



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การเคลือบและปรับปรุงผิวฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์  
ด้วยวิธีสปัตเตอริงสำหรับงานป้องกันการกัดกร่อน

The Deposition and Surface Modification of TiAl Alloy Thin Films  
by Sputtering Method for Anticorrosion Application

อรรถพล เขยศุภเกตุ

ธনীสธา รัตนะ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256108A1080025

สัญญาเลขที่ 192/2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การเคลือบและปรับปรุงผิวฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ด้วยวิธีสปัตเตอริงสำหรับงานป้องกันการกัดกร่อน

The Deposition and Surface Modification of TiAl Alloy Thin Films  
by Sputtering Method for Anticorrosion Application

อรรถพล เขยสุภเกตู

ธันสถา รัตน์ะ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ตุลาคม 2560

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ  
เลขที่สัญญา 192/2561

<b>ชื่อโครงการ:</b>	การเคลือบและปรับปรุงผิวฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงสำหรับงานป้องกันการกัดกร่อน	
<b>นักวิจัย:</b>	ดร.อรรถพล เขยสุภเกตต์	หัวหน้าโครงการ
	ผศ.ดร.ธนัสถา รัตน์ะ	นักวิจัย
<b>มหาวิทยาลัย</b>	บูรพา	
<b>คณะ:</b>	วิทยาศาสตร์	ภาควิชา: ฟิสิกส์

## บทคัดย่อ

ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีลด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง โดยศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์ ความดันรวมขณะเคลือบ และระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เคลือบได้ด้วย EDX, XRD, SEM, AFM, การวัดมุมสัมผัส และโพเทนชิโอสแตท จากผลการทดลองเมื่ออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเพิ่มขึ้นจาก 0.375 ถึง 1.5 พบว่าอัตราส่วนของปริมาณธาตุออกไซด์ต่อไทเทเนียมในฟิล์มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลซึ่งเป็นเฟส  $\gamma$ -TiAl โดยที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.5 ฟิล์มที่เคลือบได้มีความเป็นผลึก ความหยาบผิว ความไม่ชอบน้ำ และความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากที่สุด เมื่อความดันรวมขณะเคลือบเพิ่มขึ้นจาก  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีขนาดผลึก ความหยาบผิว ความหนา และความไม่ชอบน้ำลดลง โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar มีอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นจาก 12 cm ถึง 16 cm พบว่าอัตราส่วนของปริมาณธาตุออกไซด์ต่อไทเทเนียมในฟิล์ม ความเป็นผลึก ขนาดผลึก ขนาดเกรน ความหนา และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลง

**คำสำคัญ:** ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์/ สปัตเตอร์ริง/ ความไม่ชอบน้ำ/ การกัดกร่อน

**Research Title:** The Deposition and Surface Modification of TiAl Alloy Thin Films by Sputtering Method for Anticorrosion Application

**Researcher:** Dr. Attapol Choeysupaket  
Asst.Prof.Dr. Tanattha Rattana

**University:** Burapha

**Faculty:** Science **Department:** Physics

## Abstract

Titanium aluminium (TiAl) alloy thin films were deposited on silicon wafer and stainless steel substrate by sputtering method. The effects of Ti and Al target currents, total pressure and target-substrate distance on physical properties of the deposited films were investigated using EDX, XRD, SEM, AFM, contact angle measurement and Potentiostat. In the experiment, when the ratio of Al/Ti target currents increased from 0.375 to 1.5, the Al/Ti ratio of the deposited films increased. When the ratio of Al/Ti target currents were 1.0 and 1.5, the deposited film structure exhibited  $\gamma$ -TiAl phase with tetragonal crystal structure. Moreover, the ratio of Al/Ti target current of 1.5 provided the deposited film with the highest crystallinity, surface roughness, hydrophobicity, and corrosion resistance. When the total pressure increased from  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar to  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar, the results revealed that the crystal size, surface roughness, thickness and hydrophobicity of deposited films were decreased. The deposited film with the total pressure of  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar had the least corrosion rate. When the target-substrate distance increased from 12 cm to 16 cm, the results showed that the Al/Ti ratio, crystallinity, crystal size, grain size, thickness and corrosion rate of deposited film were decreased.

**Keywords:** Titanium aluminium alloy thin film/ Sputtering/ Hydrophobicity/ Corrosion

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
ABSTRACT	iii
สารบัญเรื่อง	iv
สารบัญตาราง	vii
สารบัญภาพ	ix
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	4
2.2 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง	6
2.3 ระบบการเคลือบแบบ ดีซี สปีดเทอริง	8
2.4 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง	10
2.5 ไทเทเนียมออกไซด์	13
2.6 การโค้งงอของผิวของเหลว	14
2.7 ความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ	15
2.8 ทฤษฎีการกัดกร่อนของโลหะ	17
2.9 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง	19
2.9.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	19
2.9.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
2.9.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	24
2.9.4 รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน	27

	หน้า
2.10 การทดสอบความสามารถในการเปียก	28
2.11 การทดสอบการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี	29
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	35
3.2 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ริง	36
3.3 การสร้างสภาวะสุญญากาศ	38
3.4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	40
3.5 แนวทางการทดลอง	41
3.6 การทดสอบความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียม อลูมิเนียมอัลลอยด์	44
3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียม อลูมิเนียมอัลลอยด์	44
<b>บทที่ 4 ผลและอภิปรายผล</b>	
4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียม	45
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	45
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	46
4.1.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	48
4.1.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	49
4.1.5 ความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียม อัลลอยด์	55
4.1.6 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียม อัลลอยด์	57
4.2 ผลของความดันรวมขณะเคลือบ	59
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	60
4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	61
4.2.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	62
4.2.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์	64

	หน้า
4.2.5 ความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	69
4.2.6 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	71
4.3 ผลของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ	74
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	74
4.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	75
4.3.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	77
4.3.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	79
4.3.5 ความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	85
4.3.6 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์	87
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผล	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	94
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	100



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1	41
เรื่องเนื้อหาของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่กระแสไฟฟ้าให้กับ เป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียมต่างๆ	
3-2	42
อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม	
3-3	42
เรื่องเนื้อหาของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ความดันรวม ขณะเคลือบต่างๆ	
3-4	43
เรื่องเนื้อหาของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ระยะห่างจาก เป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	
4-1	47
องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบน แผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ	
4-2	51
ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม ต่างๆ	
4-3	55
ความหยาบผิวเฉลี่ยของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบน แผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อ ไทเทเนียมต่างๆ	
4-4	57
มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บน แผ่นสแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบ อลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ	
4-5	58
พารามิเตอร์การกัดกร่อนที่คำนวณจากวิธี Tafel extrapolation ของแผ่น สแตนเลสสตีลและฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่น สแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียม ต่อไทเทเนียมต่างๆ	
4-6	62
องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบน แผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	

ตารางที่	หน้า
4-7 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	63
4-8 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	66
4-9 ความหยาบผิวเฉลี่ยของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบน แผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	69
4-10 มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บน แผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	71
4-11 พารามิเตอร์การกัดกร่อนที่คำนวณจากวิธี Tafel extrapolation ของฟิล์มบาง ไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะ เคลือบต่างๆ	72
4-12 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบน แผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาห่างจากเป้าสารเคลือบถึง วัสดุรองรับต่างๆ	77
4-13 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	78
4-14 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	82
4-15 ความหยาบผิวเฉลี่ยของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบน แผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	85
4-16 มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บน แผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	87
4-17 พารามิเตอร์การกัดกร่อนที่คำนวณจากวิธี Tafel extrapolation ของฟิล์มบาง ไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจาก เป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	88

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	4
2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ	7
2-3 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง	8
2-4 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายึดและกระแสไฟฟ้าในระบบ สปีดเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm	9
2-5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	10
2-6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแบบต่างๆ	11
2-7 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป่าสารเคลือบในระบบพลาสมาแม่กนีตรอน สปีดเตอริง	12
2-8 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมออกไซด์	13
2-9 รูปร่างของน้ำบนผิวที่ต่างกัน	14
2-10 มุมสัมผัสบนพื้นผิวระนาบตรง	15
2-11 มุมสัมผัสค่าต่างๆ บนพื้นผิววัสดุ	16
2-12 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า	17
2-13 ปฏิกริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติ	19
2-14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบผลึก	21
2-15 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2-16 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของชิ้นงานตัวอย่าง ที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ	23
2-17 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope ในแบบ AFM	25
2-18 ลักษณะของแรงที่กระทำระหว่างอะตอมที่ระยะห่างระหว่างวัตถุต่างกัน	25
2-19 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) แบบ Multimode	26
2-20 การลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้นต่าง ๆ มายังชั้น K	28
2-21 ไดอะแกรมของโพเทนเชียลไอส์เตท	30

ภาพที่	หน้า
2-22 ศักย์ไฟฟ้าการกักตรอนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักตรอนที่ได้จากกราฟเส้นโค้งโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน	31
3-1 เครื่องเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ริงที่ใช้ในงานวิจัย	37
3-2 ไดอะแกรมของเครื่องเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ริง	37
3-3 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบล้างสุญญากาศของระบบเคลือบสปีดเตอร์ริง	39
4-1 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ	46
4-2 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ	46
4-3 สเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ	47
4-4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ	49
4-5 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM	50
4-6 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM	51
4-7 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM	53

ภาพที่	หน้า
4-8 ลักษณะพื้นผิวแบบ 3 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์เคลือบต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM	54
4-9 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมคาร์ไบด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ภายใต้เงื่อนไขของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบไทเทเนียมต่างๆ	56
4-10 เส้นโค้งโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของแผ่นสแตนเลสสตีลและฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์เคลือบต่อไทเทเนียมต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt%	58
4-11 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	60
4-12 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	60
4-13 สเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	61
4-14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	63
4-15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM	65
4-16 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM	66
4-17 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM	67
4-18 ลักษณะพื้นผิวแบบ 3 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM	68
4-19 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ	70

ภาพที่	หน้า
4-20 เส้นโค้งโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบด้วยอะลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt%	72
4-21 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	74
4-22 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	75
4-23 สเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	76
4-24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	78
4-25 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM	80
4-26 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM	81
4-27 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM	83
4-28 ลักษณะพื้นผิวแบบ 3 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM	84
4-29 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ	86
4-30 เส้นโค้งโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt%	88

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ (TiAl alloy) หรือไทเทเนียมอลูมิเนียมไนต์อัลลอยด์ (Titanium aluminide alloy) เป็นวัสดุโลหะอัลลอยด์ที่เกิดจากการรวมตัวกันของโลหะไทเทเนียมและอลูมิเนียม โดยมีสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น น้ำหนักเบา จุดหลอมเหลวสูง ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่สูง (High oxidation resistance) และค่าความแข็งแรงสูง (High strength) ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวทำให้ไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Noda, 2006; Xinhua, 2006; Yoshihara, & Kim, 2005) และไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ยังมีสมบัติที่เข้ากันได้กับสารทางชีวภาพ (Biocompatibility) ทำให้ถูกนำไปใช้สร้างเป็นวัสดุทางการแพทย์ เช่น กระดูกเทียม และข้อเข่าเทียม (Liu, Chu, & Ding, 2004) แต่ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์หรือวัสดุอัลลอยด์ชนิดอื่นไปใช้งาน คือ การเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) บนเนื้อวัสดุไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานหรือการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้น เช่น ความชื้นหรือน้ำทะเล โดยกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้ชิ้นงานที่มีไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เป็นส่วนประกอบเกิดการเสื่อมสภาพหรือเกิดความเสียหายเกิดขึ้น ทำให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นงานที่มีปัญหาดังกล่าว

โดยทั่วไปในการแก้ปัญหาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสามารถใช้วิธีการเจือโลหะธาตุชนิดอื่นลงไปบนไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ เช่น โมลิบดีนัมไนโอเบียม และโครเมียม เพื่อให้มีสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงขึ้น (Kuranishi, Habazaki, & Konno, 2005; Wendler, & Kaczmarek, 2005; Abu-Suilik, Takeshita, Kitagawa, Tetsui, & Hasezaki, 2007) หรือใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางบนผิวของไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เพื่อให้เป็นชั้นฟิล์มสำหรับป้องกันการกัดกร่อน (Brou, Siab, Bonnet, & Grosseau-Poussard, 2007; Zhecheva, Sha, Malinov, & Long, 2005) แต่ในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำวิธีการปรับปรุงพื้นผิววัสดุให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) มาใช้เป็นวิธีในการป้องกันการกัดกร่อนของพื้นผิววัสดุโลหะและโลหะอัลลอยด์ (Chu, Xu, Shi, & Lu, 2011; Liu et al., 2007; Liu, Lu, Liu, Han, & Liu, 2013) โดยเมื่อของเหลวที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนไปสัมผัสกับพื้นผิววัสดุที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ พื้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิววัสดุ

ค่าน้อยมากทำให้ของเหลวมีการยึดติดกับพื้นผิววัสดุได้ยากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดการกัดกร่อนของวัสดุมีค่าลดลงซึ่งเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุให้มียาวนานขึ้น โดยวิธีการปรับปรุงพื้นผิววัสดุให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมีหลายวิธี เช่น การกัดทางเคมี (Chemical etching) วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal reaction) และการเคลือบทางไฟฟ้า (Electrodeposition) (Kang, Ye, Sang, & Li, 2009; Liu, Yin, Zhang, Yu, Han, & Ren, 2014; Ma, Cao, Liu, Wang, & Wang, 2011) ซึ่งวิธีส่วนใหญ่เป็นการสร้างพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงทำการปรับสภาพพื้นผิวโดยใช้วิธีทางเคมีหรือฟิสิกส์เพื่อให้พลังงานพื้นผิวของวัสดุมีค่าลดลง ทำให้ได้พื้นผิววัสดุที่มีความไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น

วิธีสปีดเตอริงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจใช้ในการเคลือบฟิล์มบางลงบนผิววัสดุ ซึ่งพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้มีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบ เช่น ความดันแก๊ส ตำแหน่งการวางชิ้นงาน และเวลาในการเคลือบ โดยมีผลงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าวิธีสปีดเตอริงสามารถเคลือบฟิล์มโลหะให้มีลักษณะเป็นแท่งในระดับนาโน ซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดสมบัติความไม่ชอบน้ำขึ้น (Habouti et al., 2011; Lintymer, Gavoille, Martin, & Takadom, 2003) ดังนั้นวิธีสปีดเตอริงจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการใช้สร้างพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสมบัติความไม่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้

จากรายละเอียดข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาการเคลือบและปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ด้วยวิธีสปีดเตอริงที่ใช้เป้าสารเคลือบแบบร่วม (Co-target) โดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นไทเทเนียมและออกไซด์เพื่อศึกษาถึงเงื่อนไขต่างๆ ในการเคลือบฟิล์ม เช่น สัดส่วนปริมาณไทเทเนียมและออกไซด์ในเนื้อฟิล์ม ความดันแก๊ส และตำแหน่งการวางวัสดุรองรับที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพด้านต่างๆ ของฟิล์มบาง โดยเฉพาะลักษณะพื้นผิวและความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ ซึ่งคณะผู้วิจัยเชื่อว่าการศึกษานี้เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาองค์ความรู้ รวมถึงเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการเคลือบผิววัสดุโลหะอัลลอยด์ในเชิงอุตสาหกรรมให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมในประเทศและต่างประเทศต่อไปได้



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ด้วยเทคนิคสปีดเทอริง
2. เพื่อศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีต่อลักษณะลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์
3. เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบขั้นตอนและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ด้วยเทคนิคสปีดเทอริง ทราบผลของตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ รวมถึงเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการเคลือบผิววัสดุโลหะออกไซด์ในเชิงอุตสาหกรรมให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ด้วยเทคนิคสปีดเทอริงโดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นไทเทเนียมและออกไซด์ ซึ่งทำการเคลือบบนวัสดุรองรับ 2 ชนิด คือ แผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีล ตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือผลของปริมาณไทเทเนียมและออกไซด์ในเนื้อฟิล์มบาง ความดันแก๊สที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง และตำแหน่งการจัดวางของวัสดุรองรับ ส่วนสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางที่ศึกษา คือ องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหยาบผิว และความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX, XRD, SEM, AFM และ Contact angle measurement ตามลำดับ รวมทั้งศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

## บทที่ 2

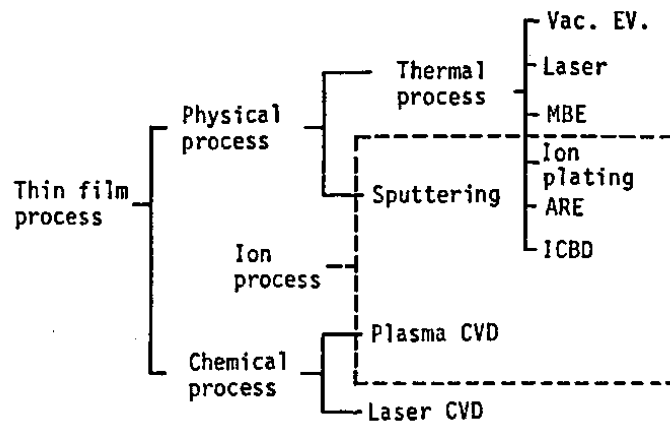
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin film deposition) ในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 โดยพื้นฐานแล้วแนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการตกเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่บางมาก ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ซึ่งฟิล์มบาง คือ ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Wasa & Hayakawa, 1992) (ภาพที่ 2-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และ วิธี Laser CVD เป็นต้น

2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น



ภาพที่ 2-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบในสุญญากาศด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดจากผิวสารตั้งต้น แล้วฟุ้งกระจายวิ่งไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มในที่สุด แบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก ๆ (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธันสถา รัตน์, 2547; Wasa & Hayakawa, 1992) คือ

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยในสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอแล้วฟุ้งกระจายไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบาง การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยาก คือ การให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (Resistive heating) การระเหยแบบวาบแสง (Flash evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (Arc evaporation) และการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency heating)

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริง คือ การทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า

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

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว ไอหรือแก๊สก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) โดยในภาวะสุญญากาศ ไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

## 2.2 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

สำหรับแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสปัตเตอริง (ภาพที่ 2-2) (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธันสถา รัตนะ, 2547; Chapman, 1980) อธิบายได้ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ เมื่อวິงชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

1.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected ion and neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

1.3 การฝังตัวของไอออน (Ion implantation) ไอออนที่วິงชนเป้าสารเคลือบนั้นอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่า  $10 \text{ \AA}$  ต่อพลังงานไอออน  $1 \text{ keV}$  สำหรับไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในทองแดง

1.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (Target material structural rearrangements) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของผลึก (Lattice defect) โดยเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered surface layer

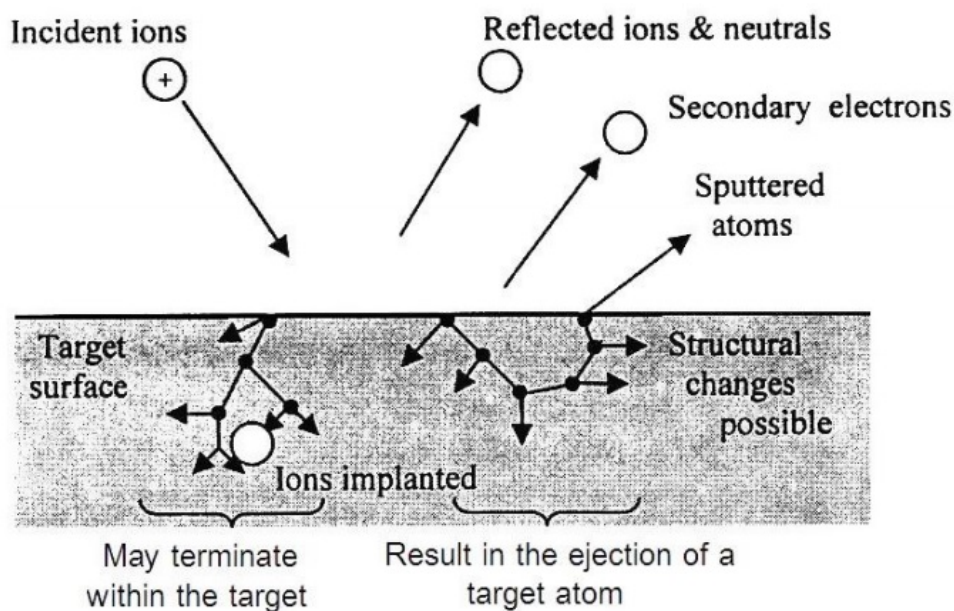
1.5 การสปัตเตอริง (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่า กระบวนการสปัตเตอริง

2. กระบวนการสปัตเตอริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อุณหภูมิที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอริง คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

2.2 อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งวิ่งชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ โดยการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

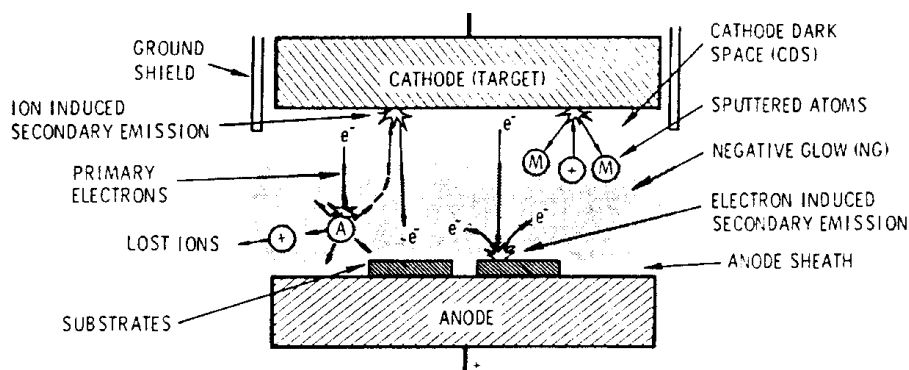
2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น ใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



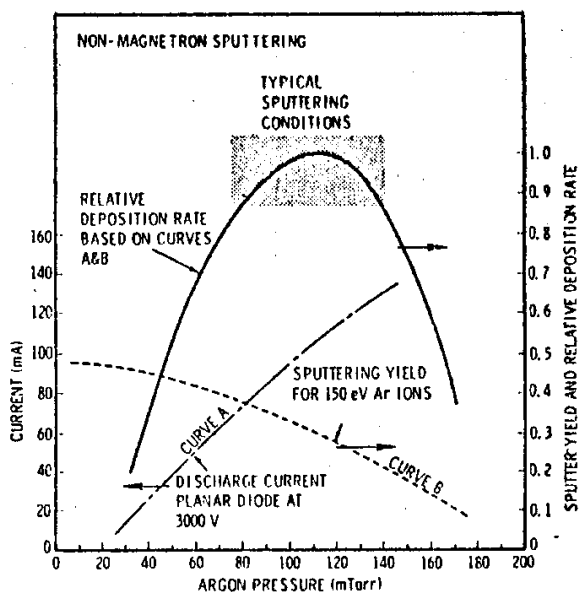
ภาพที่ 2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)

## 2.3 ระบบการเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง ง่ายที่สุด แสดงได้ดังภาพที่ 2-3 (พิเชษฐ ลีมสุวรรณ และธนัสถา รัตน์, 2547; Bunshah, 1994; Smith, 1995) ประกอบด้วยแคโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบและแอโนด คือ ที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างแคโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4 cm - 10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะดาร์คสเปซ อยู่ระหว่าง 1 cm - 4 cm โดยแอโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอบนอร์มอลโกลว์ดิสชาร์จ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ยึดสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกลว์ดิสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนเซชันจะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ที่ระยะดาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างแคโทดและแอโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะดาร์คสเปซขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar ระยะดาร์คสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโทรด และกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปีดเตอริงอีก



ภาพที่ 2-3 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง (Bunshah, 1994)



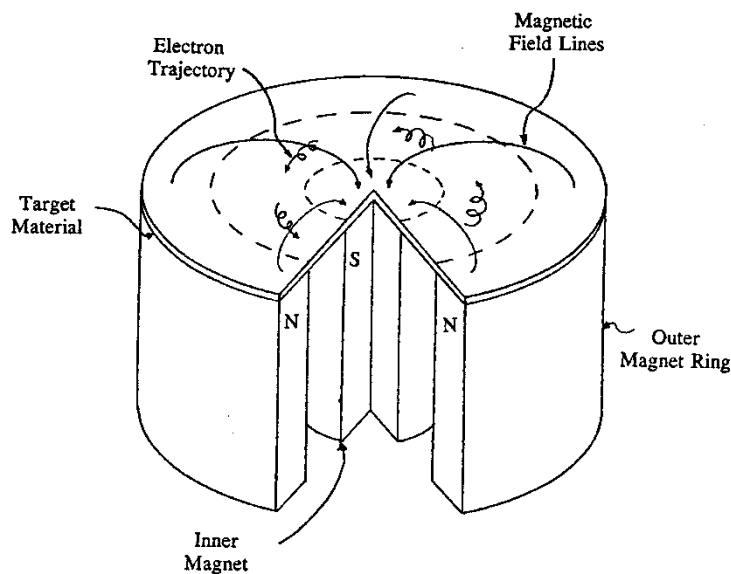
ภาพที่ 2-4 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังแสดงในภาพที่ 2-4 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของyield จากการสปัตเตอริงมีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 2-4 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างyield และกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งซึ่งนี้พบว่าการสปัตเตอริงนิเกิลเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า  $2.6 \times 10^{-4}$  mbar และที่ความดันสูงกว่า  $1.6 \times 10^{-5}$  mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพที่ดีที่สุด จากภาพที่ 2-10 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ  $1.0 \times 10^{-5}$  mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1.0 \text{ mA/cm}^2$  ด้วยอัตราเคลือบ  $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$  ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตน์, 2547)

