Science*, 106, 16-24.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.01.021>
- Mueller, J., Balzar, D., Geiss, R. H., Read, D. T., Keller, R. R., Hagedorn, J. G., . . . Henderson, L. (2006). COMPARISON OF TEXTURE IN COPPER AND ALUMINUM THIN FILMS AS DETERMINED BY XRD AND EBSD. *JCPDS-International Centre for Diffraction Data*.
- Niinomi, M. (2008). Metallic biomaterials. *Journal of artificial organs : the official journal of the Japanese Society for Artificial Organs*, 11, 105-110. doi:10.1007/s10047-008-0422-7
- Obwoya Kinyera, S. (2015). The Effect of Thickness of Aluminium Films on Optical Reflectance. *Journal of Ceramics*, 2015, 1-6. doi:10.1155/2015/213635
- Pakhuruddin, M. Z., Ibrahim, K., & Abdul Aziz, A. (2013). Properties of Aluminium Thin Films on Polyimide Plastics as Back Contacts in Thin Film Silicon Solar Cells. *Advanced Materials Research*, 620, 474-479.  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.620.474
- Pansila, P., Kanomata, K., Miura, M., Ahmmad, B., Kubota, S., & Hirose, F. (2015). Growth kinetics for temperature-controlled atomic layer deposition of GaN using trimethylgallium and remote-plasma-excited NH<sub>3</sub>. *Applied Surface Science*, 357, 1920-1927. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.138>
- Panta, G. P., & Subedi, D. (2013). Electrical characterization of aluminum (Al) thin films measured by using four- point probe method. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 8. doi:10.3126/kuset.v8i2.7322

- Park, I. K., & Park, T. S. (2014). *Thickness Measurement of Aluminum Thin Film using Dispersion Characteristic of Surface Acoustic Wave*. Paper presented at the Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology, Liverpool, UK.
- Pelco. (2021). DIFFRACTION STANDARDEVAPORATED ALUMINUMPRODUCT NO. 619. Retrieved from [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:g5clV4F0kmEJ:https://www.tedpella.com/technote\\_html/619%2520TN.pdf+&cd=13&hl=th&ct=clnk&gl=th](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:g5clV4F0kmEJ:https://www.tedpella.com/technote_html/619%2520TN.pdf+&cd=13&hl=th&ct=clnk&gl=th).  
[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:g5clV4F0kmEJ:https://www.tedpella.com/technote\\_html/619%2520TN.pdf+&cd=13&hl=th&ct=clnk&gl=th](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:g5clV4F0kmEJ:https://www.tedpella.com/technote_html/619%2520TN.pdf+&cd=13&hl=th&ct=clnk&gl=th)
- Prasanna, S., Krishnendu, G., Shalini, S., Biji, P., Mohan Rao, G., Jayakumar, S., & Balasundaraprabhu, R. (2013). Composition, structure and electrical properties of DC reactive magnetron sputtered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(3), 705-711.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.12.012>
- Qiu, H., Wang, F., Wu, P., Pan, L., Li, L., Xiong, L., & Tian, Y. (2002). Effect of deposition rate on structural and electrical properties of Al films deposited on glass by electron beam evaporation. *Thin Solid Films*, 414, 150-153. doi:10.1016/S0040-6090(02)00454-6
- Quintana, P., Oliva, A., Ceh, O., Corona, J., & Aguilar, M. (1999). Thickness effects on aluminum thin films. *Superficies y vacío*(9), 280-282.
- Rhode, S., & Münz, W. (1991). Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering. *Blake & Son Ltd*, 127.
- Rickerby, D. S., & Matthews, A. (1991). *Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering*.
- Rifai, M., Miyamoto, H., & Fujiwara, H. (2015). Effects of Strain Energy and Grain Size on Corrosion Resistance of Ultrafine Grained Fe-20%Cr Steels with Extremely low C and N Fabricated by ECAP. *International Journal of Corrosion*, 2015, 386865.  
doi:10.1155/2015/386865

- Rohde, S. L. (1994). Unbalanced Magnetron Sputtering. In M. H. Francombe & J. L. Vossen (Eds.), *Physics of Thin Films* (Vol. 18, pp. 235-288): Elsevier.
- Savale, P. (2016). Physical vapor deposition (PVD) methods for synthesis of thin films: A comparative study. *Arch. Appl. Sci. Res*, 8(5), 1-8.
- Segda, B. G., Jacquet, M., & Besse, J. P. (2001). Elaboration, characterization and dielectric properties study of amorphous alumina thin films deposited by r.f. magnetron sputtering. *Vacuum*, 62(1), 27-38. doi:[https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00114-2)
- Semaltianos, N. G. (2001). Thermally evaporated aluminium thin films. *Applied Surface Science*, 183(3), 223-229. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)00565-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)00565-7)
- Sheasby, P., & Pinner, R. (2001). Introduction: Aluminium, Its Properties, Alloys and Finishes. *Met. Finish*, 435-450.
- Singh, M. M., Vijaya, G., Krupashankara, M. S., Sridhara, B. K., & Shridhara, T. N. (2018). Studies on Thin Film Multilayer Coatings Deposited using Sputtering Process. *Materials Today: Proceedings*, 5(1, Part 3), 2994-2999. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.098>
- Smith, D. L. (1995). *Thin-film deposition: principles and practice*: McGraw Hill Professional.
- Thangaraj, B., & Mahadevan, K. (2017). Corrosion studies of DC reactive magnetron sputtered alumina coating on 304 SS. *Electrochemical Energy Technology*, 3, 27. doi:10.1515/eetech-2017-0001
- Walock, M. (2012). *Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon systems*.
- Xiong, Y.-Q., Li, X.-C., Chen, Q., Lei, W.-W., Zhao, Q., Sang, L.-J., . . . Yang, L.-Z. (2012). Characteristics and properties of metal aluminum thin films prepared by electron cyclotron resonance plasma-assisted atomic layer deposition technology. *Chinese Physics B*, 21(7), 078105. doi:10.1088/1674-1056/21/7/078105
- Zhang, S., & Zhang, X. (2012). Toughness evaluation of hard coatings and thin films. *Thin Solid Films*, 520(7), 2375-2389. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.09.036>
- ธนบุญสมบัติ, บ. (2544). การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

นิยมสรวย, ส. (2561). โครงการ การเคลือบฟิล์มบางอลูมินาด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อปรับปรุงคุณภาพอัญมณีเนื้ออ่อน. Retrieved from มหาวิทยาลัยบูรพา:

ม่วงพัฒน์, ช. (2544). การสร้างและศึกษาลักษณะของอิเล็กโทรดประเภทฟิล์มบางโปร่งแสง. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ.

ลิ้มสุวรรณ, พ., & รัตนะ, ธ. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปัตเตอริงตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2 รายงานการวิจัยประจำปี 2547. กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (หน้า 163-166).

ศรีหล่มสัก, ส. (2554). เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ห่อประทุม, ม. (2548). การศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,

อุดมกิจเดชา, ว. (2543). เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น.



## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	พิพัฒน์ นันทกุล
วัน เดือน ปี เกิด	6 มีนาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดตราด
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