## 2.4 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

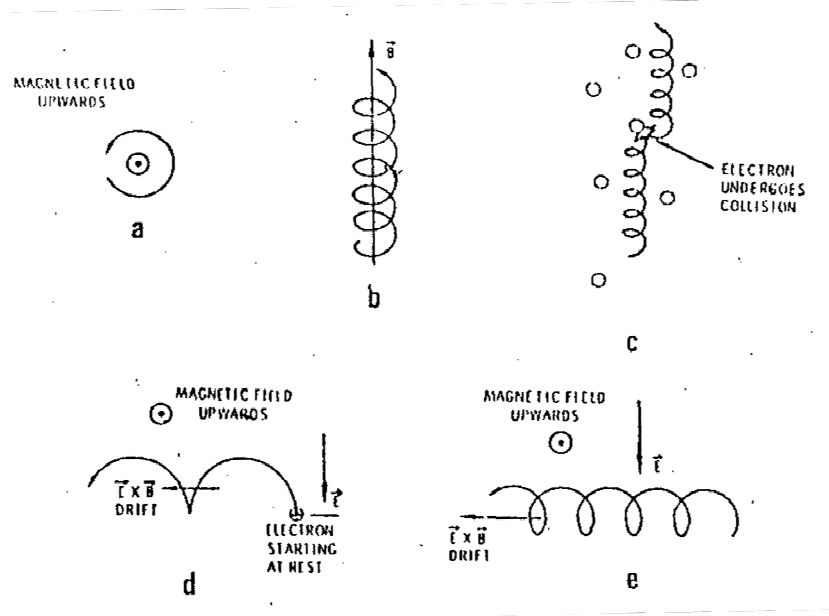
อัตราการเกิดสปีดเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ปกตินั้น ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1 \text{ mA/cm}^2$  และความดันประมาณ  $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (พิเชษฐ ลีมสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547)

ต่อมามีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง (พิเชษฐ ลีมสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547; Bunshan, 1994; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-5) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 2-5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก (Rickerby & Matthews, 1991)

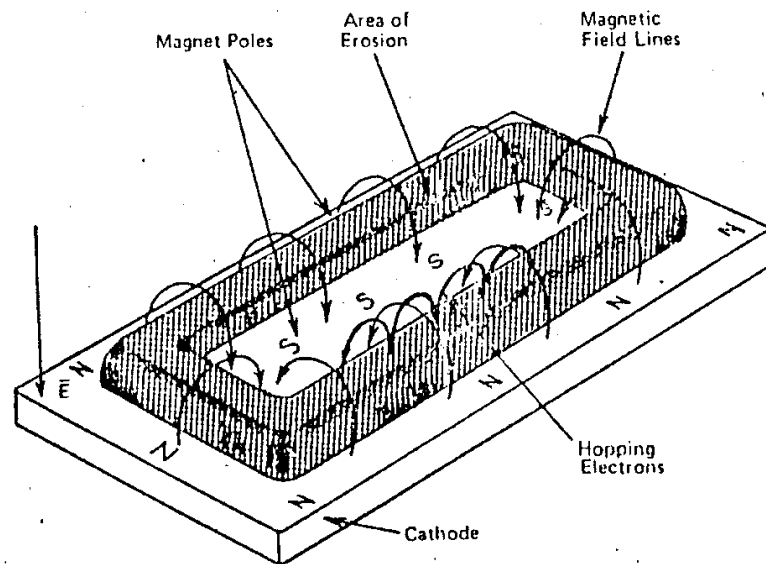




ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแบบต่างๆ (Bunshah, 1994)

ระบบสปัตเตอร์ที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาวจะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวางโดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-6 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้แคโทด และเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนตามแนวผิวหน้าของแคโทด (ภาพที่ 2-7) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวแคโทด ทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวแคโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดการชน ใน ดีซี สปัตเตอร์ที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดจะครอบคลุมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณดาร์คสเปซใน ดีซี สปัตเตอร์ ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ 300 - 800 V

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้มข้นมาก บริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอร์ของระบบนี้มีค่าสูง ขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอร์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์จึงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอร์สูงกว่า  $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$  และมีอัตราเคลือบสูงกว่า  $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$  ความหนาแน่นกระแสที่ผิวแคโทด ประมาณ  $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$  แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าระหว่าง  $300 - 800 \text{ V}$  ที่ความดันประมาณ  $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  ประสิทธิภาพการเคลือบสูงชันกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอร์ขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไดรไอต์สปีดเตอร์ ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง  $10^{-5} \text{ mbar}$

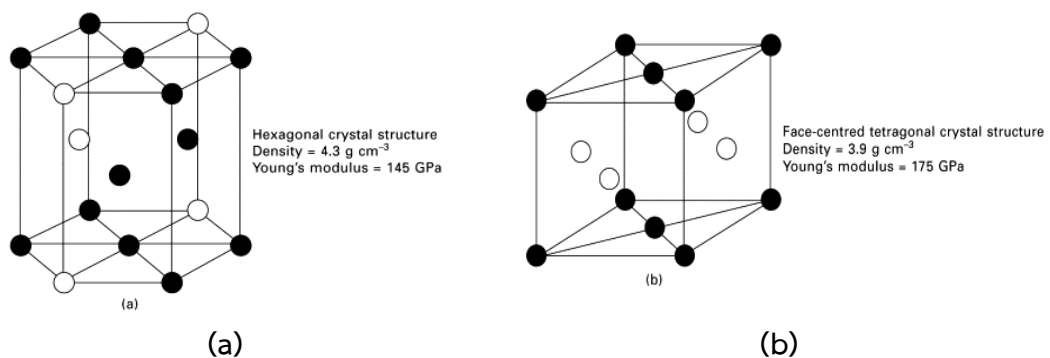


ภาพที่ 2-7 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอร์ (Chapman, 1980)

## 2.5 ไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์หรือไทเทเนียมอลูมิเนียมไนต์อัลลอยด์ เป็นโลหะผสมเกิดจากการรวมตัวกันของโลหะไทเทเนียมและอลูมิเนียม โดยไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์มีโครงสร้างผลึกที่มีความเสถียรอยู่ 3 รูปแบบประกอบด้วย เฟส  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  เฟส  $\gamma\text{-TiAl}$  และเฟส  $\text{TiAl}_3$  โดยไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ได้มีการประยุกต์ใช้งานในเชิงพาณิชย์ เช่น อุตสาหกรรมการบิน ยานยนต์ กังหันของโรงงานไฟฟ้า และชิ้นส่วนในยานอวกาศ เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงสูง ความเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง และความต้านทานการคืบ (Creep resistance) ที่สูงถึง  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (Leyens & Peter, 2003)

ไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์จัดเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ ซึ่งหมายความว่าเกิดจากอะตอมของโลหะ 2 ชนิดหรือมากกว่านั้น รวมกันในอัตราส่วนที่คงที่เพื่อเกิดเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแตกต่างจากโลหะแต่ละชนิด สำหรับไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เกิดจากโลหะไทเทเนียมที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (Body-centered cubic) และอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face-centered cubic) ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วสามารถเกิดเป็นเฟส  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ดังภาพที่ 2-8 (a) และเกิดเป็นเฟส  $\gamma\text{-TiAl}$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered tetragonal ดังภาพที่ 2-8 (b) โดย  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  เกิดขึ้นเมื่อในโลหะผสมมีอลูมิเนียมประมาณ 25% (Leyens & Peter, 2003)



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ (a) เฟส Hexagonal  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$

(b) เฟส Face-centered tetragonal  $\gamma\text{-TiAl}$  เมื่อวงกลมสีดำและสีขาวเป็นอะตอมของไทเทเนียมและอลูมิเนียมตามลำดับ (Leyens & Peter, 2003)

## 2.6 การโค้งของผิวของเหลว

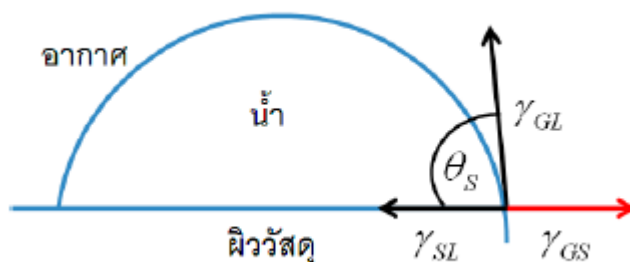
เมื่อเทของเหลวลงในภาชนะและของเหลวนั้นอยู่นิ่ง สังเกตผิวของเหลวจะพบว่าผิวของเหลวตรงบริเวณที่สัมผัสผิวภาชนะมีลักษณะโค้ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การโค้งของผิวของเหลว (Meniscus effect) ซึ่งเกิดจากแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force) สองชนิด คือ แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน และแรงยึดติด (Adhesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน จากปรากฏการณ์การโค้งของผิวของเหลวในภาพที่ 2-9 เห็นว่าผิวของเหลวกับผิวของแข็งจะทำมุมกัน สำหรับของเหลวและของแข็งคู่หนึ่งๆ มุมระหว่างผิวทั้งสองมีค่าต่างกัน โดยมุมระหว่างผิวของเหลวกับผิวของแข็ง ณ จุดสัมผัส เรียกว่า มุมสัมผัส  $\theta$  (Angle of contact) ซึ่งมีค่าตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  มุมสัมผัสจะบอกให้ทราบว่า เมื่อของเหลวอยู่บนพื้น ผิวของเหลวนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยด (ไม่ทำให้พื้นผิวเปียก) หรือแผ่กระจาย (ทำให้พื้นผิวเปียก) โดยพิจารณาดังนี้ มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง  $0$  ถึง  $90$  องศา ของเหลวจะแผ่กระจายและเปียกพื้น มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง  $90^\circ$  ถึง  $180^\circ$  ของเหลวจะเป็นก้อนและไม่เปียกพื้น (ฟิลิกส์ราชมงคลดอทคอม, 2559)



ภาพที่ 2-9 รูปร่างของน้ำบนผิวที่ต่างกัน (ฟิลิกส์ราชมงคลดอทคอม, 2559)

## 2.7 ความชอบน้ำ (Hydrophilicity) และความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity)

วัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความไม่ชอบน้ำจะสามารถต้านทานต่อการยึดเกาะของน้ำได้ เนื่องจากมีแรงตึงผิวต่ำกว่าน้ำ (Low surface tension) จึงทำให้น้ำสามารถรักษาสภาพทรงกลมในลักษณะของหยดน้ำไว้ได้และในขณะเดียวกันก็จะไม่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของวัสดุนั้น แต่สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความชอบน้ำจะมีค่าแรงตึงผิวสูงกว่าน้ำ (High surface tension) จึงทำให้น้ำสามารถกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของวัสดุนั้นจนทำให้อัตราการเปียกแรงตึงผิวของหยดน้ำบนพื้นผิววัสดุที่มีระนาบตรงจะมีแรงกระทำของอากาศที่อยู่รอบด้านซึ่งหากพิจารณาแรงที่กระทำในรูปแบบอย่างง่าย ดังภาพที่ 2-10 (กิตติกร มณีสว่าง, 2554)



ภาพที่ 2-10 มุมสัมผัสบนพื้นผิวระนาบตรง (กิตติกร มณีสว่าง, 2554)

การที่น้ำอยู่บนพื้นผิวใด ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของยัง (Young's equation) ที่เสนอในปี ค.ศ. 1807 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงของอากาศที่กระทำต่อหยดน้ำ ( $\gamma_{GL}$ ) แรงระหว่างอากาศกับผิววัสดุ ( $\gamma_{GS}$ ) และแรงระหว่างผิววัสดุกับน้ำ ( $\gamma_{SL}$ ) ดังสมการที่ (2-1) โดยคือมุมสัมผัสที่กระทำต่อผิววัสดุบนพื้นผิวระนาบตรง ซึ่งถือว่าการวัดมุมสัมผัส ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (Static contact angle) หากมุมสัมผัสนี้มีค่า  $90^\circ$  จะทำให้เกิดความสมดุลของแรงระหว่างอากาศกับผิววัสดุและแรงระหว่างผิววัสดุกับน้ำโดยวัสดุจะอยู่ในสภาวะเปียกอย่างสมบูรณ์เมื่อมุมสัมผัสมีค่าเป็น  $0^\circ$  (กิตติกร มณีสว่าง, 2554)

$$\gamma_{GL} \cos \theta = \gamma_{GS} + \gamma_{SL} \quad (2-1)$$

การศึกษาความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำจะศึกษาค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับวัสดุรองรับสามารถแบ่งได้เป็นลักษณะต่างๆ ดังในภาพที่ 2-11 (ณัฐทิ ถึงสุข, 2557)

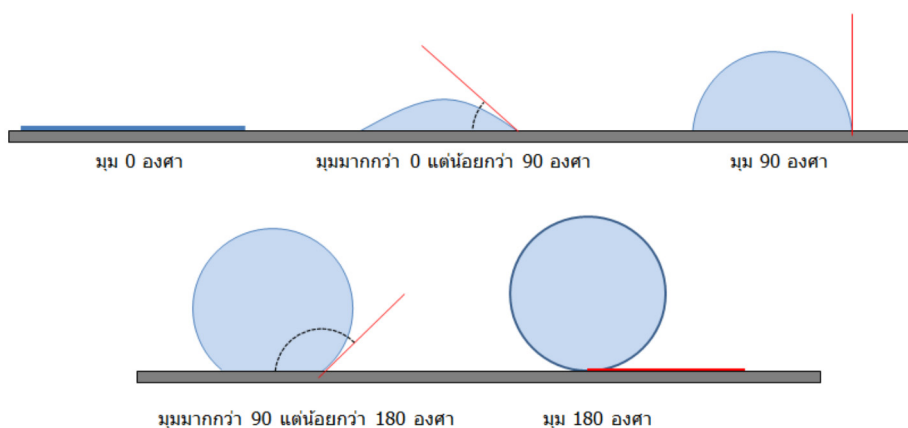
1. มุมสัมผัสเท่ากับ  $0^\circ$  เป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบาง ๆ คลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด

2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง  $0^\circ$  ถึง  $90^\circ$  ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง

3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่  $90^\circ$  แต่ไม่ถึง  $180^\circ$  ของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆ ที่ฐานของหยดของเหลวยังคงสัมผัสกับผิวของของแข็ง

4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวสัมผัสกับผิวของของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ

ถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าน้อยกว่า  $5^\circ$  จะเรียกว่า ความชอบน้ำยิ่งยวด (Super hydrophilicity) และถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำ มีค่ามากกว่า  $150^\circ$  จะเรียกว่าความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Super hydrophobicity)



ภาพที่ 2-11 มุมสัมผัสค่าต่างๆ บนพื้นผิววัสดุ (ณัฐทิ ถึงสุข, 2557)

## 2.8 ทฤษฎีการกัดกร่อนของโลหะ

การกัดกร่อนของโลหะคือการที่โลหะทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมรอบๆ แล้วทำให้โลหะนั้นเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ หรือเรียกง่ายๆ ว่าเนื้อโลหะสูญเสียไป การกัดกร่อนของโลหะที่พบบ่อยในชีวิตประจำวันได้แก่ เหล็กเป็นสนิม (สนิมเหล็กเป็นออกไซด์ของเหล็ก  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ ตัวอย่างเช่น การที่อะตอมของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์แล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) สนิมทองแดง ( $\text{CuO}$ ) หรือสนิมอลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, 2554)

หลักการของการเกิดการกัดกร่อนของโลหะอาจแยกได้ 2 ประเภท

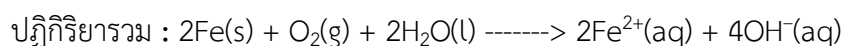
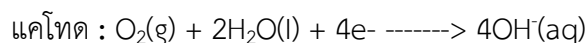
1. เกิดการกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct chemical corrosion) เกิดปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างผิวโลหะและแก๊ส เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น และปฏิกิริยาดังกล่าวมักเกิดที่อุณหภูมิสูง สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเหล่านี้ ถ้ามีลักษณะปกคลุมผิวโลหะอย่างเหนียวแน่น และไม่มีรูพรุนจะทำให้ปฏิกิริยาหยุดได้ และจะเป็นตัวป้องกันผิวโลหะไว้อีกชั้นหนึ่ง เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ปกคลุมผิวอลูมิเนียม เป็นต้น

2. เกิดการกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion) โลหะที่กัดกร่อนได้จะต้องมี อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจเป็นบรรยากาศที่ชื้นหรือของเหลวใดๆ ที่โลหะสัมผัสอยู่ ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะที่กัดกร่อนซึ่งเรียกว่า แอโนด (Anode) ไปยังโลหะหรือธาตุซึ่งแอโนดสัมผัสอยู่ โลหะหรือธาตุตัวหลังนี้เรียกว่าแคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่มีประจุบวก (Cation) วิ่งไปหา ในขณะที่ขั้วแอโนดมีประจุลบ (Anion) วิ่งไปหา เซลล์ไฟฟ้าจะครบวงจร เนื่องจากกระแสอิเล็กตรอนไหลสวนทางกับกระแสไฟฟ้า จึงได้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปภาพที่ 2-12

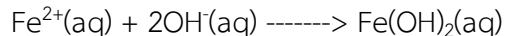


ภาพที่ 2-12 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า (วรวิทย์ จันท์สุวรรณ, 2554)

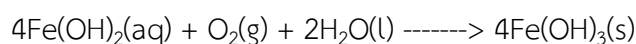
โลหะในธรรมชาติเกิดการกัดกร่อนมีสาเหตุหลายประการ สาเหตุหนึ่งคือเกิดจากผิวของโลหะสัมผัสกับน้ำและแก๊สออกซิเจน การกัดกร่อนของโลหะเกิดจากการที่อะตอมของโลหะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนแล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) สนิมทองแดง ( $\text{CuO}$ ) หรือสนิมอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกิริยาการเกิดสนิม มีกระบวนการซับซ้อนมาก และมีลักษณะเฉพาะตัว เช่นการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{Fe}^{2+}$  ส่วนน้ำและออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น  $\text{OH}^-$  ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติเป็นดังนี้ (ภาพที่ 2-13)



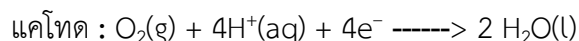
$2\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  และ  $4\text{OH}^-(\text{aq})$  จะรวมกันได้  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ซึ่งไม่ละลายน้ำดังสมการ



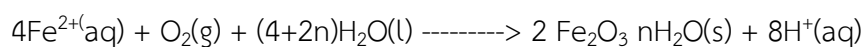
$\text{Fe}(\text{OH})_2$  ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศต่อไปได้  $\text{Fe}(\text{OH})_3$



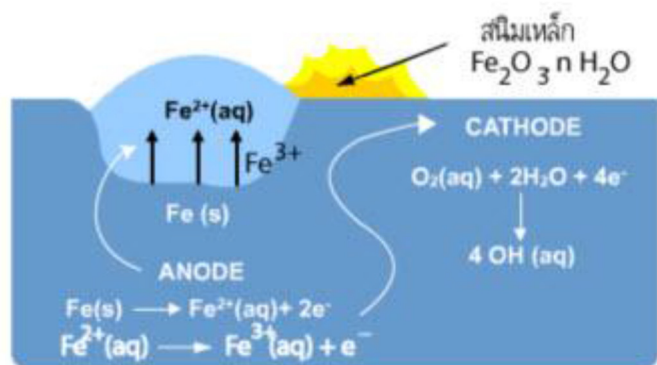
ไอออน (III) ไฮดรอกไซด์ [ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ] ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปไอออน (III) ออกไซด์ที่มีน้ำผลึกอยู่ในโมเลกุล และน้ำผลึกอาจมีปริมาณแตกต่างกัน จึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  แก๊ส  $\text{CO}_2$  มีส่วนทำให้เกิดสนิมในธรรมชาติได้เนื่องจาก  $\text{CO}_2$  ละลายน้ำได้  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ซึ่งแตกตัวให้  $\text{H}^+$  จากนั้น  $\text{H}^+$  จะรับอิเล็กตรอนจากเหล็กและเกิดการเปลี่ยนแปลงดังสมการ



$\text{Fe}^{2+}$  ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้สนิมเหล็กดังสมการ







ภาพที่ 2-13 ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติ (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2554)

## 2.9 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

### 2.9.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

เทคนิคการวิเคราะห์วัสดุด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis) ได้มีการนำมาใช้เพื่อแยกแยะโครงสร้างผลึกของชิ้นงานตัวอย่าง โดยอาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะอาศัยลำรังสีเอกซ์ (X-ray beam) ที่มีค่าความยาวคลื่นเป็น  $\lambda$  จากแหล่งกำเนิดพุ่งเข้าชนกับผิวเคลือบ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนเกิดขึ้น ความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนออกมานั้นจะถูกเก็บบันทึกในรูปของฟังก์ชันของมุมการเลี้ยวเบน (Diffracted angle,  $\theta$ ) โดยความเข้มของสัญญาณ (Intensity) จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ถ้ามุมของการเลี้ยวเบนเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2-2)$$

เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) แต่ละดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices)

$n$  คือ เลขจำนวนเต็มที่แสดง order of diffraction

$\theta$  คือ มุมสะท้อนของรังสีเอกซ์

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

ธาตุหรือสารประกอบทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมที่จัดเรียงตัวในแลตทิซ (Lattice) โดยมีรูปทรงและระยะห่างเหมือนกันและมีหน่วยเซลล์ (Unit cell) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่บ่งบอกถึงโครงสร้างผลึกของธาตุหรือสารประกอบนั้น ๆ การเรียงตัวอย่างสมมาตรในสามมิตินี้ทำให้ผลึก

ประพืดัวเสมือนเป็นเกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction grating) เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งตกกระทบลงบนวัตถุ อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ที่กระทำกับอิเล็กตรอนในอะตอม จะส่งผลทำให้อิเล็กตรอนสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของรังสีเอกซ์ และปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาในทุกทิศทางด้วยความถี่คงเดิม ถ้าการเลี้ยวเบนเกิดกับอะตอมภายในผลึกที่เรียงตัวห่างเป็นระยะทางเท่าๆ กัน รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมานั้นจะเกิดการแทรกสอดกัน สัญญาณที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเมื่อมุมตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนและที่บางค่ามุม โดยที่การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเกิดจากอะตอมในระนาบต่างๆ ที่ขนานและมีระยะห่างเท่า ๆ กัน ดังภาพที่ 2-14 เราสามารถคำนวณหา  $d$  ของระนาบที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ โดยใช้สมการของแบรกก์ดังกล่าวข้างต้น นำค่า  $d$  ของหลาย ๆ ระนาบไปคำนวณหาค่าคงที่แลตทิซได้อีกด้วย

นอกจากนี้ สามารถนำผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไปคำนวณหาขนาดของเม็ดผลึกหรือเกรน (Grain size) ได้จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ดังต่อไปนี้

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2-3)$$

เมื่อ  $L$  คือ ขนาดของผลึก

$k$  คือ ค่าคงที่ของเชอร์เรอร์ที่ขึ้นกับรูปร่างของผลึก ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.94 สำหรับผลึกทรงกลมที่มีโครงสร้างลูกบาศก์แบบสมมาตร

$\beta$  คือ ความกว้างที่ครึ่งของความสูงพีค (Full Width at Half Maximum, FWHM)

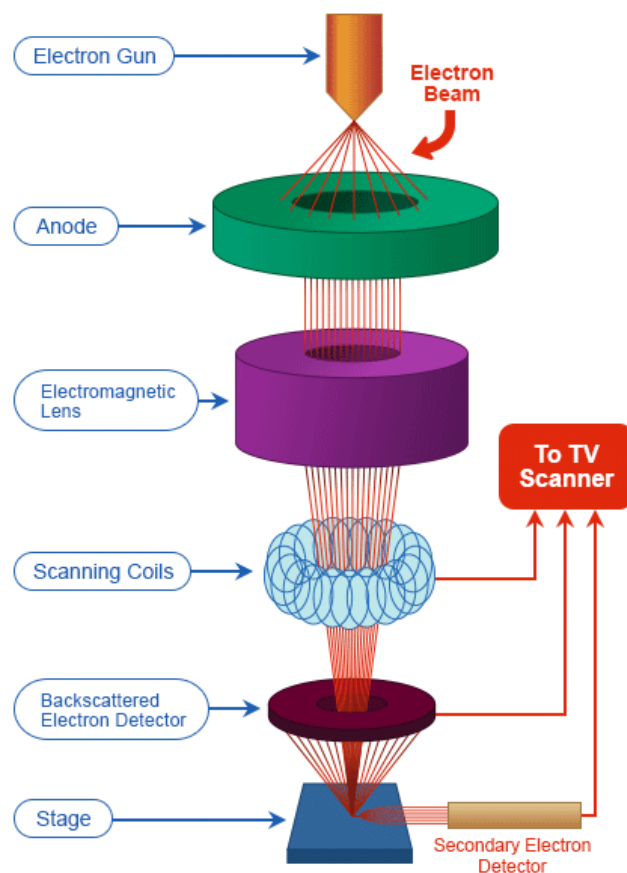
$\theta$  คือ ครึ่งของมุมการเลี้ยวเบนที่ศูนย์กลางพีค

ในการทดสอบบางครั้ง มุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อาจมีการเลื่อนไปในตำแหน่งมุมที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความเค้นตึงค้าง (Residual stress) ในผิวของสารเคลือบ ส่วนความเข้ม (Intensity) ของสัญญาณที่ได้นั้นอาจจะไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Prefer orientation) ต่างกันของอะตอมในชั้นเคลือบ นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บ่งบอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase composition) และค่าแลตทิซ (Lattice) อีกด้วย

ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้วิธี  $\theta - 2\theta$  ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ( $\theta - 2\theta$  Diffractometer method) เทคนิคนี้ใช้ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือวัสดุหลายผลึกก็ได้ ในเทคนิคนี้



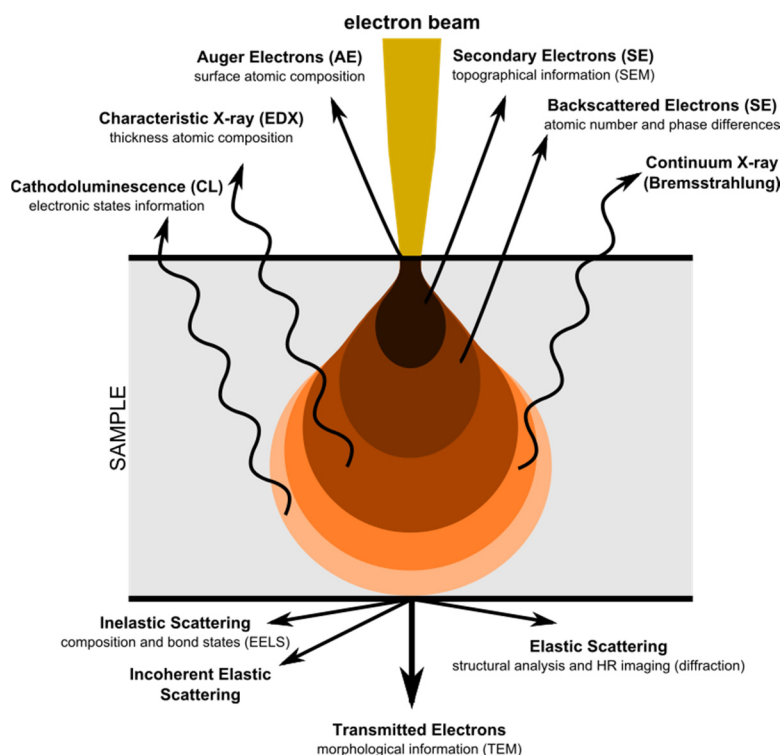
ปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิด (Aperture) ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันตามลักษณะการใช้งาน โดยกลุ่มของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) กลายเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) เลนส์คอนเดนเซอร์นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมแสงอิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่จับโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบบนผิวของตัวอย่าง โดยมีคอยล์สแกน (Scanning coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่ที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ



ภาพที่ 2-15 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (เข้าถึงได้จาก : <http://www.nanoimages.com/sem-technology-overview/>)

ขณะที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุ และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้น

ความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ออกมาดังภาพที่ 2-16 ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image, BEI) และสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-ray image, XRI)



ภาพที่ 2-16 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของชิ้นงานตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ (เข้าถึงได้จาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_microscope](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope))

สัญญาณที่ใช้ในการประมวลผลภาพสามารถแบ่งได้ดังนี้

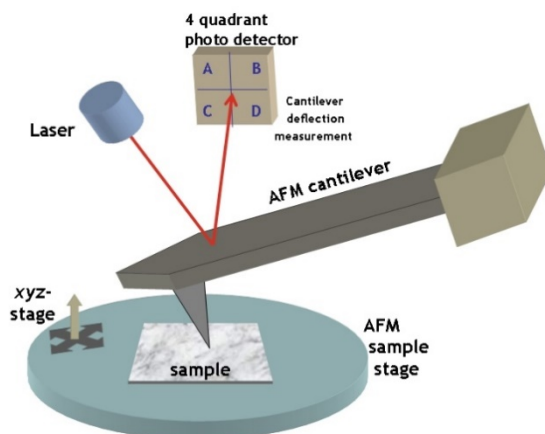
1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำช่วง 3-5 eV เกิดที่พื้นผิวระดับลึกไม่เกิน 10 nm โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image, BEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนและกระเจิงกลับออกมาซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 nm สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์

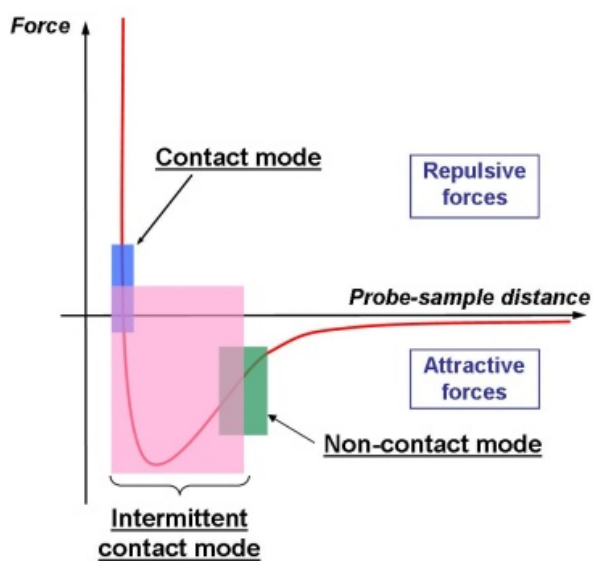
(X-ray image, XRI) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรทำให้อะตอมต้องรักษาภาพสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนมีพลังงานสูงกว่าจึงต้องลดพลังงานลงโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามืดยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพสัญญาณ ภาพจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพได้ โดยต้องเลือกใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดให้เหมาะสมกับสัญญาณภาพแต่ละชนิด

### 2.9.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope)

ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางที่สำคัญคือ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการหาลักษณะนี้ คือ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope) หรือ AFM เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning probe microscopes, SPMs) ชนิดหนึ่ง ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ไว้ดังนี้ คือ AFM เป็นเทคนิคประเภทหนึ่งในกลุ่มของ Scanning probe microscopy ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการดูสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ โดยมีหลักการพื้นฐาน คือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็ก (Probe tip) ที่ทำจากวัสดุ Silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ซึ่งเป็นเข็มขนาดเล็กประมาณ 10 nm เคลื่อนที่สแกน (Scanning) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุโดยการควบคุมของตัว Piezoelectric scanner จะเกิดแรงที่กระทำต่อคาน (Cantilever) ของเข็มตรวจวัด ซึ่งสภาพผิวของวัสดุที่แตกต่างกันไป จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป (ตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (Bending) เกิดขึ้น ทำให้เลเซอร์ที่ยิงไปบนคานของเข็มตรวจวัดเปลี่ยนแปลงตามสภาพพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งสามารถถูกตรวจวัดได้โดย Photodetector ดังภาพที่ 2-17 จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ทำการตรวจสอบ จึงทำให้ได้ภาพที่ออกมาสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ โดย AFM มีความสามารถพิเศษคือสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลาย ทั้งที่เป็นฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้



ภาพที่ 2-17 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope ในแบบ AFM (เข้าถึงได้จาก <http://www.physics.ncsu.edu/wang/>)



ภาพที่ 2-18 ลักษณะของแรงที่กระทำระหว่างอะตอมที่ระยะห่างระหว่างวัตถุต่างกัน (เข้าถึงได้จาก <http://perso.univ-lemans.fr/~bardeau/IMMMPEC/afm/afm-introduction.html>)

สำหรับเทคนิค AFM นั้น สิ่งที่ทำให้คานของเข็มตรวจวัด (Cantilever) นั้นเกิดการโค้งงอเมื่อลากไปบนผิวของวัสดุ คือ แรงที่กระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มตรวจวัด (Tip) กับผิววัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 2-18

ดังนั้น เทคนิค AFM จึงสามารถที่จะใช้ทำการศึกษได้หลายวิธี อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการใช้ AFM ในวิธีใด แรงกระทำที่เกิดขึ้นก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพรูปทรง Topography ของพื้นผิวงาน และทำให้ได้ภาพที่สอดคล้องกับสภาพผิวของวัสดุเช่นกัน

ภาพที่ 2-19 แสดงตัวอย่างเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ซึ่งจากภาพบริเวณตรงกลางก็คือบริเวณที่จะใช้วางชิ้นงานและก็เป็นบริเวณที่จะมีเข็มวัด (Probe tip) วางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้อง Video microscope ติดตั้งไว้ เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ส่วนภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องจะแสดงออกมาทางจอแสดงผล นอกจากนี้ทางด้านบนยังมีแหล่งให้กำเนิดแสงเลเซอร์ ที่จะใช้สำหรับเป็นตัวบอกตำแหน่งของเข็มที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเคลื่อนที่



ภาพที่ 2-19 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) แบบ Multimode (เข้าถึงได้จาก : <https://sjhsrc.wikispaces.com/AFM?responseToken=d0fe8c810e5c9a263a3ddde790eb69f2>)



#### 2.9.4 รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy)

การศึกษาลักษณะเฉพาะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางคือ องค์ประกอบธาตุที่มีในเนื้อฟิล์มที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิค EDX ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ คือ เมื่ออะตอมถูกไอออนไนซ์โดยการระดมยิงด้วยอิเล็กตรอนเข้าไปในวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้น K ทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกทำให้เกิดช่องว่าง จากนั้นอะตอมจะเกิดความไม่เสถียร และอิเล็กตรอนวงนอกจะเข้ามาแทนที่ การที่อิเล็กตรอนวงนอกจะเข้ามาแทนที่ได้นั้นจะต้องมีพลังงานเท่ากับ อิเล็กตรอนวงนอกนั้นมีพลังงานสูงกว่าจึงต้องปลดปล่อยพลังงานออกมา และพลังงานที่ปล่อยออกมานั้นอยู่ในรูปรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะตัว (Characteristic X-ray) หากอิเล็กตรอนที่เข้ามาแทนที่นั้นมาจากชั้น L จะเรียกรังสีเอกซ์ที่ได้นั้นว่า รังสีเอกซ์  $K_{\alpha}$  ถ้าหากอิเล็กตรอนที่เข้ามาแทนที่นั้นมาจากชั้น M ก็จะได้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานอีกค่าหนึ่ง เราเรียกรังสีเอกซ์ที่ได้นั้นว่า รังสีเอกซ์  $K_{\beta}$  แต่ถ้าหากรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมานั้นมีพลังงานที่จะสามารถไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดออกมาจากอะตอมอีก เราจะเรียกอิเล็กตรอนตัวที่หลุดออกมานั้นว่า โอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ซึ่งผลรวมของทั้งสองปรากฏการณ์นี้คิดเป็น 100% ผลการเรียงของรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม (Atomic number; Z) ในขณะที่การปลดปล่อยโอเจอร์อิเล็กตรอนนั้นตรงกันข้าม สำหรับการเกิดไอออนไนซ์ที่ชั้น L แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในวง M หรือ N เข้ามาแทนที่ จะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์  $L_{\alpha}$  หรือ  $L_{\beta}$  ตามลำดับ สำหรับธาตุหนัก อิเล็กตรอนวงนอกอื่น ๆ ยังสามารถเข้ามาแทนที่ช่องว่างที่อิเล็กตรอนวงในนั้นหลุดออกได้ แม้จะไม่ทั้งหมด ซึ่งต้องเป็นไปตาม กฎการเลือก (Selection rules) ในวิชาฟิสิกส์ควอนตัม

1.  $\Delta n > 0$  เช่น  $L \rightarrow K$ ,  $M \rightarrow K$  ห้าม  $L_3 \rightarrow L_2$
2.  $\Delta l = \pm 1$  และ  $\Delta j = -1, 0, +1$

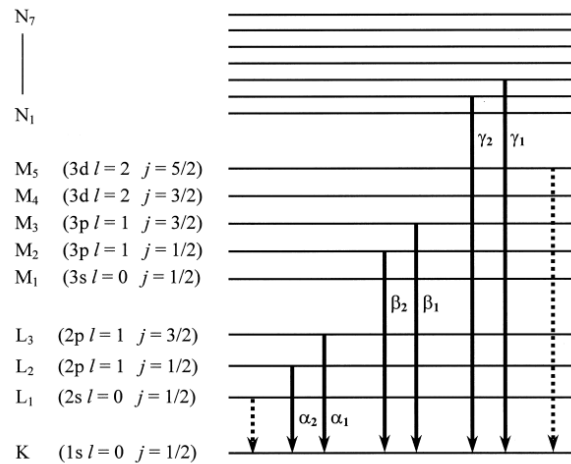
เมื่อ  $n$  คือ เลขควอนตัมหลัก (Principle quantum number)

$l$  คือ เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum quantum number)

$j$  คือ เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุมรวม (Total angular momentum quantum number) โดย  $j = l \pm s$

การรวมกันของโมเมนตัมออร์บิทัลและสปิน ซึ่งเรียกว่า กฎการเลือกชั่วครู่ที่ช่วยให้การคาดการณ์ของการเปลี่ยนวงโคจรที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและพลังงานของรังสีเอกซ์ แสดงได้ดังภาพที่ 2-20 ซึ่งเป็นการลดระดับลงมาที่ชั้น K ที่เส้นทึบจะได้พลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะค่าและเส้นประนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เพราะไม่เป็นไปตามกฎการเลือก

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



ภาพที่ 2-20 การลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้นต่าง ๆ มาถึงชั้น K ซึ่งเส้นทึบเป็นไปตามกฎการเลือก และเส้นประไม่เป็นไปตามกฎการเลือก (Bubert & Jenett, 2003)

## 2.10 การทดสอบความสามารถในการเปียก (Wettability)

เป็นเทคนิคในการศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างโดยการหยดสารละลาย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ หรือสารเคมีอื่นๆ ลงบนพื้นผิวแล้วใช้วิธีการวัดมุมสัมผัส (Contact angle method) ที่เกิดขึ้นสามารถประยุกต์ใช้ในงานวิจัย เช่น วิเคราะห์ประสิทธิภาพของสารเคลือบกันน้ำ (Water repellent) กระจกรถยนต์ และฟิล์มเคลือบกระจกในอาคาร โดยสามารถวิเคราะห์โหมดต่างๆ ได้ดังนี้

1. วัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ น้ำมัน สารเคมีชนิดต่างๆ (Contact angle measurement)
2. วัดพลังงานพื้นผิว (Surface energy) โดยการหยดสารละลายที่มีความเป็นขั้วที่ต่างกันอย่างน้อย 3 ชนิด ลงบนผิวของตัวอย่างและทำการคำนวณหาค่าพลังงานพื้นผิว
3. Temperature control heat stage เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อมุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวของตัวอย่าง

## 2.11 การทดสอบการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion)

การทดสอบการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีเป็นการจำลองการเกิดกระบวนการการกัดกร่อนของโลหะเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนและพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะ โดยปกติแล้วการเกิดการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะกับสภาพแวดล้อมรอบๆ โลหะ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายเรียกว่า ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเมื่อสารละลายที่สัมผัสกับโลหะ หลักการของการทดสอบการกัดกร่อนโลหะโดยใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี คือการป้อนศักย์ไฟฟ้าเร่งการกัดกร่อน โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออนและเป็นการเชื่อมต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) (รุจิภรณ์ นาคขุนทด, 2560)

โดยวงจรโพเทนชิโอสแตตประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 3 ขั้ว ดังแสดงในภาพที่ 2-21

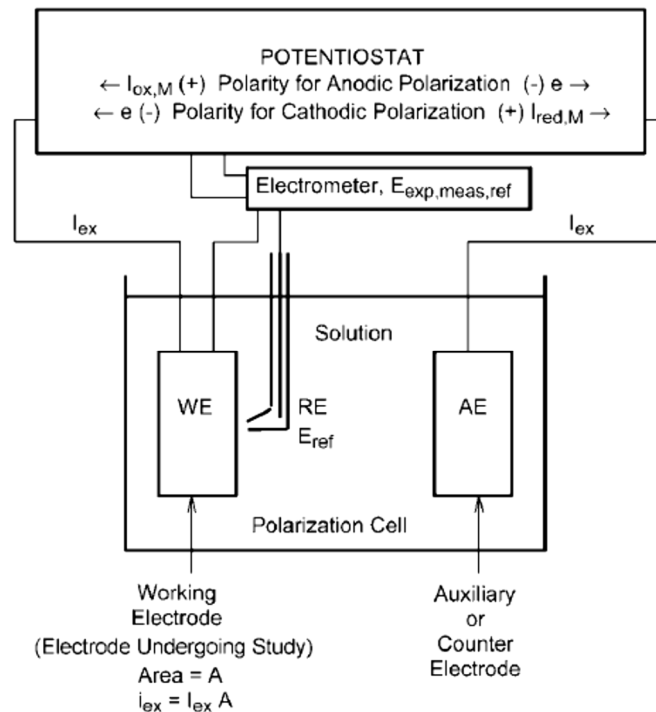
1. ขั้วอิเล็กโทรดทำงาน (Working electrode; WE) เป็นขั้วแอโนดสำหรับตัวอย่างที่ทดสอบการกัดกร่อน โดยเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและให้อิเล็กตรอน
2. ขั้วอิเล็กโทรดเสริมหรือตรงข้าม (Auxiliary or counter electrode; AE) ทำจากวัสดุที่รองรับปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของสารตั้งต้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แต่จะไม่เกิดการกัดกร่อนและปนเปื้อนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนใหญ่จะทำจากแพลทินัมหรือกราไฟท์ที่มีความหนาแน่นสูง
3. ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode; RE) เป็นขั้วแคโทดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันและรับอิเล็กตรอน เช่น SCE (Saturated calomel electrode) หรือ Ag/AgCl ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

โพเทนชิโอสแตตเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความไวสูง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นจะควบคุมศักย์ไฟฟ้าของ WE ที่สัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า RE ให้คงที่ (ตั้งค่าไว้) ถึงแม้ว่ากระแสไฟฟ้าภายนอก ( $I_{ex}$ ) อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อโพเทนชิโอสแตตถูกตัดการเชื่อมต่อจากตัวอย่างที่ต้องการวัดการกัดกร่อน (WE) จะเกิดศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open-circuit potential; OCP) ที่ WE ซึ่งกระบวนการกัดกร่อนอย่างอิสระจะเริ่มขึ้น ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ก็คือศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของวงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าภายนอก ( $I_{ex}$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ ในการทดสอบเริ่มต้นจากการวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบวงจรเปิด ( $E_{corr}$ ) จนกระทั่งได้ค่าสถานะคงที่ โดยเมื่อนำข้อมูลความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มาสร้างกราฟเส้นโค้งโพเทนชิโอดนามิก โพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization curves) ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ตั้งค่าไว้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สูงกว่า  $E_{corr}$ ) จะได้เส้นกราฟโพลาริเซชันแอโนดิก (Anodic polarization curve) ในทางกลับกันหากศักย์ไฟฟ้านลดลงอย่างต่อเนื่อง (ต่ำกว่า  $E_{corr}$ ) จะได้เส้นกราฟโพลาริเซชันแคโทดิก

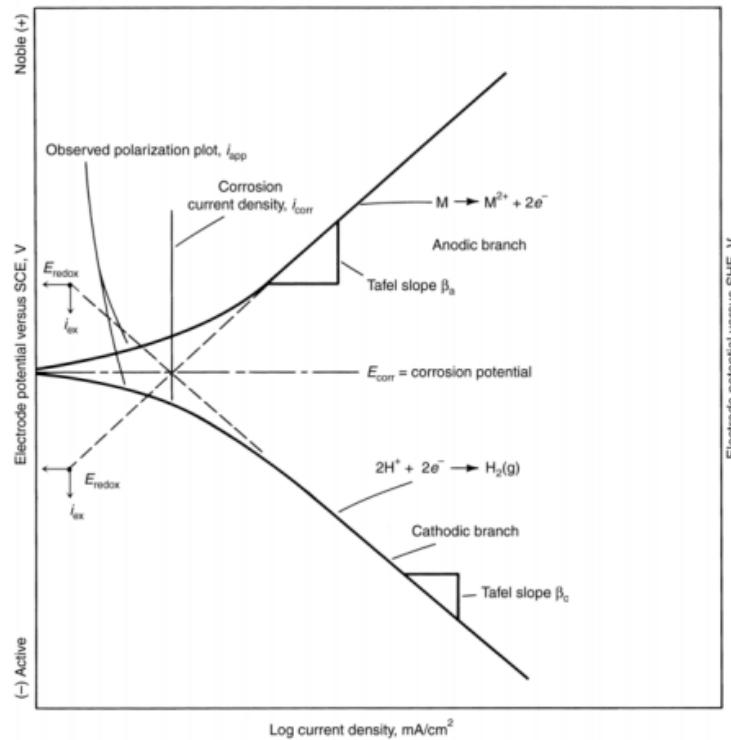
(Cathodic polarization curve) (Stansbury & Buchanan, 2000) ซึ่งสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าในการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้นกราฟโพลาริเซชันแอโนดิกและแคโทดิก ดังแสดงในภาพที่ 2-22 ด้วยวิธี Tafel extrapolation และสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ได้จาก

$$CR = K \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (2-4)$$

เมื่อ	$CR$	คือ	อัตราการกัดกร่อน ในหน่วย mm/year
	$K$	คือ	แฟกเตอร์การแปลงหน่วย ( $0.00327 \text{ mm} \cdot \text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ )
	$i_{corr}$	คือ	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion Current Density) ในหน่วย $\text{mA}/\text{cm}^2$
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่าง ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
	$EW$	คือ	น้ำหนักกรัมสมมูล (Equivalent Weight) ของวัสดุตัวอย่าง



ภาพที่ 2-21 ไดอะแกรมของโพเทนชิโอสแตท (Stansbury & Buchanan, 2000)



ภาพที่ 2-22 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากกราฟเส้นโค้งโพเทนเชียลไดนามิกโพลาริเซชัน (Scully & Kelly, 2003)

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Padmaprabu และคณะ (2000) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมด้วยวิธีโคแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นไทเทเนียมและอลูมิเนียม โดยให้เป้าอลูมิเนียมมีขนาดพื้นที่เป็นสองเท่าของเป้าไทเทเนียม และให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับขณะเคลือบอยู่ในช่วง 573 ถึง 873 K เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของวัสดุรองรับที่มีต่อโครงสร้างระดับไมโครของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางมีแนวโน้มของการเรียงตัวของผลึกไทเทเนียมอลูมิเนียมในระนาบ (111) ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัสดุรองรับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งขนาดผลึกของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัสดุรองรับเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขนาดผลึกเฉลี่ยของผลึกประมาณ  $1850 \text{ nm}^2$  ที่อุณหภูมิ 573 K และมีค่าเป็น  $2300 \text{ nm}^2$  ที่อุณหภูมิ 873 K

Oliveira และคณะ (2005) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมบนเหล็กกล้า AISIM2 ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ใช้สารเคลือบเป็นไทเทเนียมและอลูมิเนียมวางทำมุมกัน  $90^\circ$  ภายใต้เงื่อนไขการให้ค่ากระแสไฟฟ้าแก่เป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียมที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของปริมาณสัดส่วนองค์ประกอบของไทเทเนียมและอลูมิเนียมในฟิล์มบางที่มีต่อโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางกลของฟิล์มบาง โดยกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าอลูมิเนียมมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 5.25 A และให้กระแสไฟฟ้ารวมของเป้าไทเทเนียมและอลูมิเนียมมีค่าคงที่เป็น 11.25 A พบว่าเมื่อปริมาณอลูมิเนียมในฟิล์มบางมีค่า 71.5 ถึง 86.1 at.% ฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกเป็นอลูมิเนียมที่มีแนวโน้มการเรียงตัวของผลึกในระนาบ (111) มีค่าความแข็งของฟิล์มบางในช่วง 8.9 ถึง 13 GPa โดยค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณไทเทเนียมในฟิล์มบางที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณอลูมิเนียมในฟิล์มบางมีค่าต่ำ โดยมีค่า 3.7 ถึง 19.9 at.% พบโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมเกิดขึ้น โดยค่าความแข็งของฟิล์มบางสูงเกินกว่า 23 GPa

Vieira และคณะ (2002) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม-อลูมิเนียมด้วยวิธี ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงลงบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นสแตนเลสสตีลที่เงื่อนไขการเคลือบสองแบบคือ ใช้เป้าสารเคลือบสองเป้าในการเคลือบคือเป้าไทเทเนียมและเป้าอลูมิเนียม และใช้เป้าสารเคลือบเดี่ยวคือเป้าโลหะผสมไทเทเนียมอลูมิเนียมในเฟสแกมมา ฟิล์มบางที่เคลือบได้ทั้งสองเงื่อนไขไปอบอ่อนที่อุณหภูมิในช่วง 500 ถึง 700 °C ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างผลึกเป็น  $\gamma$ -TiAl ผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยใช้สองเป้าสารเคลือบมีโครงสร้างผลึกเป็น  $\gamma$ -TiAl ส่วนฟิล์มบางที่เคลือบโดยใช้เป้าสารเคลือบเดี่ยวพบโครงสร้างผลึกของ  $\gamma$ -TiAl และ  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al เกิดขึ้น โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนเพิ่มเป็น 18 ชั่วโมง ฟิล์มบางที่เคลือบได้ทั้งสองเงื่อนไขจะมีค่าความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้น

Kim และคณะ (2004) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม-อลูมิเนียมบนวัสดุรองรับที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยวิธี อาร์ เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูง โดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นสารประกอบไทเทเนียมอลูมิเนียม พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยไม่มีการอบอ่อนมีโครงสร้างผลึกเป็นอสัณฐาน เมื่อนำฟิล์มไปอบอ่อนที่อุณหภูมิในช่วง 500 – 700 °C พบโครงสร้างผลึกของ  $\gamma$ -TiAl เกิดขึ้นโดยค่าสภาพต้านทานของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้น เป็นผลเนื่องจากเฟส  $\gamma$ -TiAl ในเนื้อฟิล์มที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้น

Sudheendra และคณะ (2012) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นไทเทเนียมและอลูมิเนียม โดยใช้วัสดุรองรับเป็นแผ่นสแตนเลสสตีลและแผ่นอลูมิเนียม โดยให้อุณหภูมิระหว่างเคลือบเป็น 390 °C และให้อัตราเคลือบของอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเป็น 1:3 พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมอลูมิเนียมที่มีขนาดผลึกประมาณ 123.9 nm มีค่า lattice stain ประมาณ 0.135 % และมีค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 1873 HV

Wang และคณะ (2015) ได้ทำการสร้างชั้นเคลือบอลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยด์บนชิ้นงาน  $\gamma$ -TiAl ด้วยวิธี cold spray เพื่อเพิ่มการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงาน โดยศึกษาภายใต้อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมงและทดลองเป็นจำนวน 120 รอบ ผลการทดลองพบว่าชั้นเคลือบสามารถป้องกันเพิ่มการแพร่ของออกซิเจนและเพิ่มการต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นผลเนื่องจากชั้นเคลือบมีการเปลี่ยนเป็นชั้นของอลูมินาที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงาน  $\gamma$ -TiAl ได้ดี

Ebach-Stahl และคณะ (2016) ได้ทำการสร้างชั้นฟิล์มบางผสมระหว่างแพตตินัมกับอลูมิเนียมบนผิวชิ้นงาน  $\gamma$ -TiAl ด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง โดยให้ปริมาณสัดส่วนของแพตตินัมในฟิล์มบางมีค่าเป็น 31 at% 47 at% และ 100 at% ตามลำดับ โดยพบว่าฟิล์มบางที่มีสัดส่วนของแพตตินัมเป็น 47% มีคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 950 °C ได้สูงสุดเป็นผลเนื่องจากการเกิดชั้นอลูมินาที่มีลักษณะต่อเนื่องบนพื้นผิวของฟิล์มผสมระหว่างแพตตินัมกับอลูมิเนียม

Dettenwanger และคณะ (1998) ได้ศึกษากระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $\gamma$ -TiAl ที่อุณหภูมิ 1173 K ภายใต้สภาวะบรรยากาศของอากาศและแก๊สออกซิเจน พบว่าการเกิดชั้นฟิล์มอลูมินาบนผิวของ  $\gamma$ -TiAl เนื่องจากการออกซิเดชันของ  $\gamma$ -TiAl ในสภาวะบรรยากาศมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องเมื่อเทียบกับในสภาวะของแก๊สออกซิเจนเป็นผลเนื่องจากแก๊สไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ ทำให้ไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ซึ่งไปขัดขวางการเกิดเป็นชั้นฟิล์มอลูมินา โดยไทเทเนียมไนไตรด์ถูกออกซิเดชันและกลายเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เกิดเป็นชั้นผสมกันของฟิล์มอลูมินากับไทเทเนียมไดออกไซด์ แทนที่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มอลูมินาเท่านั้น

Alvarez และคณะ (2016) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิค glancing angle deposition ผลการเคลือบพบว่าลักษณะการโตของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมจะขึ้นกับขนาดของมุมเอียงและค่าความดันที่ใช้เคลือบ โดยที่ความดันต่ำประมาณ 0.15 Pa ลักษณะการโตของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมมีการเปลี่ยนแปลงจากการโตแบบ compact เป็นการโตแบบ isolate ส่วนการโตของฟิล์มบางไทเทเนียมมีการโตในแนวตั้งที่เป็นลักษณะเป็นแท่งขนาดนาโนเมื่อมุมในการเคลือบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Meng และคณะ (2014) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุรองรับอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงภายใต้เงื่อนไขค่าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมีค่าคงที่เป็น 0.05 Pa และให้ความดันรวมของแก๊สขณะเคลือบมีค่าอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 4 Pa ผลการทดลองพบว่าที่ค่าความดันรวมของแก๊สมีค่าต่ำกว่า 1 Pa ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้มีลักษณะแน่นและมีการโตในทิศทางระนาบ (101) ส่วนที่ค่าความดันรวมของแก๊สมีค่าสูงกว่า 1 Pa ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นแท่งขนาดนาโน โดยวางตัวในระนาบ (110) โดยฟิล์มบางที่เคลือบทุกเงื่อนไขมีโครงสร้างผลึกเป็นอานาเทส และผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิค TEM แท่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมาก



## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ (1) ส่วนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ (2) ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ มีรายละเอียดดังนี้

##### 1. ส่วนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

1.1 เครื่องเคลือบสุญญากาศ เป็นระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ เป็นเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

##### 1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

###### 1.2.1 เป้าสารเคลือบ (Target) มี 2 ชนิด

- เป้าสารเคลือบไทเทเนียม มีความบริสุทธิ์ 99.95 %
- เป้าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียม มีความบริสุทธิ์ 99.9995 %

###### 1.2.2 วัสดุรองรับ (Substrate) มี 2 ชนิด

- แผ่นซิลิกอน
- แผ่นสแตนเลสสตีล

###### 1.2.3 แก๊ส (Gas) มี 1 ชนิด

- แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% ใช้เป็นแก๊สสปัตเตอร์

##### 2. ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

2.1 X-ray diffractometer (XRD) สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Discover (Bruker AXS)

2.2 Scanning electron microscope (SEM) สำหรับศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น LEO 1450VP (LEO)

2.3 Atomic force microscope (AFM) สำหรับศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น Nanoscope IV (Veeco Instruments Inc.)

2.4 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) สำหรับศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง EDAX ซึ่งต่อพ่วงกับ Scanning electron microscope รุ่น LEO 1450VP (LEO)

2.5 Contact angle meter สำหรับศึกษาความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้

2.6 Potentiostat สำหรับทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Potentiostat รุ่น PGSTAT302N (Autolab)

### 3.2 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคลด์เตอริง

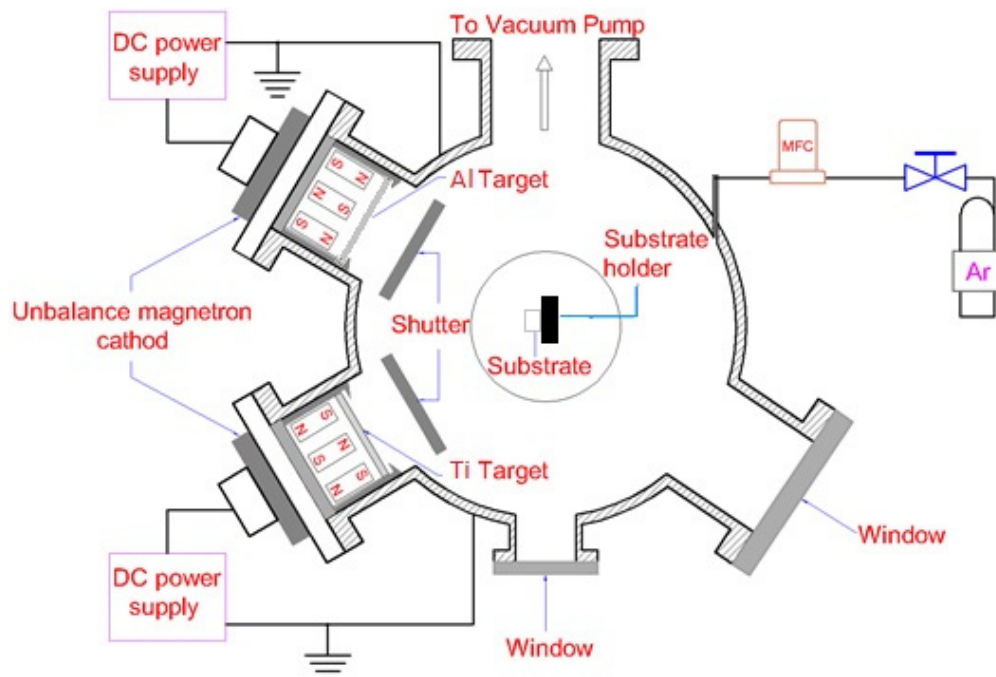
ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในงานวิจัยนี้เตรียมจากเครื่องเคลือบระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคลด์เตอริง (ภาพที่ 3-1 และ 3-2) ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังนั้นเพื่อให้ฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพและสมบัติตามที่ต้องการ จึงต้องลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับ  $10^{-5}$  mbar ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคลด์เตอริง ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของระบบสุญญากาศ (Vacuum parts) และส่วนของระบบเคลือบ (Coating parts) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนของระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยห้องเคลือบทรงกระบอกทำจากสแตนเลสสตีล มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 310.0 mm และสูง 370.0 mm ระบบเครื่องสูบล้างสุญญากาศของเครื่องเคลือบประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพรวไอแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และมีเครื่องสูบล้างโรตารีเป็นเครื่องสูบล้าง สำหรับการวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศใช้มาตรวัดความดันของ Balzers รุ่น TPG300 โดยใช้หัววัดแบบพิรานี รุ่น TPR010 และหัววัดแบบเพนนิ่ง รุ่น IKR050

2. ส่วนของระบบเคลือบ เป็นส่วนในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมคาร์ไบด์ ประกอบด้วยแมกนีตรอนคาโทด 2 หัว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54.0 mm และมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยแต่ละหัวของคาโทดติดตั้งเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและแกรไฟต์ พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สสปัตเตอร์ซึ่งการจ่ายแก๊สอาร์กอนในกระบวนการเคลือบ ถูกควบคุมด้วย Mass flow controller รุ่น 825 Series B (Edwards corporation)



ภาพที่ 3-1 เครื่องเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอริงที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 3-2 โดอะแกรมของเครื่องเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศระบบ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอริง

### 3.3 การสร้างสถานะสุญญากาศ

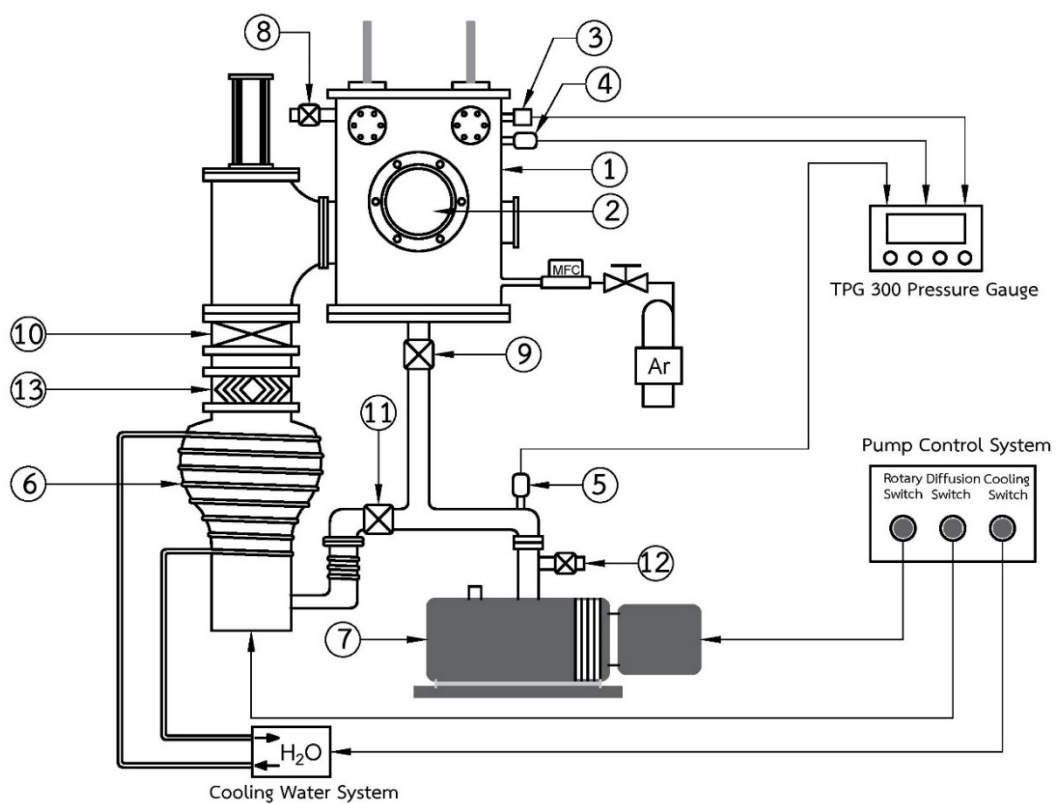
การเคลือบฟิล์มในภาชนะสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง จำเป็นต้องลดความดันในห้องเคลือบให้อยู่ในสถานะสุญญากาศที่ระดับสุญญากาศสูง โดยมีความดันประมาณ  $10^{-3} - 10^{-5}$  mbar เพื่อลดการปนเปื้อนของฟิล์มที่เคลือบได้เนื่องจากการคงค้างของแก๊สในภาชนะสุญญากาศ (Residual gas) โดยการสร้างสถานะสุญญากาศใช้ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศประกอบด้วย เครื่องสูบบแบบแพร์ไอ หนุนหลังด้วยเครื่องสูบลโรตารี ที่ต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศด้วยท่อและมีวาล์วควบคุมการปิด-เปิด แสดงดังในภาพที่ 3-3 โดยการสร้างสถานะสุญญากาศในช่วงแรกใช้เครื่องสูบลโรตารีเพื่อลดความดันในภาชนะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศไปที่ความดันประมาณ  $10^{-2}$  mbar จากนั้นจึงใช้เครื่องสูบบแบบแพร์ไอลดความดันต่อจาก  $10^{-2}$  mbar ให้อยู่ในช่วงความดัน  $10^{-5}$  mbar

สำหรับขั้นตอนการสร้างภาวะสุญญากาศมีดังนี้

1. ตรวจสอบวาล์วหยาบ (หมายเลข 9) วาล์วท้าย (หมายเลข 11) และวาล์วสุญญากาศสูง (หมายเลข 10) ให้อยู่ในสภาพปิดทั้งหมด
2. เปิดสวิตช์หลัก เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบต่าง ๆ ของเครื่อง เช่น ระบบวัดความดันและระบบควบคุมการทำงานของระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ เป็นต้น หลังจากนั้นเปิดสวิตช์ Rotary เพื่อให้เครื่องสูบลโรตารี (หมายเลข 7) ทำงาน
3. สูบอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ โดยใช้เครื่องสูบลโรตารี โดยเปิดวาล์วท้าย เพื่อให้เครื่องสูบลโรตารีสูบอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ (หมายเลข 6) จนความดันในเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ เมื่ออ่านจากพิรานีเกจ (หมายเลข 4) มีค่าน้อยกว่า  $10^{-2}$  mbar ซึ่งเป็นความดันที่เครื่องสูบบแบบแพร์ไอสามารถทำงานได้ พร้อมทั้งเปิดสวิตช์ Diffusion เพื่อให้ตัวทำความร้อนของเครื่องสูบบแบบแพร์ไอทำงาน เพื่อเป็นการเริ่มต้มน้ำมันซึ่งใช้เวลาประมาณ 20 นาที
4. ระหว่างการต้มน้ำมัน ให้นำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบวางในภาชนะสุญญากาศ โดยก่อนวางวัสดุรองรับต้องตรวจความดันในภาชนะสุญญากาศยังคงอยู่ในสถานะเป็นสุญญากาศหรือไม่ ถ้ายังเป็นสุญญากาศก็ทำการเปิดวาล์วปล่อย เพื่อให้อากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศจนความดันในภาชนะสุญญากาศเท่ากับความดันบรรยากาศ หลังจากนั้นทำการเปิดฝาครอบภาชนะสุญญากาศออก นำวัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบไปวาง แล้วปิดฝาครอบและปิดวาล์วปล่อยให้สนิท
5. สร้างสถานะสุญญากาศขั้นต้นในภาชนะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบลโรตารี โดยการปิดวาล์วท้าย แล้วเปิดวาล์วหยาบเพื่อให้เครื่องสูบลโรตารีสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศจนความดันในภาชนะสุญญากาศ มีค่าประมาณ  $10^{-2}$  mbar เมื่ออ่านความดันจากมาตรวัดความดันแบบช่วงกว้าง (หมายเลข 3)

6. เมื่อต้มน้ำมันจนครบ 20 นาที ทำการสร้างสภาวะสุญญากาศสูงในภาชนะสุญญากาศด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยปิดวาล์วหยาบแล้วเปิดวาล์วห้าย หลังจากนั้นเปิดวาล์วสุญญากาศสูงเพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อทำความดันในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับสภาวะสุญญากาศสูง ซึ่งอยู่ในช่วง  $10^{-5} - 10^{-6}$  mbar

7. จับเวลาและรอจนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ  $3 \times 10^{-5}$  mbar ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความดันพื้น ( $P_b$ ) ก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางต่อไป



ภาพที่ 3-3 ไดอะแกรมระบบเครื่องสูบสุญญากาศของระบบเคลือบสปีดเตอริง

- |                                             |                                           |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber)           | 2. หน้าต่าง (Window)                      |
| 3. มาตรวัดความดันแบบเพนนิ่ง (Penning gauge) | 4. มาตรวัดความดันแบบพิรานี (Pirani gauge) |
| 5. มาตรวัดความดันแบบพิรานี (Pirani gauge)   | 6. เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump)  |
| 7. เครื่องสูบบกลโรตารี (Rotary pump)        | 8. วาล์วปล่อย (Vent valve)                |
| 9. วาล์วหยาบ (Roughing valve)               | 10. วาล์วสุญญากาศสูง (High vacuum valve)  |
| 11. วาล์วห้าย (Backing valve)               | 12. วาล์วปล่อย (Vent valve)               |
| 13. แบริล (Baffle)                          |                                           |

### 3.4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การสร้างสภาวะสุญญากาศ : เริ่มจากนำวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบวางในห้องเคลือบ โดยวางบนแท่นวางชิ้นงานซึ่งสามารถปรับระยะห่างของวัสดุรองรับให้ห่างจากหน้าเป้าสารเคลือบ ( $d_{s-t}$ ) ได้ตามต้องการ จากนั้นเป็นการสร้างสภาวะสุญญากาศโดยลดความดันภายในห้องเคลือบให้ได้ความดันพื้น ( $P_b$ ) เท่ากับ  $5 \times 10^{-5}$  mbar

2. การทำความสะอาดหน้าเป้า : ขั้นตอนนี้จะเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าเป้าสารเคลือบโดยวิธี pre-sputtering ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอนก่อนการเคลือบจริง โดยเลื่อนแผ่นบัง (Shutter) มากั้นระหว่างวัสดุรองรับและเป้าสารเคลือบ เพื่อไม่ให้สารเคลือบที่หลุดออกจากหน้าเป้าขณะทำ pre-sputtering ตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

3. การเคลือบฟิล์มบาง : ขั้นนี้เป็นการเคลือบชิ้นงานตามที่ต้องการภายหลังการทำความสะอาดสะอาดหน้าเป้าสารเคลือบโดยการ pre-sputtering แล้ว โดยเริ่มจากการป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ห้องเคลือบ จากนั้นจึงจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้แก่เป้าสารเคลือบ เพื่อสร้างสารเคลือบจากกระบวนการโกลด์ดิซชาร์จ (แผ่นบังยังปิดอยู่ ปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบตามเงื่อนไขในการทดลอง) เมื่อความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เป้าสารเคลือบไม่เปลี่ยนแปลงจึงเริ่มการเคลือบฟิล์มบางโดยเลื่อนแผ่นบังที่ปิดหน้าเป้าสารเคลือบออก เพื่อเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุรองรับ พร้อมบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I) ค่าศักย์ไฟฟ้า (V) และค่าความดันรวม ( $P_t$ ) ขณะเคลือบ หลังเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์มตามระยะเวลาที่กำหนด (t) ปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ปิดการจ่ายแก๊สที่ใช้เคลือบ ปิดวาล์วสุญญากาศสูง แล้วปล่อยอากาศเข้าภาชนะสุญญากาศ เพื่อนำชิ้นงานที่ได้ ออก

4. การวิเคราะห์ฟิล์มบางเบื้องต้น : ขั้นนี้เป็นนำชิ้นงานที่เคลือบแล้วออกจากเครื่องเคลือบ แล้วพิจารณาลักษณะทางกายภาพและสีของฟิล์มที่เคลือบได้ด้วยตาเปล่าก่อนส่งไปวิเคราะห์เพื่อหาสมบัติทางกายภาพด้านอื่นๆ ต่อไป

### 3.5 แนวทางการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนวัสดุรองรับ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ จากนั้นนำฟิล์มที่เคลือบได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้านอื่นๆ โดยผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง ซึ่งแต่ละการทดลองมีวิธีการทดลองดังนี้

**การทดลองที่ 1** การศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์  
**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาผลปริมาณของไทเทเนียมและออกไซด์ในเนื้อฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์ต่างๆ โดยขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์บนวัสดุรองรับ 2 ชนิด ซึ่งแปรค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์ในกระบวนการเคลือบ เพื่อศึกษาผลปริมาณของไทเทเนียมและออกไซด์ในเนื้อฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-1 และ 3-2

2. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ ขั้นตอนนี้เป็น การนำฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ที่กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์ต่างๆ มาศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการเปียก และความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ตารางที่ 3-1 เงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์ต่างๆ

เงื่อนไข	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	ไทเทเนียมและออกไซด์
วัสดุรองรับ	แผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีล
ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ	13 cm
ความดันพื้น	$5.0 \times 10^{-5}$ mbar
ความดันรวมขณะเคลือบ	$3.5 \times 10^{-3}$ mbar
ความหนาของฟิล์มในการเคลือบ	ประมาณ 700 nm
กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียม	400 mA ถึง 800 mA
กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์	300 mA ถึง 600 mA

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม (R)

เงื่อนไขของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบ		R
อลูมิเนียม (mA)	ไทเทเนียม (mA)	
300	800	0.375
300	600	0.5
400	400	1.0
600	400	1.5

## การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของความดันรวมขณะเคลือบ

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาผลของความดันรวมขณะเคลือบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ สำหรับขั้นตอนนี้เป็น การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์บนแผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีลโดยแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบ เพื่อศึกษาผลของความดันรวมขณะเคลือบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-3

2. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยขั้นตอนนี้เป็น การนำฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ มาศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการเปียก และ ความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

เงื่อนไข	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	ไทเทเนียมและอลูมิเนียม
วัสดุรองรับ	แผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีล
ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ	13 cm
ความดันพื้น	$5.0 \times 10^{-5}$ mbar
กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียม	400 mA
กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียม	600 mA
เวลาในการเคลือบ	30 min
ความดันรวมขณะเคลือบ	$3.0 \times 10^{-3}$ mbar ถึง $6.0 \times 10^{-3}$ mbar



### การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาผลของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีลโดยแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ เพื่อศึกษาผลของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-4

2. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ โดยขั้นตอนนี้เป็นกรนำฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ มาศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการเปียก และความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ตารางที่ 3-4 เงื่อนไขของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

เงื่อนไข	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	ไทเทเนียมและออกไซด์
วัสดุรองรับ	แผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสสตีล
ความดันพื้น	$5.0 \times 10^{-5}$ mbar
ความดันรวมขณะเคลือบ	$3.5 \times 10^{-3}$ mbar
กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียม	400 mA
กระแสไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์	600 mA
เวลาในการเคลือบ	30 min
ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ	12 cm, 14 cm และ 16 cm

### 3.6 การทดสอบความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

การทดสอบความสามารถในการเปียกด้วยการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีล ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Contact angle meter ซึ่งการทดสอบนั้นทำได้โดยการหยดน้ำที่ปราศจากไอออนปริมาตร 20  $\mu\text{l}$  บนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ และใช้โปรแกรม Hotviewer ทำการถ่ายภาพและวัดมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์ม

### 3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

การทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Potentiostat ของ Autolab รุ่น PGSTAT 302N โดยทำการทดสอบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.5wt% ในการศึกษาการกัดกร่อนใช้ระบบขั้วอิเล็กโทรดแบบ 3 ขั้ว ประกอบไปด้วย (1) ขั้วอ้างอิง (Reference electrode) ใช้เป็น Ag/AgCl (2) ขั้วตรงข้าม (Counter electrode) ใช้เป็นแพลทินัม และ (3) ขั้วทำงาน (Working electrode) ใช้เป็นฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีล โดยใช้พื้นที่ผิวของฟิล์มขนาดประมาณ 1  $\text{cm}^2$  สำหรับทำการทดสอบการกัดกร่อนกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิห้อง และใช้ศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบจากศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit potential; OCP) ในช่วงระหว่าง -1.2 V ถึง +1.4 V ในอัตราการสแกนเท่ากับ 2.25 mV/s จากนั้นนำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนมาสร้างเส้นโค้งโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization curves) และใช้วิธี Tafel extrapolation คำนวณหาพารามิเตอร์การกัดกร่อน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

## บทที่ 4

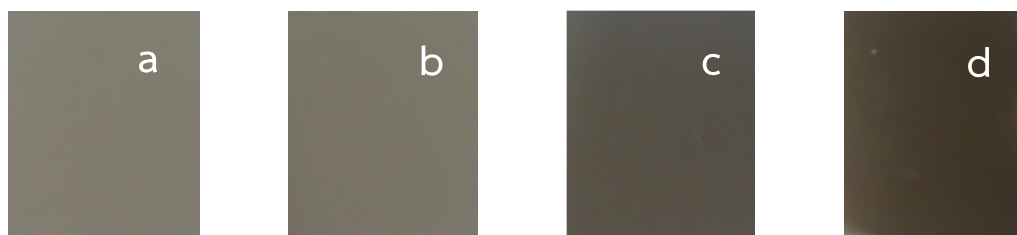
### ผลและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียม

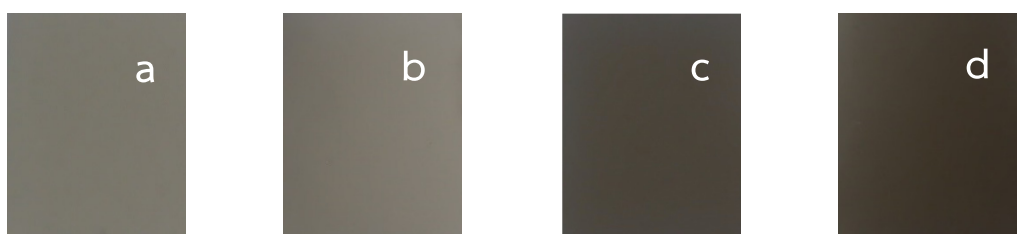
ส่วนนี้เป็นผลการศึกษาของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียมสำหรับใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์บนวัสดุรองรับ 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นซิลิกอน และแผ่นสแตนเลสสตีล เพื่อพิจารณาถึงปริมาณของไทเทเนียมและอลูมิเนียมในเนื้อฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยให้ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบ (ทั้งไทเทเนียมและอลูมิเนียม) ถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 13 cm ความดันพื้นเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-5}$  mbar ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-3}$  mbar ความหนาของฟิล์มในการเคลือบประมาณ 700 nm และแปรค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม (R) เท่ากับ 0.375, 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้ประกอบด้วย ลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความสามารถในการเปียก และ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอน และแผ่นสแตนเลสสตีล โดยแปรค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ เมื่อสังเกตฟิล์มที่เคลือบได้ด้วยตาเปล่าที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 บนแผ่นซิลิกอนดังภาพที่ 4-1 (a) และ (b) และแผ่นสแตนเลสสตีลดังภาพที่ 4-2 (a) และ (b) พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดเป็นสีเทา ส่วนฟิล์มที่เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 บนแผ่นซิลิกอนดังภาพที่ 4-1 (c) และ (d) และแผ่นสแตนเลสสตีลดังภาพที่ 4-2 (c) และ (d) พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดเป็นสีเทาดำ ซึ่งลักษณะสีของฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม



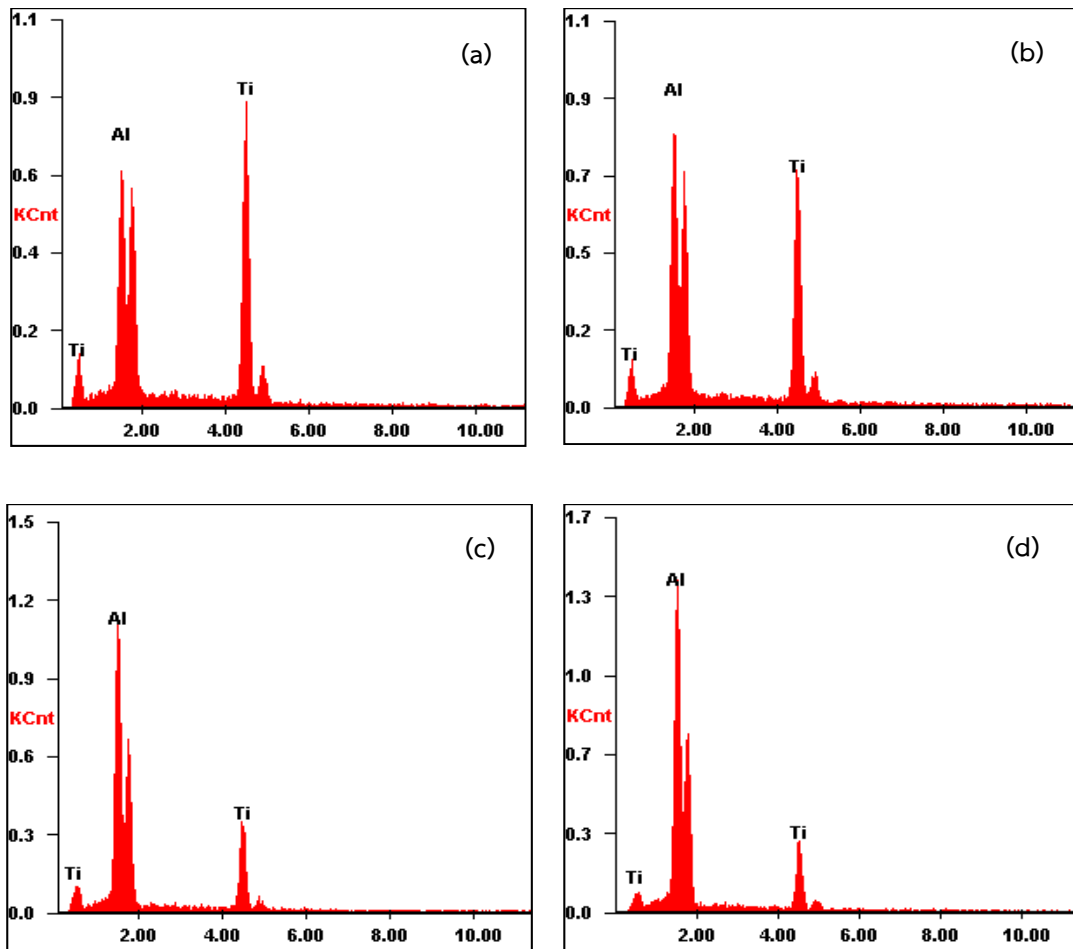
ภาพที่ 4-1 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5



ภาพที่ 4-2 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5

#### 4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

ภาพที่ 4-3 แสดงสเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX โดยฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบได้ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ พบว่ามีลักษณะของสเปกตรัมที่เหมือนกันซึ่งเป็นการยืนยันว่าองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มประกอบด้วยธาตุไทเทเนียมและออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ซึ่งเมื่อแปรค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมจาก 0.375 ถึง 1.5 พบว่าองค์ประกอบธาตุในฟิล์มมีปริมาณของออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 41.17% เป็น 76.60% และปริมาณของไทเทเนียมลดลงจาก 58.83% เป็น 23.40%



ภาพที่ 4-3 สเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ

อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับ เป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียม	ปริมาณของธาตุ (at%)		อัตราส่วน Al/Ti
	Al	Ti	
0.375	41.17	58.83	0.70
0.5	49.34	50.66	0.97
1.0	70.13	29.87	2.35
1.5	76.60	23.40	3.27

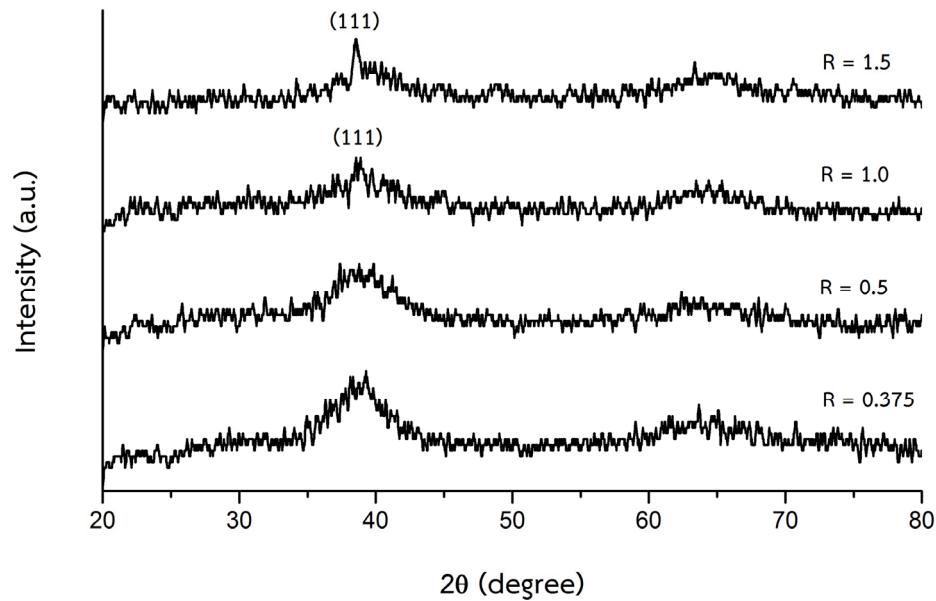
จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณไทเทเนียมและอลูมิเนียมในฟิล์มมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม โดยค่าสputtering yields ของอะตอมอลูมิเนียมมีค่าเป็นสองเท่าของอะตอมไทเทเนียม ที่กระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียมค่าเดียวกัน (Takeda, & Nakajima, 1998; Padmaprabu et al., 2000) ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีการหลุดออกของอะตอมอลูมิเนียมจากเป้าสารเคลือบสูงขึ้น เป็นผลให้มีปริมาณของธาตุอลูมิเนียมในฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งฟิล์มที่เคลือบได้พบว่าอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมในฟิล์ม (Al/Ti) เพิ่มขึ้นจาก 0.70 เป็น 3.27 เมื่ออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเพิ่มขึ้นจาก 0.375 เป็น 1.5 ดังแสดงในตารางที่ 4-1

#### 4.1.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ภาพที่ 4-4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ จากผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 พบว่าเกิดพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความกว้างของมุม  $2\theta$  อยู่ในช่วงระหว่าง  $35^\circ$  ถึง  $45^\circ$  ซึ่งแสดงถึงว่าฟิล์มมีลักษณะของโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Senkov, Uchic, Menon, & Miracle, 2002; Zhang et al., 2013) แต่เมื่ออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.0 และ 1.5 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ซึ่งเป็นเฟส  $\gamma$ -TiAl ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111) ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 65-5414

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่าโครงสร้างของฟิล์มมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม โดยเมื่อการเคลือบฟิล์มใช้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 ทำให้พลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบมีค่าน้อย ซึ่งไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับได้ (Surface mobility) ส่งผลให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน

แต่เมื่อการเคลือบฟิล์มใช้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 พลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบมีค่ามาก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับ ส่งผลให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างแบบผลึก (Padmaprabu et al., 2000)

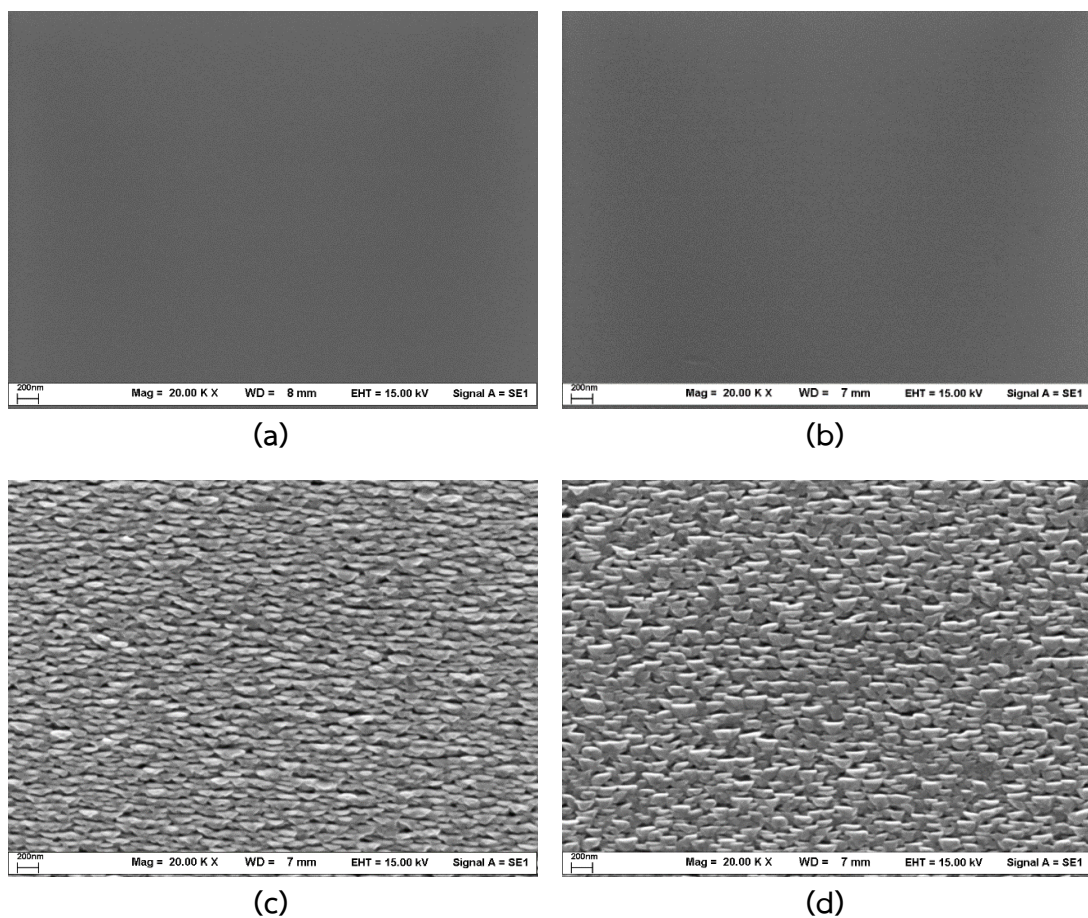


ภาพที่ 4-4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ

#### 4.1.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

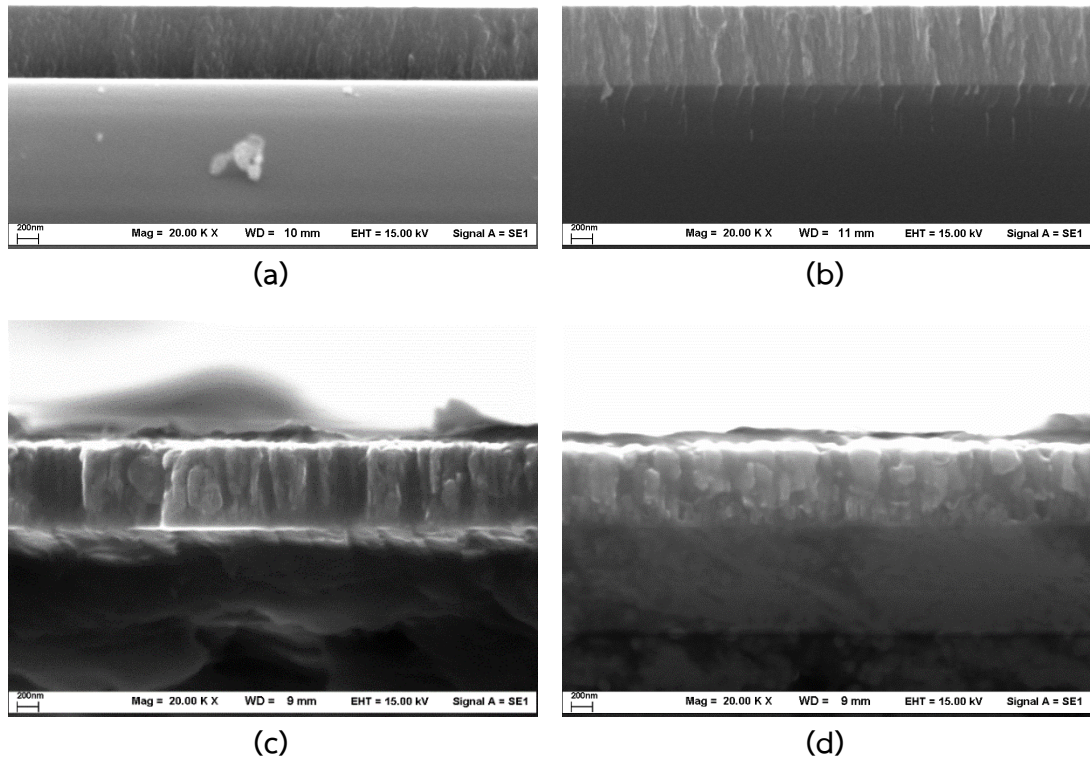
ภาพที่ 4-5 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM โดยที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและไม่มีเกรนเกิดขึ้น ดังภาพที่ 4-5 (a) และ (b) และที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่มีความหยาบเนื่องจากเกิดเกรนที่มีรูปร่างเรียวยาวแหลมจำนวนมากกระจายทั่วพื้นผิวของฟิล์ม และฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.5 มีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0

ดังภาพที่ 4-5 (c) และ (d) ในการหาความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยภาคตัดขวางของฟิล์มจากการวิเคราะห์เทคนิค SEM ดังภาพที่ 4-6 พบว่าความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบทั้งหมดที่เคลือบได้มีค่าใกล้เคียงกับความหนา 700 nm ซึ่งความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้อยู่ในช่วงระหว่าง 680 nm ถึง 740 nm โดยตารางที่ 4-2 แสดงความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ



ภาพที่ 4-5 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5





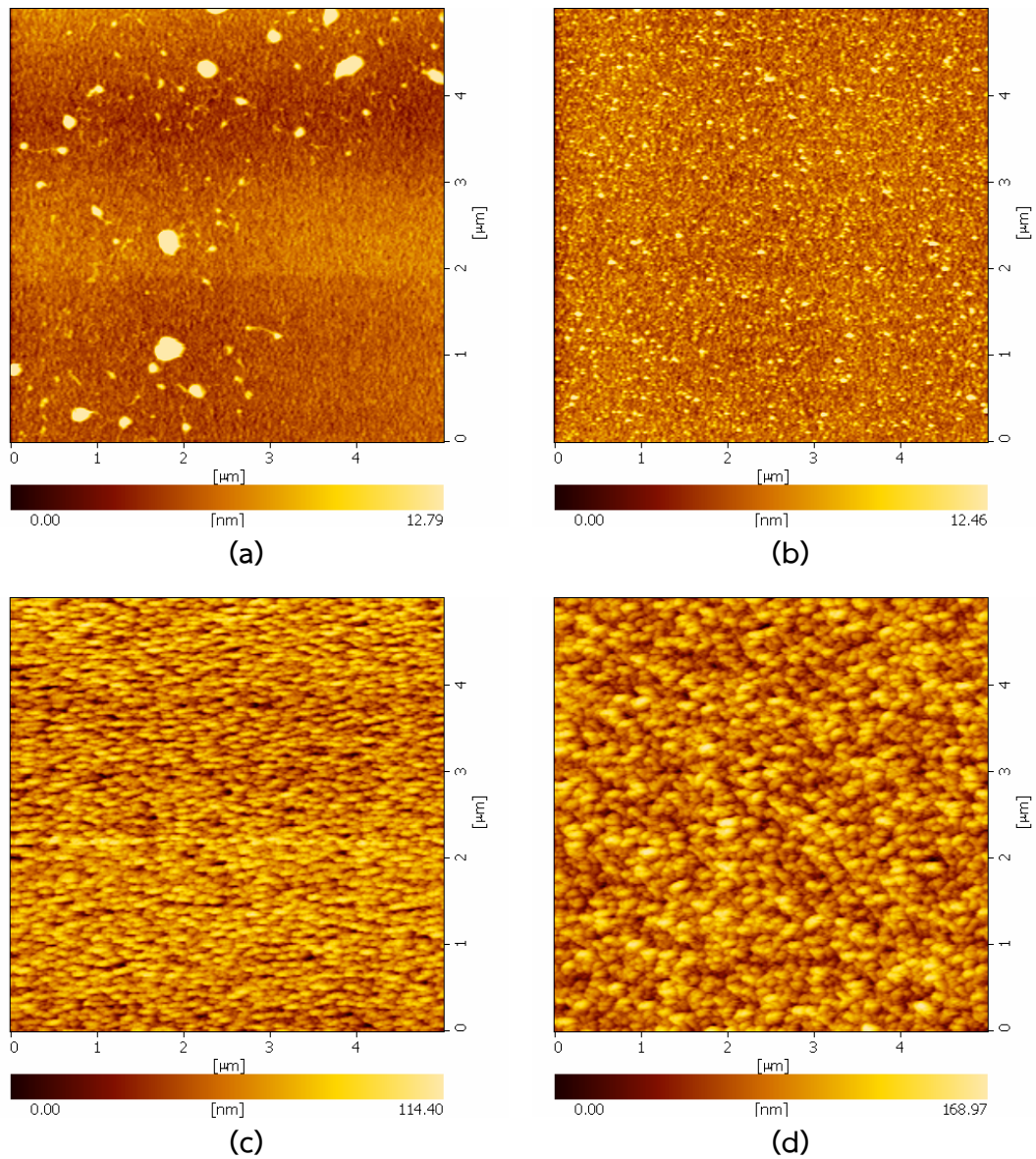
ภาพที่ 4-6 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5

ตารางที่ 4-2 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ

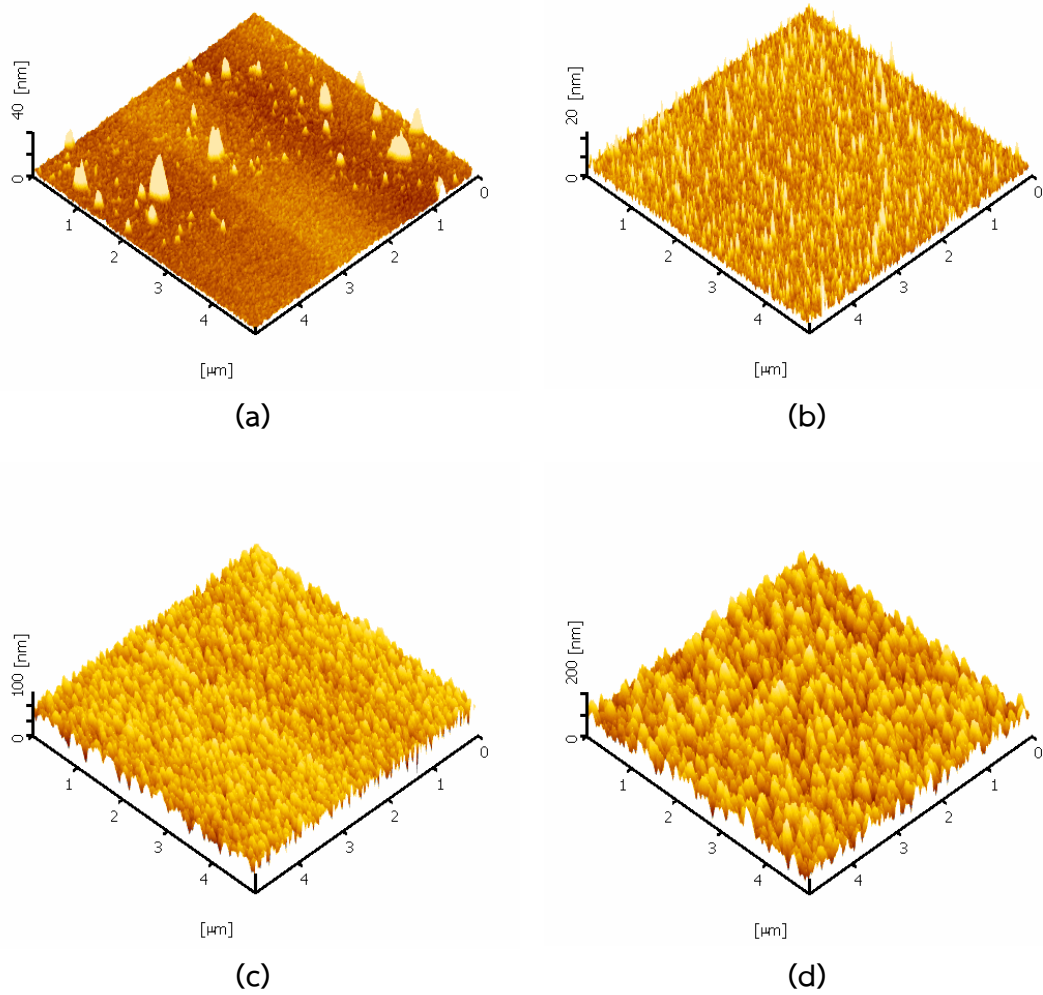
อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียม	ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม (nm)
0.375	680
0.5	740
1.0	710
1.5	700

ภาพที่ 4-7 และ 4-8 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ จากเทคนิค AFM แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM พบว่ามีผลตรงกันกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM โดยที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 พื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีลักษณะค่อนข้างเรียบ ความหยาบผิวของฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 มีค่าเป็น 2.12 และ 1.86 nm ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 พบว่าฟิล์มมีความหยาบผิวมากขึ้นเนื่องจากการเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมจำนวนมาก ความหยาบผิวของฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 มีค่าเป็น 18.67 และ 27.61 nm ตามลำดับ โดยฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.5 มีความหยาบผิวมากกว่าฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 เนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (RMS) ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 4-3

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM และ AFM แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค XRD กล่าวคือ เมื่อใช้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 ในการเคลือบฟิล์ม ทำให้เกิดการรวมกันของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับเพียงเล็กน้อย ซึ่งการรวมกันนี้ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐานและฟิล์มที่ได้จากเงื่อนไขการเคลือบนี้มีลักษณะผิวที่เรียบและไม่เกิดเกรนของฟิล์มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ทำให้อะตอมของสารเคลือบเกิดการรวมกันบนวัสดุรองรับได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดเป็นฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างแบบผลึก ซึ่งฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้นั้นมีความหยาบผิวและเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมจำนวนมาก



ภาพที่ 4-7 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5



ภาพที่ 4-8 ลักษณะพื้นผิวแบบ 3 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5

ตารางที่ 4-3 ความหยาบผิวเฉลี่ยของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ

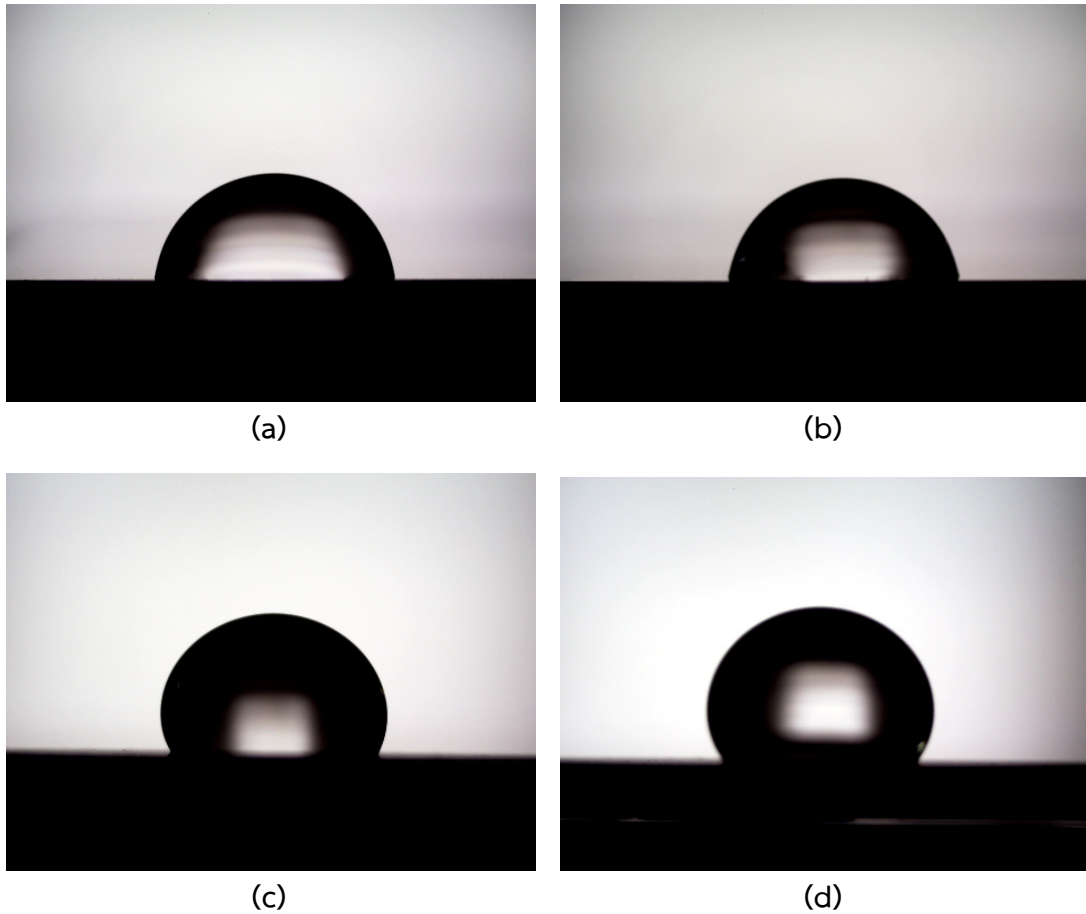
อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียม	ความหยาบผิวเฉลี่ยของฟิล์ม (nm)
0.375	2.12
0.5	1.86
1.0	18.67
1.5	27.61

#### 4.1.5 ความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบ

ภาพที่ 4-9 แสดงภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลในอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ โดยเมื่อพิจารณามุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดจากภาพถ่าย ดังในตารางที่ 4-4 พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 มุมสัมผัสของหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่าเท่ากับ  $76.4^{\circ}$  และ  $74.2^{\circ}$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีสมบัติความชอบน้ำ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม พบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่าเท่ากับ  $111.3^{\circ}$  และ  $116.3^{\circ}$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยมุมสัมผัสของหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มที่เคลือบได้จากเงื่อนไวดังกล่าวนี้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียม

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเปียกด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM และ AFM กล่าวคือ ลักษณะพื้นผิวที่เรียบของฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 ทำให้หยดน้ำเกิดการกระจายตัวบนฟิล์มเนื่องจากความโน้มถ่วงโลก ส่งผลให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีสมบัติความชอบน้ำ ในขณะที่ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 เกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมจำนวนมากกระจายทั่วพื้นผิว

ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหยาดผิวของฟิล์ม จนนำไปสู่การลดลงของพื้นที่สัมผัสระหว่างหยดน้ำและฟิล์ม ทำให้มุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เคลือบได้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Li, Pan, Fu, Zhou, & Guo, 2019)



ภาพที่ 4-9 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ (a) 0.375, (b) 0.5, (c) 1.0 และ (d) 1.5

ตารางที่ 4-4 มุมสัมผัสน้ำเกลือบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ

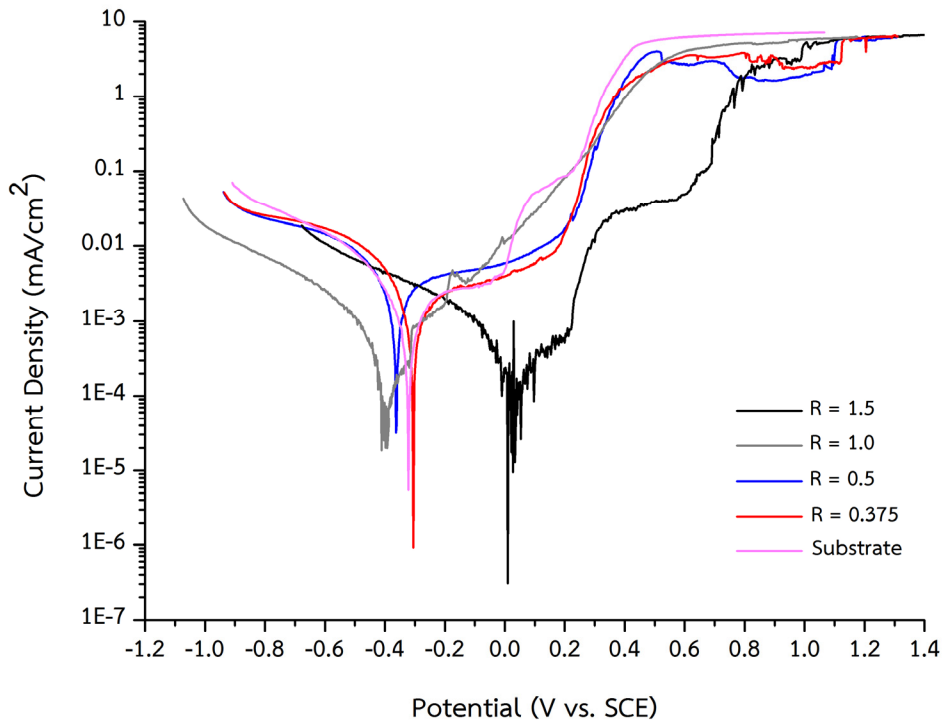
อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียม	มุมสัมผัสน้ำเกลือ (องศา)
0.375	76.4
0.5	74.2
1.0	111.3
1.5	116.3

#### 4.1.6 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่น

ในการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลในอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวของฟิล์มที่ทดสอบ  $1 \text{ cm}^2$  สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt% ที่อุณหภูมิห้อง ภาพที่ 4-10 แสดงเส้นโค้งโพเทนชิโวลอจิมิตรีเซชันของแผ่นสแตนเลสสตีลและฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt% โดยพารามิเตอร์การกัดกร่อน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (CR) ที่ได้จากวิธี Tafel extrapolation ของเส้นโค้งโพเทนชิโวลอจิมิตรีเซชัน แสดงในตารางที่ 4-5

จากผลการวิเคราะห์การกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ พบว่าฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.043280 mm/year และ 0.048640 mm/year ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.007773 mm/year และ 0.005379 mm/year ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสสตีลเปล่าที่มีค่าเท่ากับ

0.026265 mm/year แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี



ภาพที่ 4-10 เส้นโค้งโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันของแผ่นสแตนเลสสตีลและฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt%

ตารางที่ 4-5 พารามิเตอร์การกัดกร่อนที่คำนวณจากวิธี Tafel extrapolation ของแผ่นสแตนเลสสตีลและฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ

ตัวอย่าง	$E_{\text{corr}}$ (V)	$I_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	CR (mm/year)
Substrate	-0.32176	$2.26 \times 10^{-3}$	0.026265
R = 0.375	-0.30553	$3.77 \times 10^{-3}$	0.043280
R = 0.5	-0.36406	$4.19 \times 10^{-3}$	0.048640
R = 1.0	-0.41164	$6.69 \times 10^{-4}$	0.007773
R = 1.5	0.02660	$4.63 \times 10^{-4}$	0.005379



โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเป่าสารเคลือบ อลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีคือสมบัติความไม่ชอบน้ำ เนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มที่มีลักษณะความไม่ชอบน้ำมีความสามารถในการดักจับกับอากาศและเกิดเป็นชั้นฟิล์มของอากาศบนฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งช่วยป้องกันพื้นผิวของฟิล์มจากการเข้ามาของไอออนคลอไรด์ในสารละลายโซเดียมความเข้มข้น 3.5 wt% โดยการเพิ่มขึ้นของความไม่ชอบน้ำของฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย (Li, Pan, Fu, Zhou, & Guo, 2019)

จากผลการทดลองของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป่าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียมสำหรับใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยแปรค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงปริมาณของไทเทเนียมและอลูมิเนียมในเนื้อฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ สรุปได้ว่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 4.2 และ 4.3 คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ด้วยอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.5 (จากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมเท่ากับ 600 mA และกระแสไฟฟ้าจ่ายให้เป่าสารเคลือบไทเทเนียมเท่ากับ 400 mA) เนื่องจากฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.5 มีพารามิเตอร์การกัดกร่อนที่ดีที่สุดจากเงื่อนไขอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.02660 V ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนน้อยที่สุดเท่ากับ  $4.63 \times 10^{-4}$  mA/cm<sup>2</sup> และอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.005379 mm/year ซึ่งแสดงถึงฟิล์มมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีที่สุด

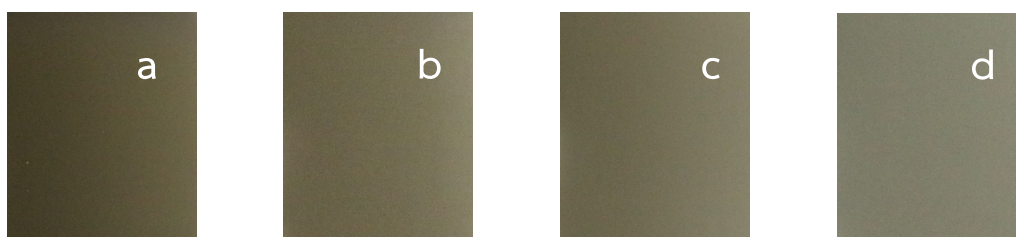
## 4.2 ผลของความดันรวมขณะเคลือบ

ส่วนนี้เป็นผลการศึกษาของความดันรวมขณะเคลือบสำหรับใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์บนวัสดุรองรับ 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นซิลิกอน และแผ่นสแตนเลสสตีล ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยกำหนดให้ระยะห่างจากเป่าสารเคลือบ (ทั้งไทเทเนียมและอลูมิเนียม) ถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 13 cm ความดันพื้นเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-5}$  mbar กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมเท่ากับ 600 mA กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบไทเทเนียมเท่ากับ 400 mA เวลาในการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 30 นาที และ

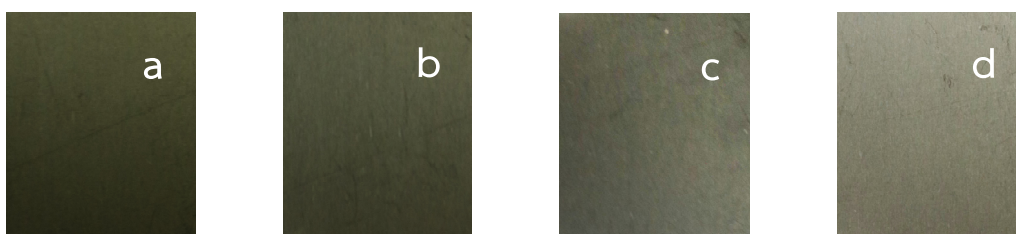
แปรค่าความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar,  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar,  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้ประกอบด้วย ลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความสามารถในการเปียก และความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ ดังต่อไปนี้

#### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอน และแผ่นสแตนเลสสตีล โดยแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ เมื่อสังเกตฟิล์มที่เคลือบได้ด้วยตาเปล่าที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar,  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar บนแผ่นซิลิกอนดังภาพที่ 4-11 (a) ถึง (c) และแผ่นสแตนเลสสตีลดังภาพที่ 4-12 (a) ถึง (c) พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดเป็นสีเทาเข้ม ส่วนฟิล์มที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar บนแผ่นซิลิกอนดังภาพที่ 4-11 (d) และแผ่นสแตนเลสสตีลดังภาพที่ 4-12 (d) พบว่าฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบได้เป็นสีเทา ซึ่งลักษณะสีของฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความดันรวมขณะเคลือบ



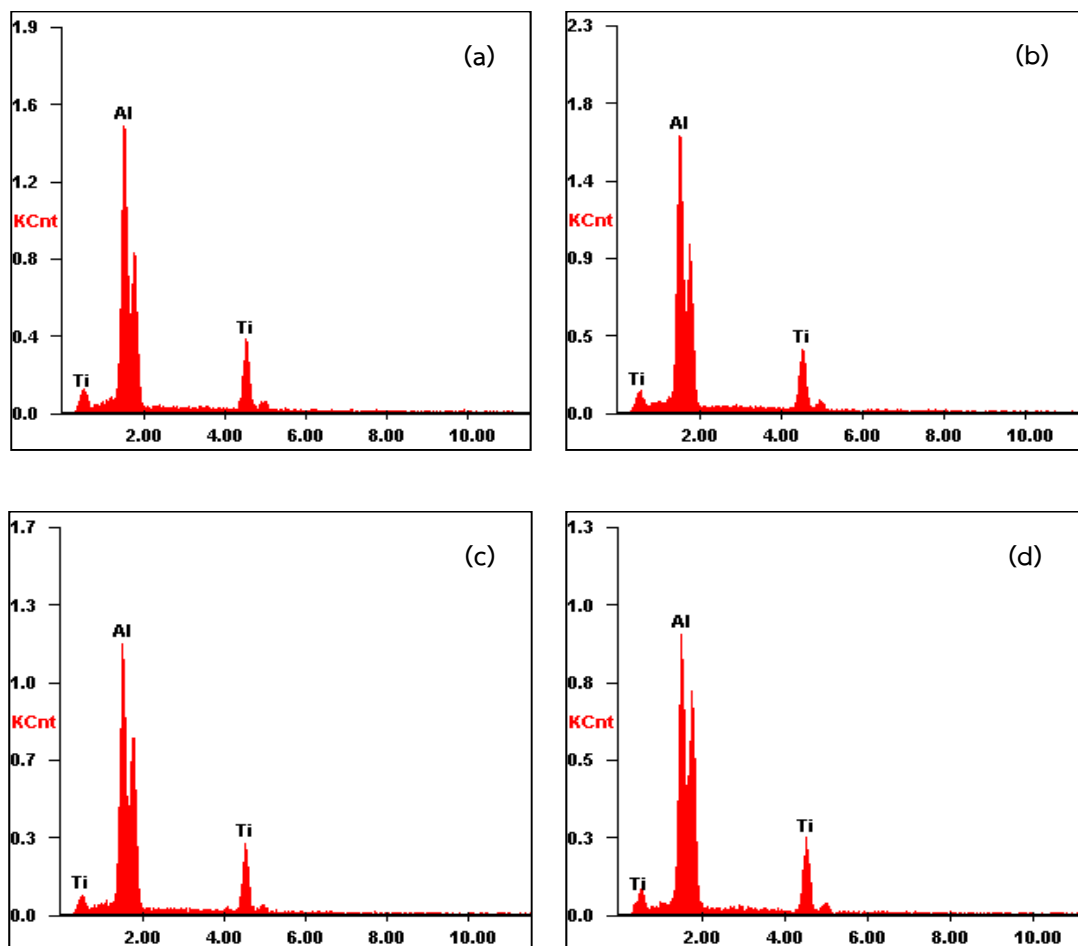
ภาพที่ 4-11 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar



ภาพที่ 4-12 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar

#### 4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ภาพที่ 4-13 แสดงสเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX โดยฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบได้ภายใต้เงื่อนไขความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ พบว่ามีลักษณะของสเปกตรัมที่เหมือนกันซึ่งเป็นการยืนยันว่าองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มประกอบด้วยธาตุไทเทเนียมและอลูมิเนียม โดยปริมาณของธาตุไทเทเนียมและอลูมิเนียม รวมถึงอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมในฟิล์มที่เคลือบได้จากการแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบตั้งแต่  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar แสดงดังในตารางที่ 4-6 ซึ่งพบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้ที่ความดันขณะเคลือบต่างๆ มีปริมาณของธาตุอลูมิเนียมและไทเทเนียม และอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4-13 สเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar

ตารางที่ 4-6 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

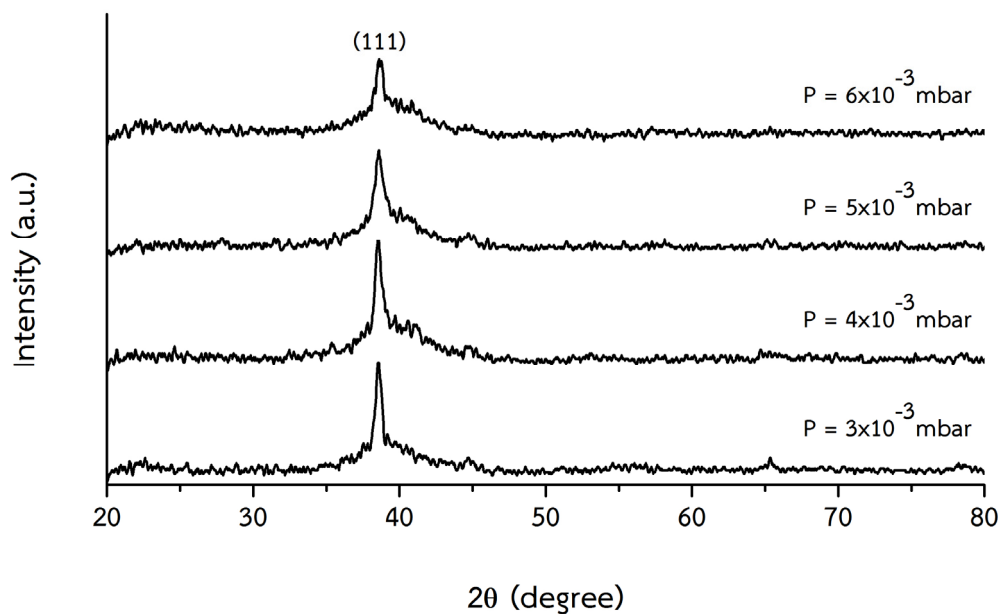
ความดันรวมขณะเคลือบ (mbar)	ปริมาณของธาตุ (at%)		อัตราส่วน Al/Ti
	Al	Ti	
$3.0 \times 10^{-3}$	74.17	25.83	2.87
$4.0 \times 10^{-3}$	75.07	24.93	3.01
$5.0 \times 10^{-3}$	74.54	25.46	2.92
$6.0 \times 10^{-3}$	73.34	26.66	2.75

โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ จากฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ ของการทดลองที่ 1 กับฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ของการทดลองที่ 2 พบว่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมมีอิทธิพลต่อพลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบมากกว่าความดันรวมขณะเคลือบ จึงทำให้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเป็นพารามิเตอร์ในการเคลือบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุไทเทเนียมและอลูมิเนียมในฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

#### 4.2.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ภาพที่ 4-14 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ จากผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มที่เคลือบได้จากการแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบตั้งแต่  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ซึ่งเป็นเฟส  $\gamma$ -TiAl ที่มีมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111) ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 65-5414 โดยเมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบตั้งแต่  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar ขึ้นไปในการเคลือบฟิล์ม พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้มีความเป็นผลึกลดลง ในการหาขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ซึ่งขนาดผลึกของฟิล์มคำนวณได้จากสมการของ Scherrer จากตารางที่ 4-7 แสดงขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ พบว่าขนาดผลึกของฟิล์มที่ระนาบผลึก (111) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันรวมขณะเคลือบ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ สามารถอธิบายถึงการลดลงความเป็นผลึกและขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้จากเงื่อนไขของความดันรวมขณะเคลือบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันรวมขณะเคลือบที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะปลอดการชนเฉลี่ยของไอออนอาร์กอนมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของพลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบ ทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีความเป็นผลึกและขนาดผลึกลดลง (Wei et al, 2015)



ภาพที่ 4-14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

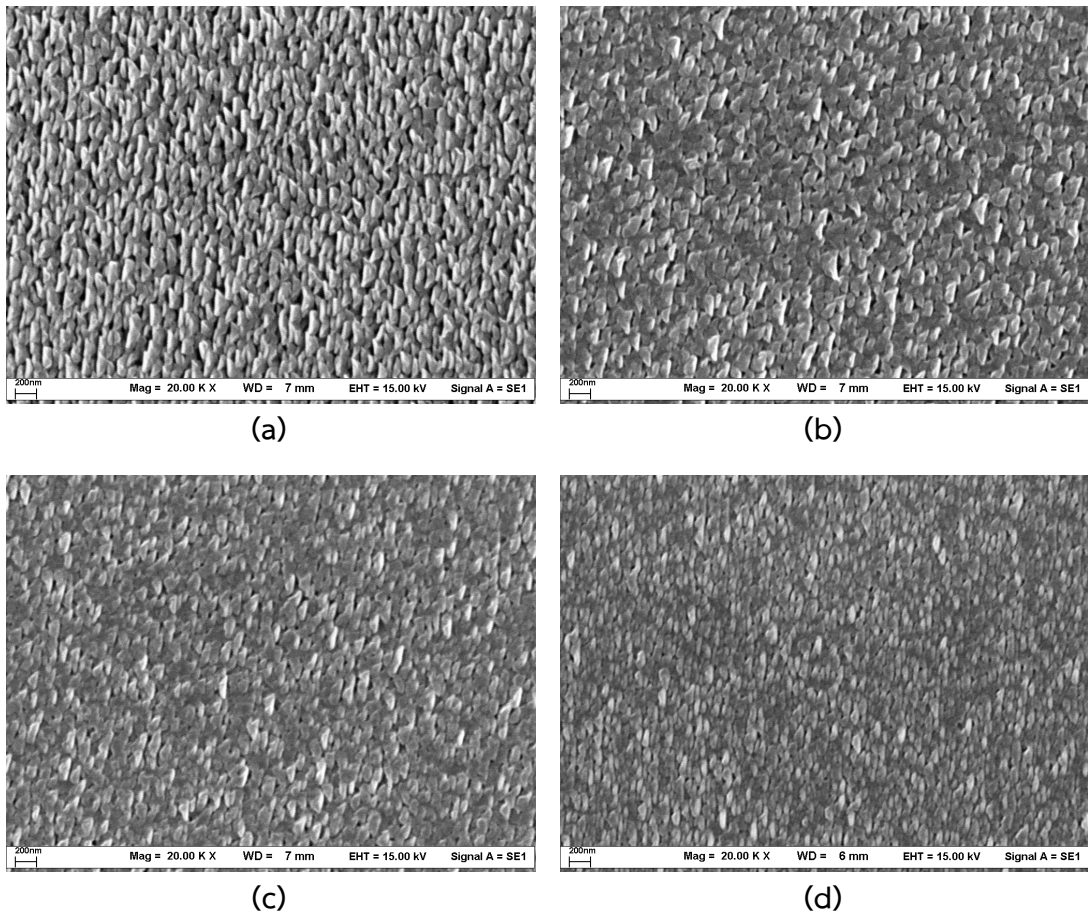
ตารางที่ 4-7 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

ความดันรวมขณะเคลือบ (mbar)	ขนาดผลึกของฟิล์ม (nm)
$3.0 \times 10^{-3}$	27.03
$4.0 \times 10^{-3}$	22.95
$5.0 \times 10^{-3}$	18.24
$6.0 \times 10^{-3}$	16.09

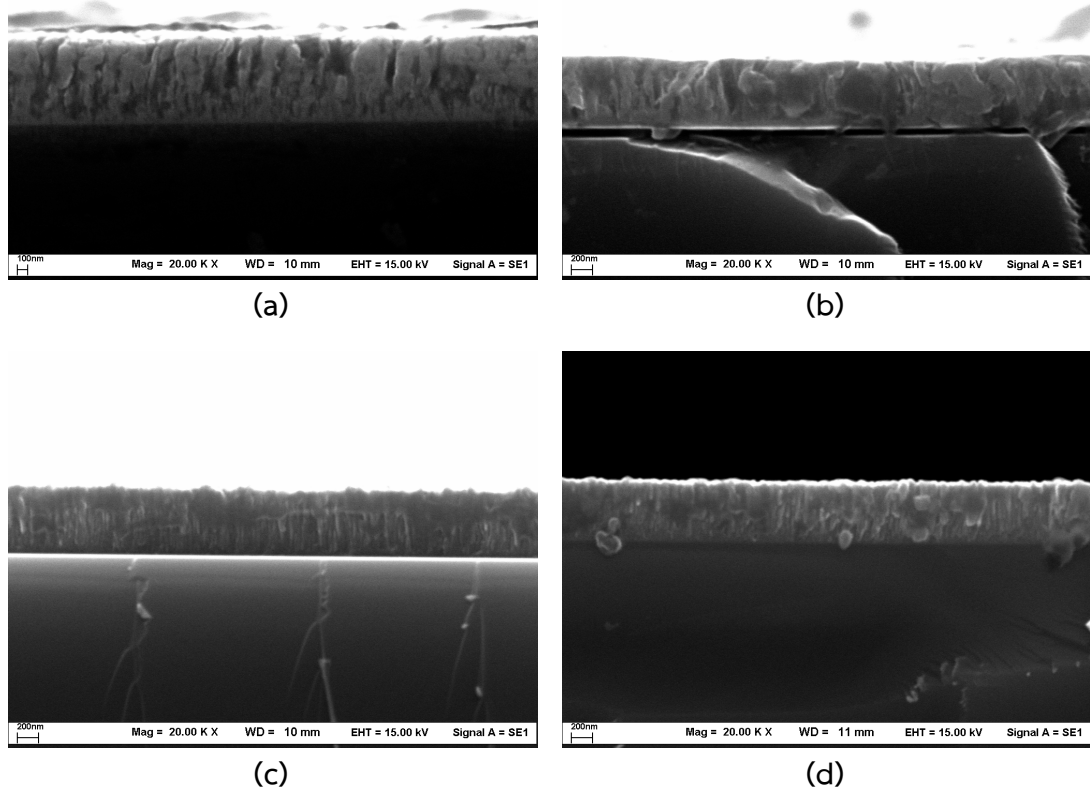
#### 4.2.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บน

ภาพที่ 4-15 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM เมื่อแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบจาก  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่หยาบและขนาดของเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมที่แตกต่างกัน โดยที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar ฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่หยาบมากเนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมขนาดใหญ่กระจายทั่วพื้นผิวของฟิล์ม ดังภาพที่ 4-15 (a) และ (b) แต่เมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหยาบผิวลดลงเนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมขนาดเล็ก โดยความหยาบผิวและขนาดเกรนของฟิล์มมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันรวมขณะเคลือบ ดังภาพที่ 4-15 (c) และ (d) ในการหาความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยภาคตัดขวางของฟิล์มจากการวิเคราะห์เทคนิค SEM ดังภาพที่ 4-16 พบว่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันรวมขณะเคลือบ ดังตารางที่ 4-8 โดยเมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบจาก  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar เป็น  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาลดลงจาก 780 nm เป็น 600 nm

ภาพที่ 4-17 และ 4-18 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ จากเทคนิค AFM แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM พบว่ามีผลตรงกันกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM โดยเมื่อใช้ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar พื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้มีความหยาบผิวมากเนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมขนาดใหญ่ ซึ่งฟิล์มที่เคลือบได้จากเงื่อนไขของความดันรวมขณะเคลือบสองค่านี้มีความหยาบผิวและขนาดเกรนของฟิล์มที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อการเคลือบฟิล์มเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหยาบผิวและขนาดของเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (RMS) ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 4-9



ภาพที่ 4-15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar

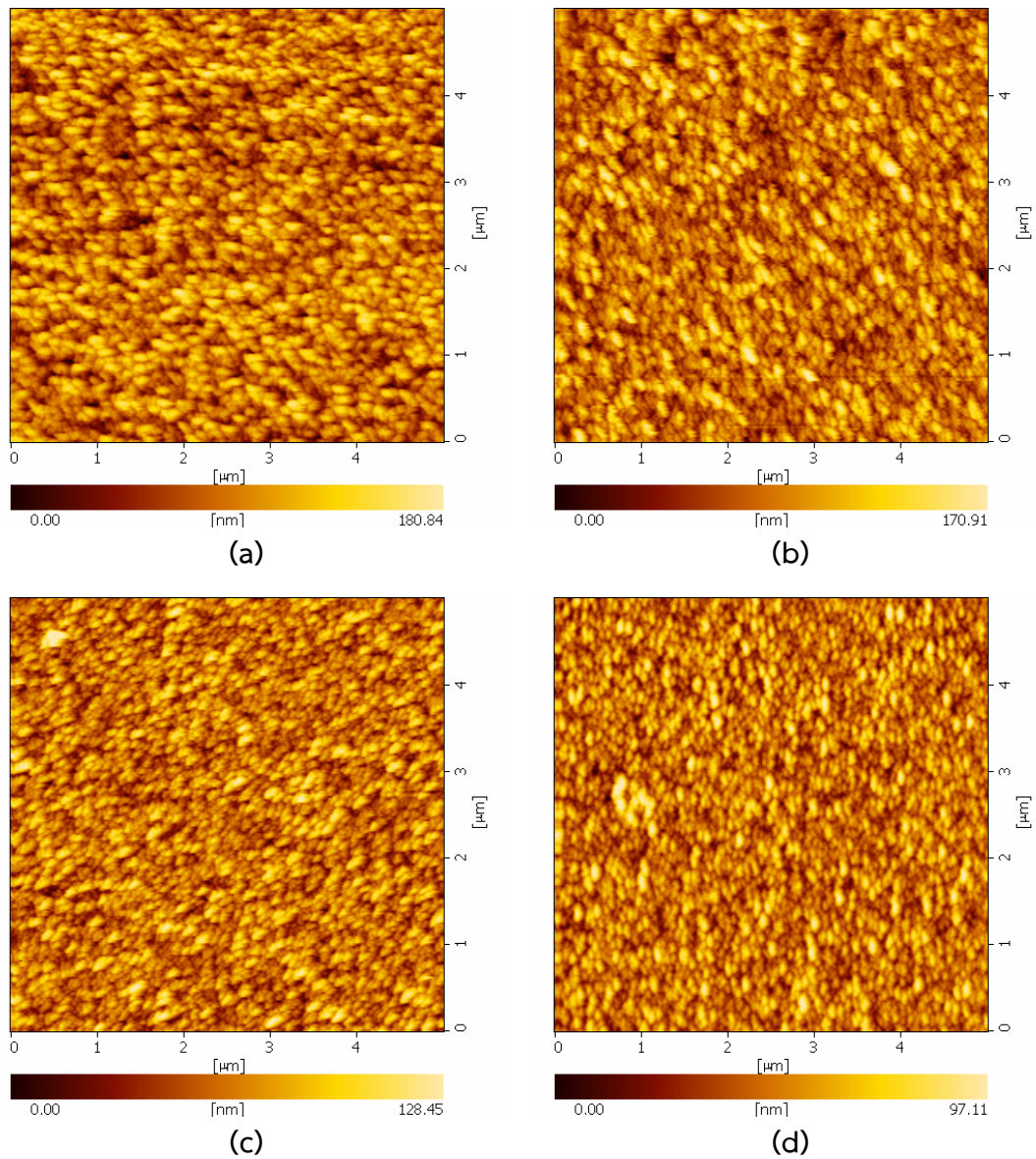


ภาพที่ 4-16 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar

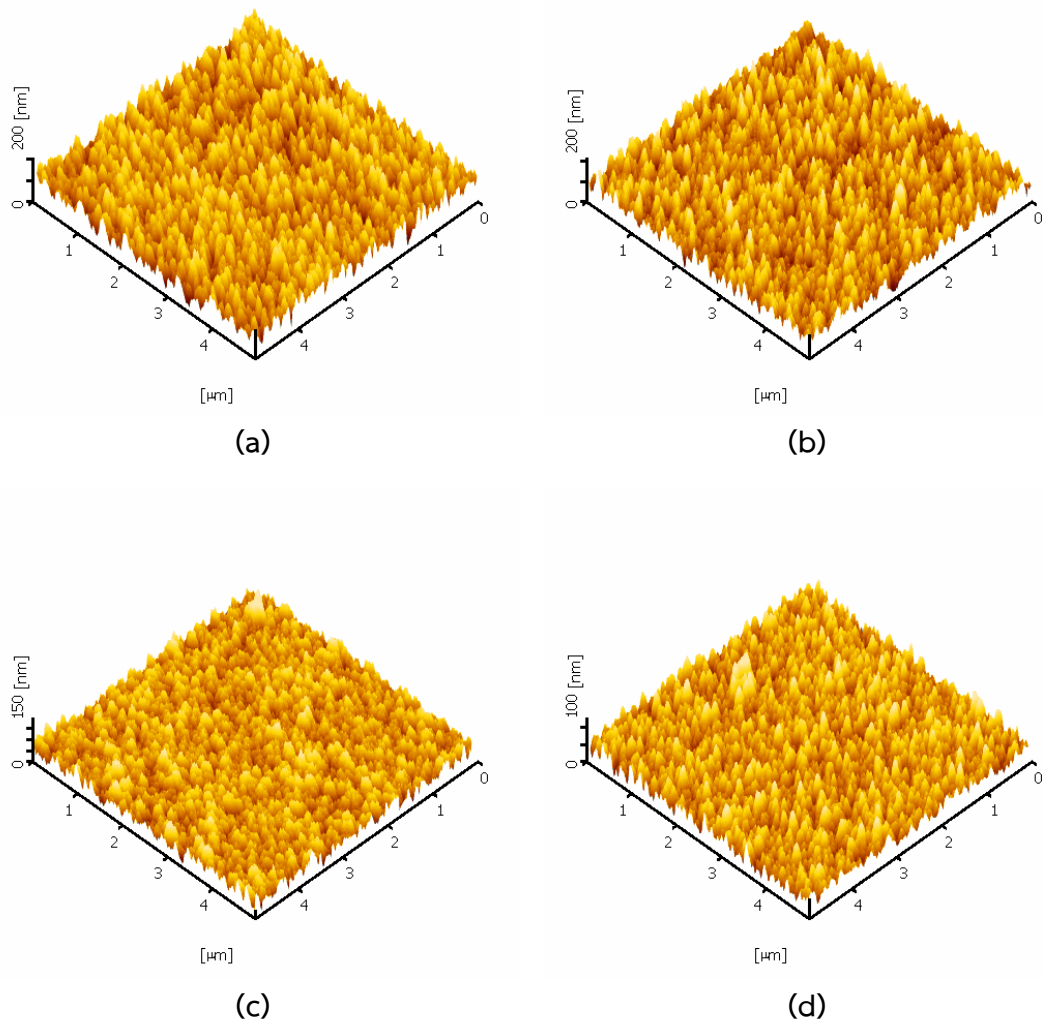
ตารางที่ 4-8 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

ความดันรวมขณะเคลือบ (mbar)	ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม (nm)
$3.0 \times 10^{-3}$	780
$4.0 \times 10^{-3}$	650
$5.0 \times 10^{-3}$	630
$6.0 \times 10^{-3}$	600





ภาพที่ 4-17 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar



ภาพที่ 4-18 ลักษณะพื้นผิวแบบ 3 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar

ตารางที่ 4-9 ความหนาผิวเฉลี่ยของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

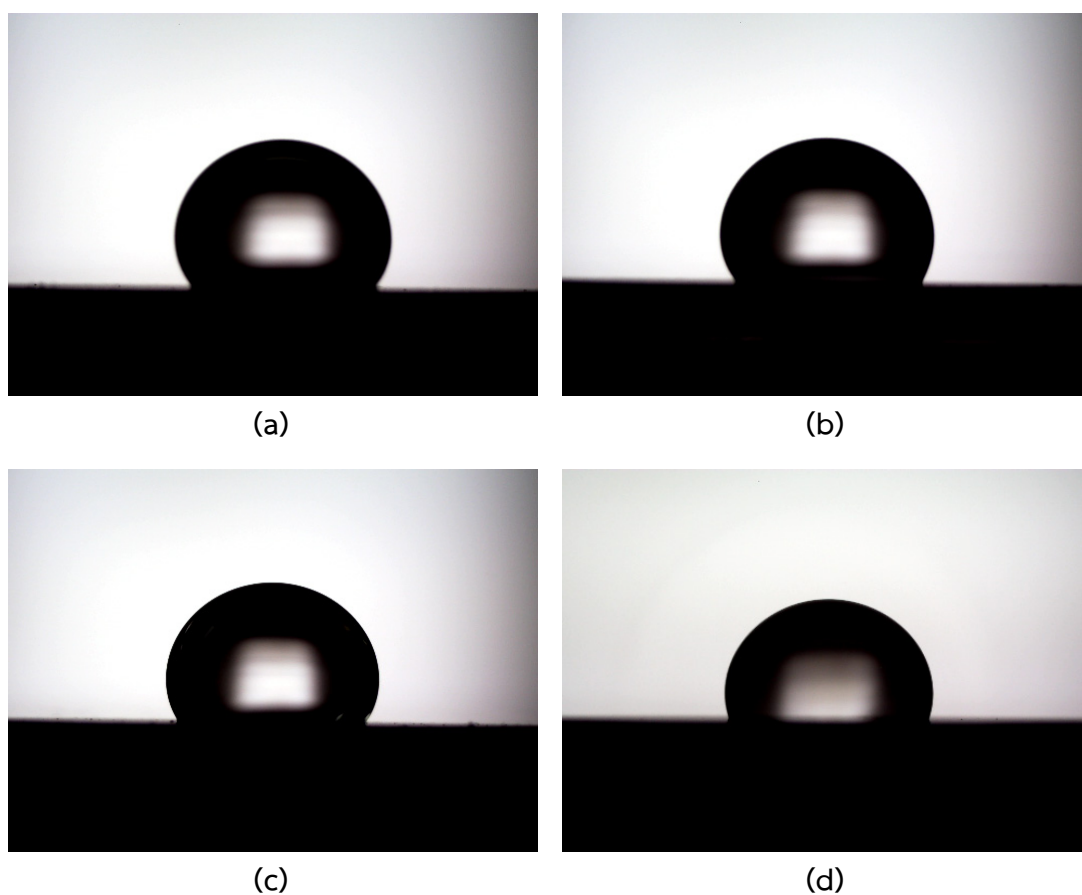
ความดันรวมขณะเคลือบ (mbar)	ความหนาผิวเฉลี่ยของฟิล์ม (nm)
$3.0 \times 10^{-3}$	28.65
$4.0 \times 10^{-3}$	27.05
$5.0 \times 10^{-3}$	20.23
$6.0 \times 10^{-3}$	15.36

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM และ AFM ซึ่งสามารถอธิบายถึงการลดลงของความหนาและความหนาผิวของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อความดันรวมขณะเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้ความดันรวมขณะเคลือบที่ต่ำในการเคลือบฟิล์ม ระยะปลดการชนเฉลี่ยของไอออนอาร์กอนมีค่ามาก ทำให้พลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบมีค่าสูง ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเคลือบฟิล์มและการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับ ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาและความหนาผิวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ความดันรวมขณะเคลือบที่สูงในการเคลือบฟิล์ม ระยะปลดการชนเฉลี่ยของไอออนอาร์กอนมีค่าน้อย ทำให้เกิดการชนกันเองของไอออนอาร์กอนมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการลดลงของพลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบ จึงทำให้ทั้งอัตราการเคลือบฟิล์มและการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับมีค่าลดลง ส่งผลให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาและความหนาผิวลดลง (Wei et al, 2015)

#### 4.2.5 ความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

ภาพที่ 4-19 แสดงภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ เมื่อทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มทั้งหมดจากภาพถ่าย พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ทั้งหมดที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยเมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบจาก  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar เป็น  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่าลดลงจาก  $117.3^\circ$  เป็น  $103.8^\circ$  ดังในตารางที่ 4-10 ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำลดลงเมื่อความดันรวมขณะเคลือบเพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเปียกด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่มีความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM และ AFM กล่าวคือมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มมีค่าลดลงตามการลดลงของความหยาบผิวฟิล์ม เนื่องจากการลดลงของขนาดเกรนที่มีรูปร่างเรียวยาวแหลมของฟิล์มที่เคลือบได้ ทำให้ความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าลดลงซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สัมผัสระหว่างหยดน้ำและฟิล์ม โดยเป็นการแสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ลดลงของฟิล์ม (Li, Pan, Fu, Zhou, & Guo, 2019)



ภาพที่ 4-19 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ (a)  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar, (b)  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar, (c)  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar และ (d)  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar

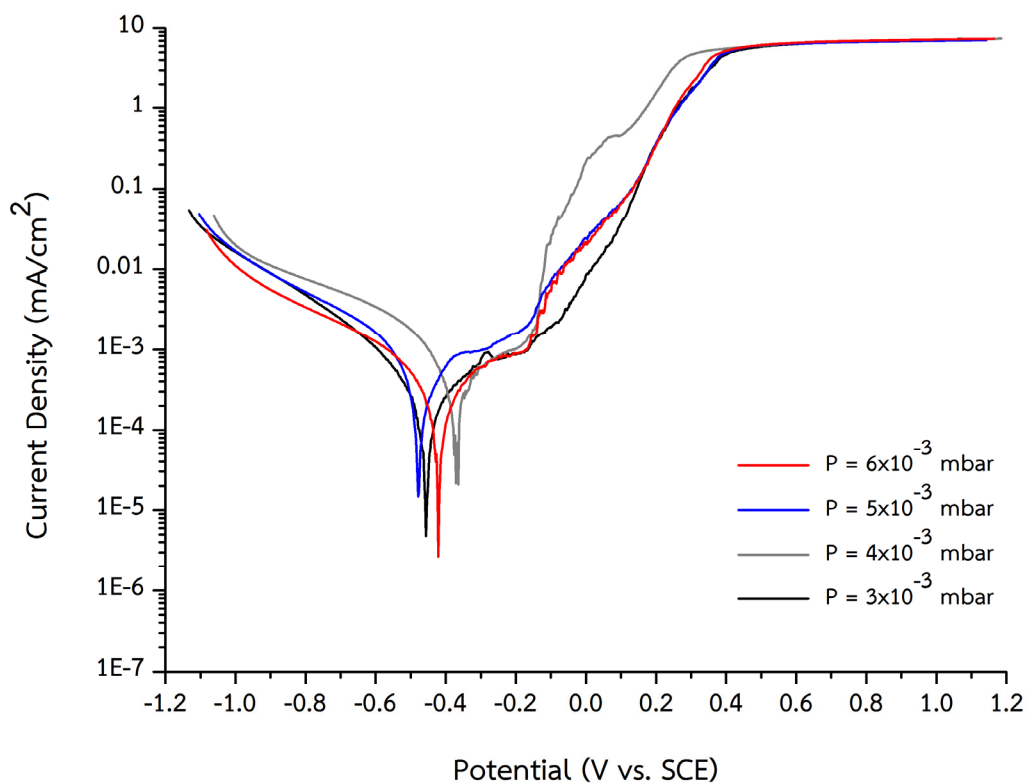
ตารางที่ 4-10 มุมสัมผัสน้ำเกลือบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

ความดันรวมขณะเคลือบ (mbar)	มุมสัมผัสน้ำเกลือ (องศา)
$3.0 \times 10^{-3}$	117.4
$4.0 \times 10^{-3}$	115.1
$5.0 \times 10^{-3}$	113.6
$6.0 \times 10^{-3}$	103.8

#### 4.2.6 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บน

ในการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวของฟิล์มที่ทดสอบ  $1 \text{ cm}^2$  สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt% ที่อุณหภูมิห้อง ภาพที่ 4-20 แสดงเส้นโค้งโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt% โดยพารามิเตอร์การกัดกร่อน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (CR) ที่ได้จากวิธี Tafel extrapolation ของเส้นโค้งโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน แสดงในตารางที่ 4-11

จากผลการวิเคราะห์การกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีอัตราการกัดกร่อนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.003240 mm/year ถึง 0.009608 mm/year ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสที่เป่าที่มีค่าเท่ากับ 0.026265 mm/year ในการทดลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ทั้งหมดนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar มีอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงของอัตราการกัดกร่อนได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ของการเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบจาก  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้น และช่วงที่ 2 ของการเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบจาก  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่เคลือบได้มีลดลง



ภาพที่ 4-20 เส้นโค้งโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt%

ตารางที่ 4-11 พารามิเตอร์การกัดกร่อนที่คำนวณจากวิธี Tafel extrapolation ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ

ตัวอย่าง	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	CR (mm/year)
$P = 3.0 \times 10^{-3}$ mbar	-0.45636	$2.79 \times 10^{-4}$	0.003240
$P = 4.0 \times 10^{-3}$ mbar	-0.37052	$8.27 \times 10^{-4}$	0.009608
$P = 5.0 \times 10^{-3}$ mbar	-0.47814	$6.39 \times 10^{-4}$	0.007429
$P = 6.0 \times 10^{-3}$ mbar	-0.42141	$4.83 \times 10^{-4}$	0.005609

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่า นอกจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของฟิล์มที่เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการกัดกร่อนของฟิล์ม ยังพบว่าความหนาและขนาดเกรนของฟิล์มเป็นอีกสองพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการกัดกร่อนของฟิล์มเช่นเดียวกัน โดยความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนแบบไฟฟ้าเคมีลดลง ส่งผลต่อการลดลงของอัตราการกัดกร่อนของฟิล์ม (Zhang, Dai, Wen, & Wei, 2015) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลของลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม มุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มและความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าผลของขนาดเกรนของฟิล์มและมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาผลความหนาของฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่ามีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 780 nm และ 650 nm ตามลำดับ จึงเป็นผลให้ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar มีอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่น้อยกว่า

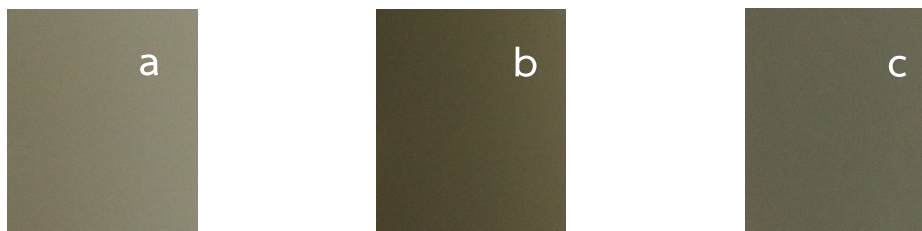
ในการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบที่เกี่ยวข้องกับขนาดเกรนของฟิล์ม โดยขนาดเกรนของฟิล์มที่เล็กกว่าทำให้ความหนาแน่นบริเวณขอบเขตเกรน (Grain boundary density) ของฟิล์มมีค่าสูงกว่า ส่งผลต่อการลดลงของอัตราการกัดกร่อนของฟิล์ม (Liu, & Duh, 2008) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลของลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม มุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์ม และความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบจาก  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบได้ในช่วงของความดันรวมขณะเคลือบดังกล่าวนี้มีความหนาใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาผลของลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม พบว่าขนาดเกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันรวมขณะเคลือบ จึงเป็นผลให้ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar มีอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มน้อยกว่าฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $5.0 \times 10^{-3}$  mbar โดยฟิล์มที่เคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบจาก  $4.0 \times 10^{-3}$  mbar ถึง  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มไม่ขึ้นอยู่กับมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์ม

### 4.3 ผลของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ

ส่วนนี้เป็นผลการศึกษาของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับสำหรับใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์บนวัสดุรองรับ 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นซิลิกอน และแผ่นสแตนเลส-สตีล ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยกำหนดให้ความดันพื้นเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-5}$  mbar ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-3}$  mbar กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมเท่ากับ 600 mA กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมเท่ากับ 400 mA เวลาในการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 30 นาที และแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบ (ทั้งไทเทเนียมและอลูมิเนียม) ถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 12 cm , 14 cm และ 16 cm ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาประกอบไปด้วย ลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความสามารถในการเปียก และความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ดังต่อไปนี้

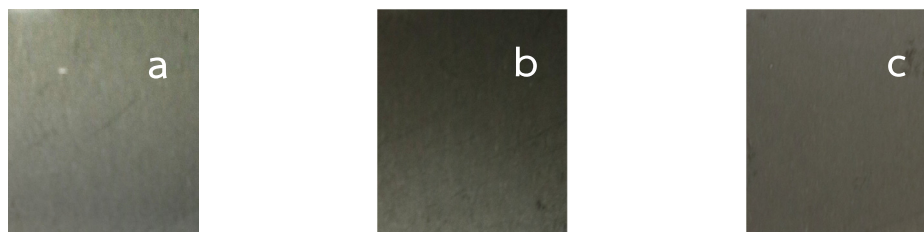
#### 4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอน และแผ่นสแตนเลสสตีล โดยแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ เมื่อสังเกตฟิล์มที่เคลือบได้ด้วยตาเปล่าที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 12 cm และ 14 cm บนแผ่นซิลิกอนดังภาพที่ 4-21 (a) และ (b) และแผ่นสแตนเลสสตีลดังภาพที่ 4-22 (a) และ (b) พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดเป็นสีเทาดำ ส่วนฟิล์มที่เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 16 cm บนแผ่นซิลิกอนดังภาพที่ 4-21 (c) และแผ่นสแตนเลสสตีลดังภาพที่ 4-22 (c) พบว่าฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบได้เป็นสีเทา ซึ่งลักษณะสีของฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ



ภาพที่ 4-21 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm



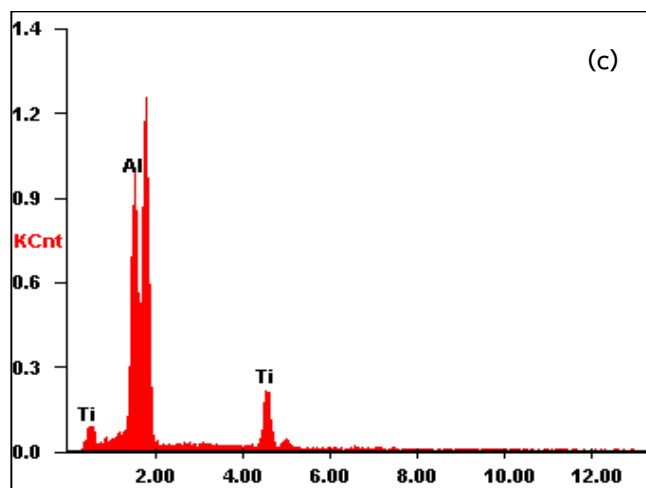
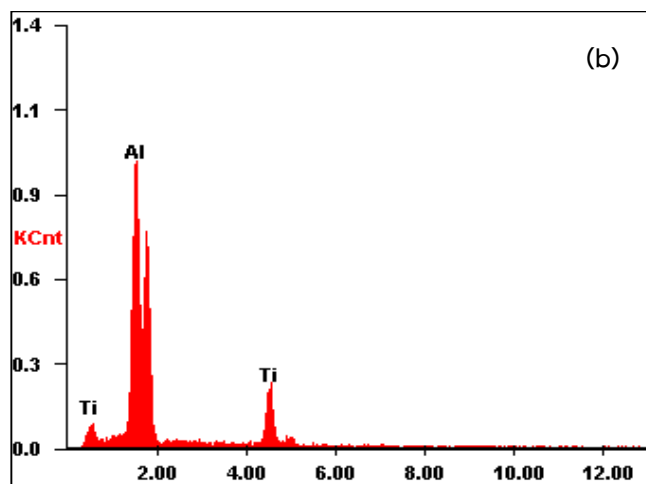
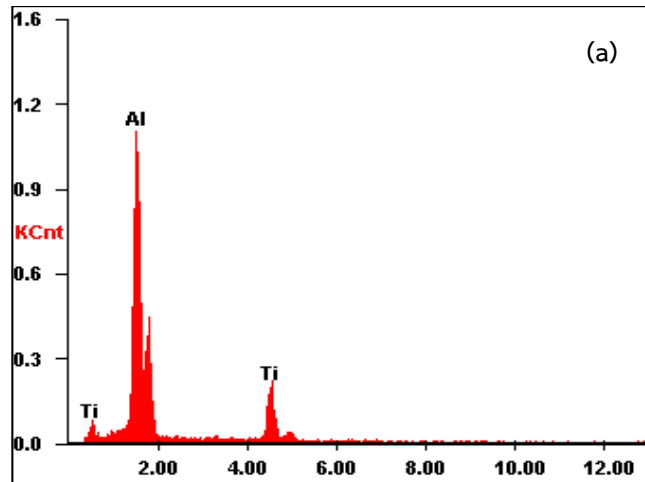


ภาพที่ 4-22 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm

#### 4.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

ภาพที่ 4-23 แสดงสเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX โดยฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบได้ภายใต้เงื่อนไขระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ พบว่ามีลักษณะของสเปกตรัมที่เหมือนกันซึ่งเป็นการยืนยันว่าองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มประกอบด้วยธาตุไทเทเนียมและอลูมิเนียม โดยปริมาณของธาตุไทเทเนียมและอลูมิเนียม รวมถึงอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมในฟิล์มที่เคลือบได้จากการแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm แสดงดังในตารางที่ 4-12 ซึ่งเมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น ฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้มีปริมาณของธาตุอลูมิเนียมและอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมลดลง

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการชนระหว่างอะตอมสารเคลือบ (อลูมิเนียมและไทเทเนียม) กับโมเลกุลของแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอะตอมของอลูมิเนียมเนื่องจากมีปริมาณมากกว่าอะตอมของไทเทเนียม เกิดการลดลงของพลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมอลูมิเนียมที่กำลังเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับ ซึ่งส่งผลต่อการลดลงปริมาณของธาตุอลูมิเนียมและอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมในฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ (Hua, Ligang, Ruijin, & Wenfeng, 2014; Wei et al, 2015)



ภาพที่ 4-23 สเปกตรัมของธาตุในฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้เงื่อนไขระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm

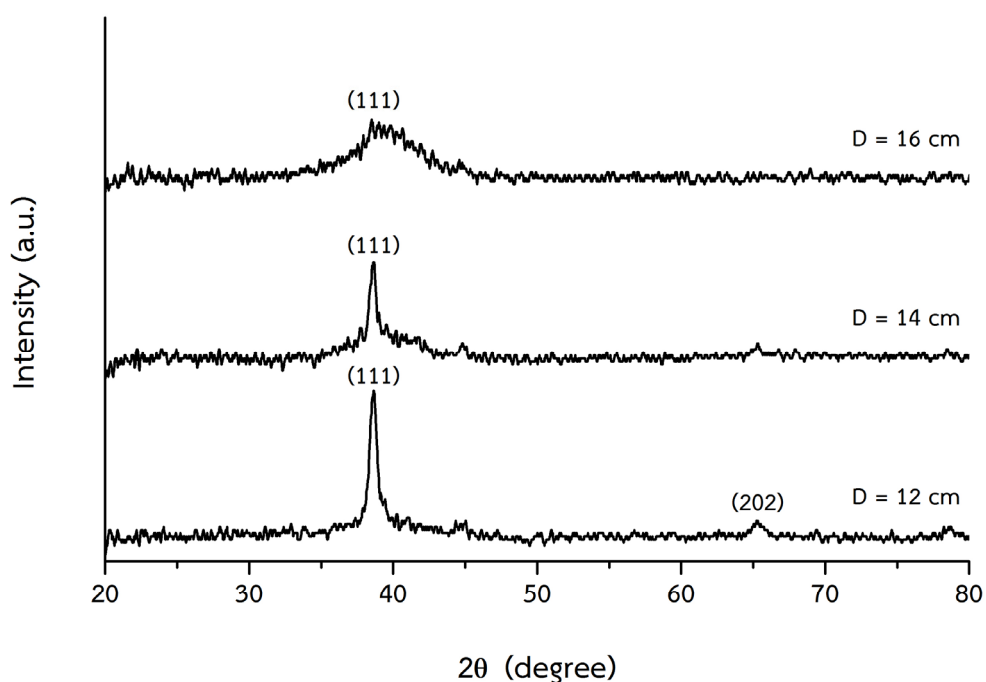
ตารางที่ 4-12 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอน  
ที่ได้จากเทคนิค EDX ภายใต้งี้อเนกประสงค์ห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (cm)	ปริมาณของธาตุ (at%)		อัตราส่วน Al/Ti
	Al	Ti	
12	78.03	21.97	3.55
14	76.15	23.85	3.19
16	75.61	24.39	3.10

#### 4.3.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

ภาพที่ 4-24 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ จากผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มที่เคลือบได้จากการแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ซึ่งเป็นเฟส  $\gamma$ -TiAl ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 65-5414 โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 12 cm เกิดพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  และ  $65.2^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111) และ (202) ตามลำดับ ฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 14 cm เกิดพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111) และฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 16 cm เกิดพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111) แต่พีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นมีความกว้างมาก แสดงถึงฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโน (Nanocrystalline) (Chinmulgund, Inturi, & Barnard, 1995) โดยความเป็นผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ ในการหาขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ซึ่งขนาดผลึกของฟิล์มคำนวณได้จากสมการของ Scherrer จากตารางที่ 4-13 แสดงขนาดผลึกของฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ พบว่าขนาดผลึกของฟิล์มที่ระนาบผลึก (111) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น เกิดการชนกันระหว่างอะตอมสารเคลือบกับโมเลกุลของแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของพลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบที่เคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับ ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความเป็นผลึกและขนาดของผลึกลดลง (Hua, Ligang, Ruijin, & Wenfeng, 2014; Wei et al, 2015)



ภาพที่ 4-24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

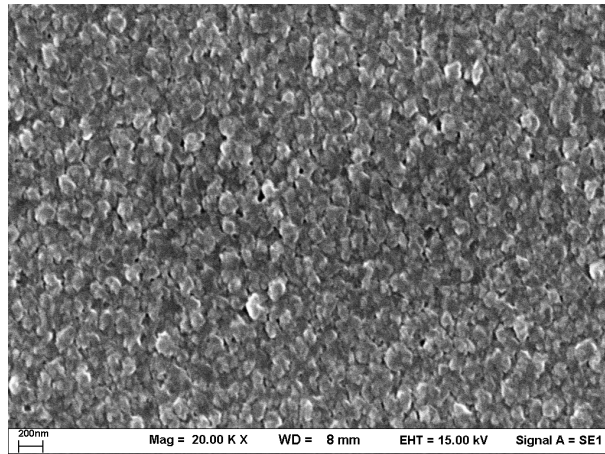
ตารางที่ 4-13 ขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (cm)	ขนาดผลึกของฟิล์ม (nm)
12	20.60
14	17.00
16	3.07

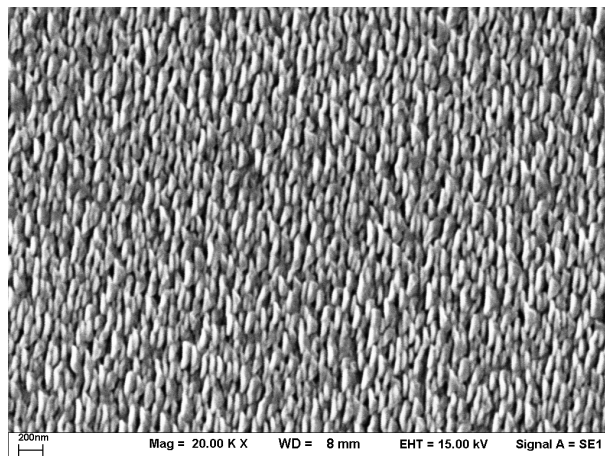
#### 4.3.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บน

ภาพที่ 4-25 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM เมื่อแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะรูปร่างและขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 12 cm เกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปร่างกลม ดังภาพที่ 4-25 (a) ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 14 cm เกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปร่างเรียวยาวแหลม ดังภาพที่ 4-25 (b) และที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 16 cm เกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปร่างคล้ายเมล็ดข้าว ดังภาพที่ 4-25 (c) โดยเกรนของฟิล์มมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของขนาดผลึกของฟิล์มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ในการหาความหนาของฟิล์มเคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยภาคตัดขวางของฟิล์มจากการวิเคราะห์เทคนิค SEM ดังภาพที่ 4-26 พบว่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ ดังตารางที่ 4-14 โดยเมื่อเพิ่มระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับจาก 12 cm เป็น 16 cm ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาลดลงจาก 730 nm เป็น 420 nm

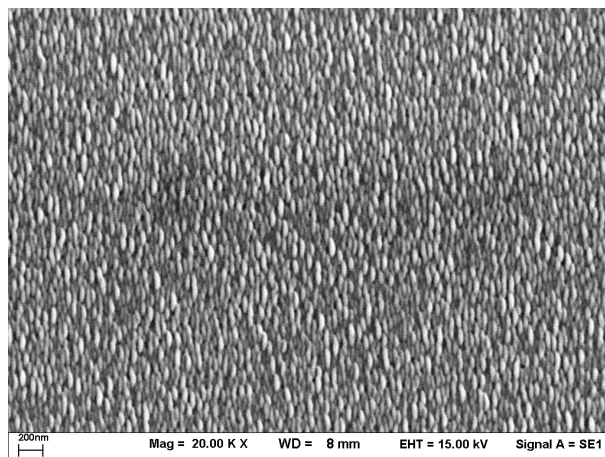
การเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนและความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับมีค่าน้อย การชนกันระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแก๊สอาร์กอนมีจำนวนลดลง ทำให้พลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบที่เคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับมีค่าสูงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับและอัตราการเคลือบฟิล์ม ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีเกรนขนาดใหญ่และความหนาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับมีค่าเพิ่มขึ้น การชนกันระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแก๊สอาร์กอนมีจำนวนเพิ่มขึ้น เกิดการลดลงของพลังงานจลน์และโมเมนตัมของอะตอมสารเคลือบที่เคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับ ส่งผลต่อการลดลงของการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับและอัตราการเคลือบฟิล์ม ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีเกรนขนาดเล็กและความหนาลดลง (Hua, Ligang, Ruijin, & Wenfeng, 2014; Wei et al, 2015)



(a)

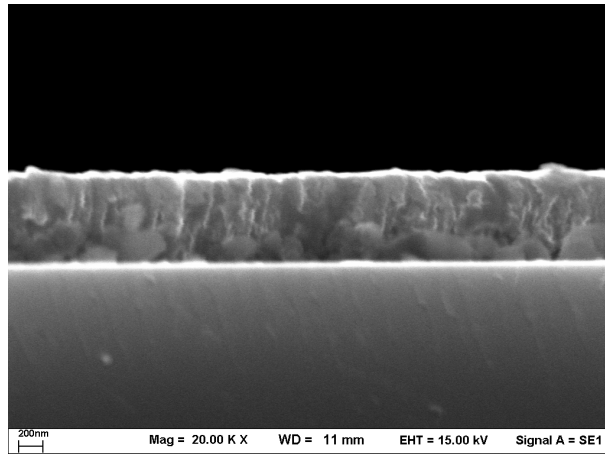


(b)

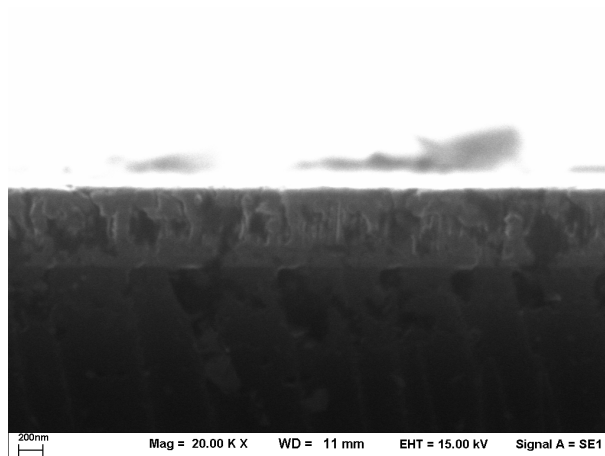


(c)

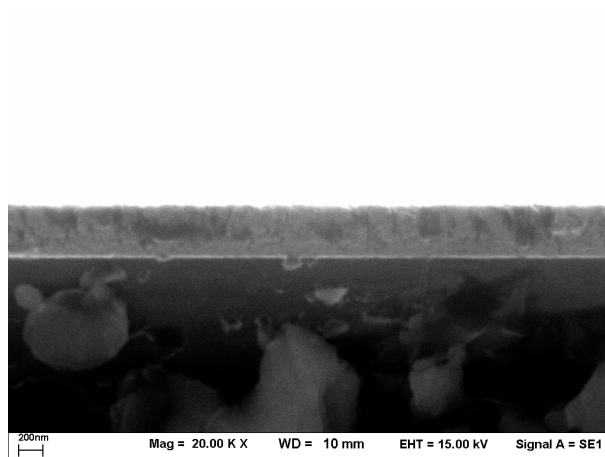
ภาพที่ 4-25 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm



(a)



(b)



(c)

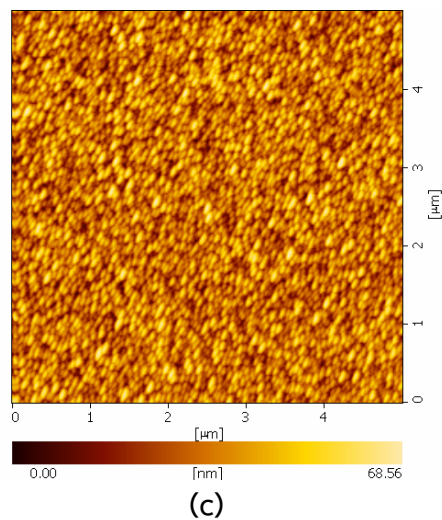
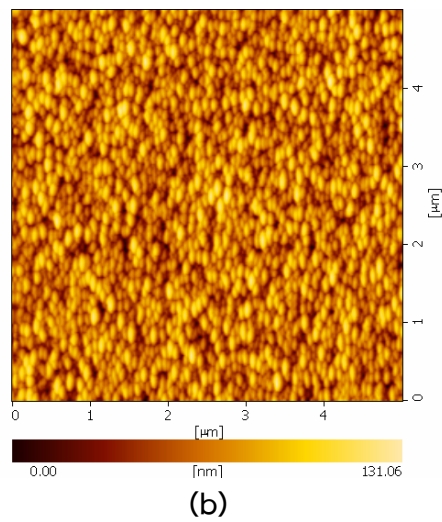
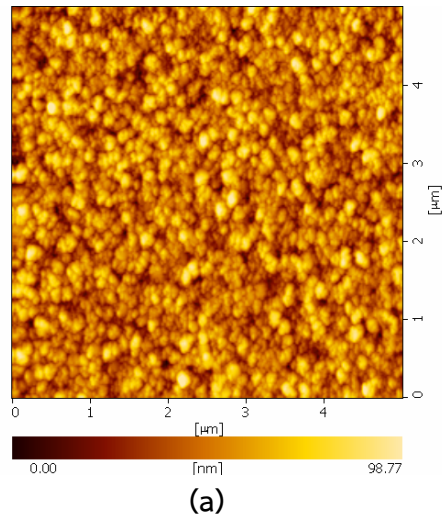
ภาพที่ 4-26 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm

ตารางที่ 4-14 ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

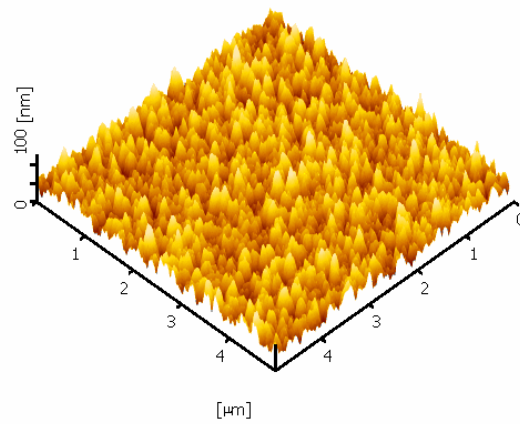
ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (cm)	ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม (nm)
12	730
14	650
16	420

ภาพที่ 4-27 และ 4-28 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ จากเทคนิค AFM แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM พบว่ามีผลตรงกันกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM โดยเมื่อเพิ่มระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับจาก 12 cm ถึง 16 cm พบว่าเกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีขนาดลดลง โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (RMS) ของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 4-15 ซึ่งพบว่าฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 14 cm มีความหยาบผิวมากที่สุดเท่ากับ 20.84 nm เนื่องจากเกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะรูปร่างเรียวยาวแหลม

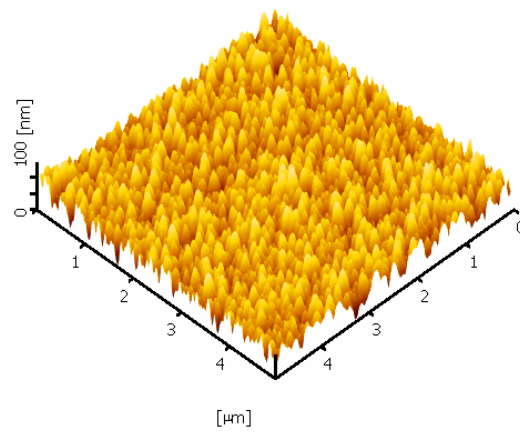




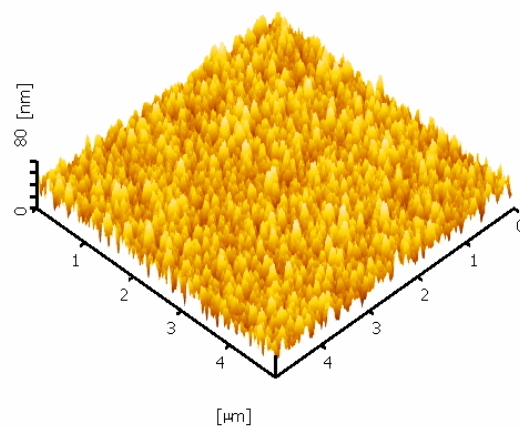
ภาพที่ 4-27 ลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 4-28 ลักษณะพื้นผิวแบบ 3 มิติของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ด้วยเทคนิค AFM (a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm

ตารางที่ 4-15 ความหนาผิวเฉลี่ยของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (cm)	ความหนาผิวเฉลี่ยของฟิล์ม (nm)
12	15.62
14	20.84
16	10.85

#### 4.3.5 ความสามารถในการเปียกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์

ภาพที่ 4-29 แสดงภาพถ่ายมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ เมื่อทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มทั้งหมดจากภาพถ่าย พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ทั้งหมดเมื่อแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 14 cm มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $114.2^\circ$  ดังในตารางที่ 4-16

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเปียกด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM และ AFM โดยฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาผิวมาก ทำให้เกิดการลดลงของพื้นที่สัมผัสระหว่างหยดน้ำและฟิล์ม ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์ม แต่ถ้าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาผิวน้อย ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สัมผัสระหว่างหยดน้ำและฟิล์ม จึงเป็นผลให้มุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มมีค่าลดลง (Li, Pan, Fu, Zhou, & Guo, 2019)



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 4-29 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบ  
ได้บนแผ่นสแตนเลสที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ  
(a) 12 cm, (b) 14 cm และ (c) 16 cm

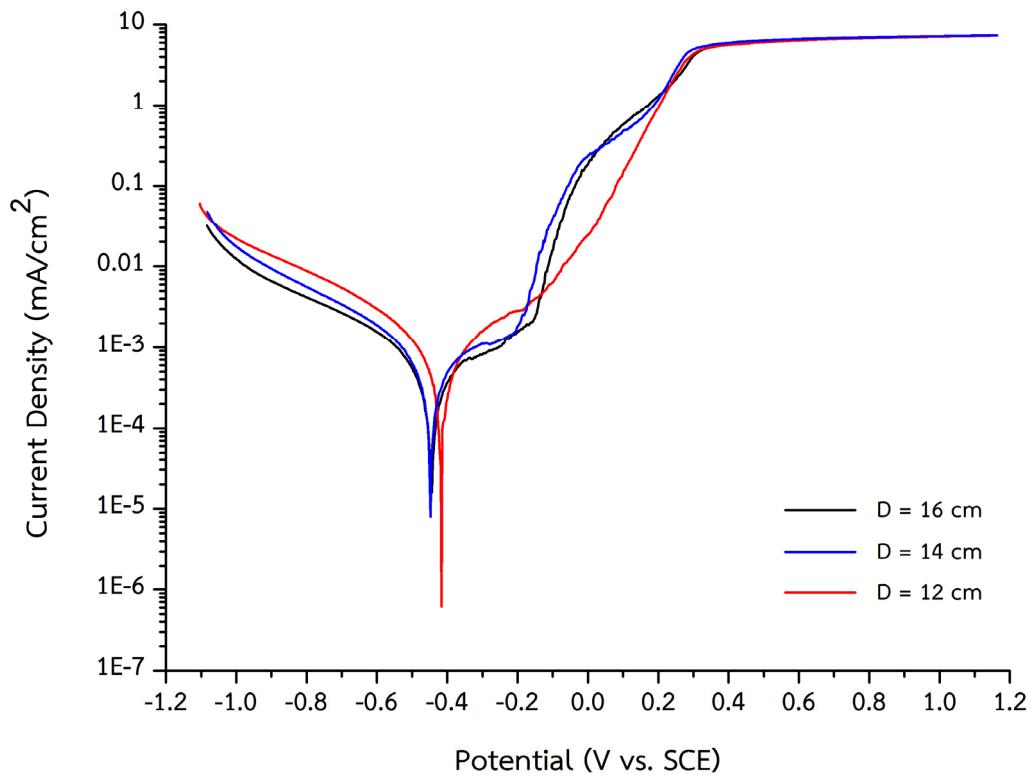
ตารางที่ 4-16 มุมสัมผัสน้ำเกลือบนฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ (cm)	มุมสัมผัสน้ำเกลือ (องศา)
12	104.7
14	114.2
16	94.5

#### 4.3.6 ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

ในการทดสอบการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวของฟิล์มที่ทดสอบ  $1 \text{ cm}^2$  สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt% ที่อุณหภูมิห้อง ภาพที่ 4-30 แสดงเส้นโค้งโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt% โดยพารามิเตอร์การกัดกร่อน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (CR) ที่ได้จากวิธี Tafel extrapolation ของเส้นโค้งโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน แสดงในตารางที่ 4-17

จากผลการวิเคราะห์การกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 0.011851 mm/year เป็น 0.006172 mm/year เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นจาก 12 cm เป็น 16 cm โดยอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ มีค่าน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสสตีลเปล่าที่มีค่าเท่ากับ 0.026265 mm/year ในการทดลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้ทั้งหมดนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี



ภาพที่ 4-30 เส้นโค้งโพเทนชิโอสไตน์ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้บนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 wt%

ตารางที่ 4-17 พารามิเตอร์การกัดกร่อนที่คำนวณจากวิธี Tafel extrapolation ของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบบนแผ่นสแตนเลสสตีลที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ

ตัวอย่าง	$E_{\text{corr}}$ (V)	$I_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	CR (mm/year)
D = 12 cm	-0.41701	$1.02 \times 10^{-3}$	0.011851
D = 14 cm	-0.44898	$7.50 \times 10^{-4}$	0.008709
D = 16 cm	-0.44493	$5.31 \times 10^{-4}$	0.006172

โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับคือขนาดเกรนของฟิล์ม เมื่อเกรนของฟิล์มมีขนาดเล็กทำให้บริเวณขอบเขตของเกรนมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของฟิล์มมีค่าต่ำ และถ้าเกรนของฟิล์มมีขนาดใหญ่ทำให้บริเวณขอบเขตเกรนมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของฟิล์มมีค่าสูง (Liu, & Duh, 2008) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ พบว่าขนาดเกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ จึงเป็นผลให้ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 16 cm มีอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มน้อยที่สุด โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มไม่ขึ้นอยู่กับมุมสัมผัสหยดน้ำบนฟิล์มและความหนาของฟิล์ม

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการทดลองการเคลือบและปรับปรุงผิวฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ด้วยวิธีสปีดเทอริงสำหรับงานป้องกันการกัดกร่อน สามารถสรุปผลตามเงื่อนไขของการเคลือบได้ดังนี้

##### 1. ผลของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป่าสารเคลือบไทเทเนียมและออกไซด์

1.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมต่างๆ ซึ่งเมื่อแปรค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมจาก 0.375 ถึง 1.5 พบว่าองค์ประกอบธาตุในฟิล์มมีปริมาณของออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 41.17% เป็น 76.60% และปริมาณของไทเทเนียมลดลงจาก 58.83% เป็น 23.40%

1.2 การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์โดยใช้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน และเมื่อใช้อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ซึ่งเป็นเฟส  $\gamma$ -TiAl ที่มีมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111)

1.3 อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและไม่มีเกรนเกิดขึ้น และที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่มีความหยาบเนื่องจากเกิดเกรนที่มีรูปร่างเรียวยาวแหลมจำนวนมากกระจายทั่วพื้นผิวของฟิล์ม โดยฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.5 มีความหยาบผิวมากกว่าฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 เนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมที่มีขนาดใหญ่กว่า

1.4 ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบออกไซด์ต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 มุมสัมผัสของหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่าเท่ากับ  $76.4^\circ$  และ  $74.2^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ



เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม พบว่ามุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่าเท่ากับ  $111.3^\circ$  และ  $116.3^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ

1.5 การกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมต่างๆ พบว่าฟิล์มเคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 0.375 และ 0.5 มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ  $0.043280 \text{ mm/year}$  และ  $0.048640 \text{ mm/year}$  ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ  $0.007773 \text{ mm/year}$  และ  $0.005379 \text{ mm/year}$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสสตีลเปล่าที่มีค่าเท่ากับ  $0.026265 \text{ mm/year}$  แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้ที่อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมเท่ากับ 1.0 และ 1.5 สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

## 2. ผลของความดันรวมขณะเคลือบ

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้จากแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบตั้งแต่  $3.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  ถึง  $6.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์เคลือบได้ที่ความดันขณะเคลือบต่างๆ มีปริมาณของธาตุอลูมิเนียมและไทเทเนียมและอัตราส่วนของปริมาณธาตุอลูมิเนียมต่อไทเทเนียมที่ใกล้เคียงกัน

2.2 ฟิล์มที่เคลือบได้จากการแปรค่าความดันรวมขณะเคลือบตั้งแต่  $3.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  ถึง  $6.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ซึ่งเป็นเฟส  $\gamma\text{-TiAl}$  ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.6^\circ$  ตรงกับระนาบผลึก (111) ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 65-5414 โดยเมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบตั้งแต่  $5.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  ขึ้นไปในการเคลือบฟิล์ม พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้มีความเป็นผลึกลดลง โดยขนาดผลึกของฟิล์มที่ระนาบผลึก (111) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันรวมขณะเคลือบ

2.3 ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  และ  $4.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะพื้นผิวที่หยาบมากเนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมขนาดใหญ่กระจายทั่วพื้นผิวของฟิล์ม แต่เมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  และ  $6.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหยาบผิวลดลงเนื่องจากเกิดเกรนรูปร่างเรียวยาวแหลมขนาดเล็ก ในส่วนความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความดันรวมขณะเคลือบ โดยเมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบจาก  $3.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  เป็น  $6.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนา ลดลงจาก  $780 \text{ nm}$  เป็น  $600 \text{ nm}$

2.4 พิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ทั้งหมดที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยเมื่อเพิ่มความดันรวมขณะเคลือบจาก  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar เป็น  $6.0 \times 10^{-3}$  mbar มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่าลดลงจาก  $117.3^\circ$  เป็น  $103.8^\circ$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำลดลงเมื่อความดันรวมขณะเคลือบเพิ่มขึ้น

2.5 พิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เคลือบได้ทั้งหมดที่ความดันรวมขณะเคลือบต่างๆ มีอัตราการกัดกร่อนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.003240 mm/year ถึง 0.009608 mm/year ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสสตีลเปล่าที่มีค่าเท่ากับ 0.026265 mm/year แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ความดันรวมขณะเคลือบเท่ากับ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar มีอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มน้อยที่สุด

### 3. ผลของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้จากแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีปริมาณของธาตุออกซิเจนและอัตราส่วนของปริมาณธาตุออกซิเจนต่อไทเทเนียมลดลง เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น

3.2 พิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้จากการแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ซึ่งเป็นเฟส  $\gamma$ -TiAl ตามมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 65-5414 โดยความเป็นผลึกและขนาดผลึกที่ระนาบผลึก (111) ของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ

3.3 พิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้เมื่อแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะรูปร่างและขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 12 cm เกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปร่างกลม ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 14 cm เกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปร่างรีวงกลม และที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 16 cm เกรนของฟิล์มที่เคลือบได้มีรูปร่างคล้ายเมล็ดข้าว โดยเกรนของฟิล์มมีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ ในส่วนของความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ โดยเมื่อเพิ่มระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับจาก 12 cm เป็น 16 cm ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาลดลงจาก 730 nm เป็น 420 nm

3.4 फिल्मบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้ทั้งหมด เมื่อแปรค่าระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับตั้งแต่ 12 cm ถึง 16 cm พบว่ามีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยฟิล์มเคลือบได้ที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 14 cm มุมสัมผัสหยดน้ำเฉลี่ยบนฟิล์มมีค่ามากที่สุดเท่ากับ  $114.2^\circ$

3.5 การกัดกร่อนของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่เคลือบได้เมื่อระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นจาก 12 cm เป็น 16 cm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 0.011851 mm/year เป็น 0.006172 mm/year โดยอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดที่ระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับต่างๆ มีค่าน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นสแตนเลสสตีลเปล่าที่มีค่าเท่ากับ 0.026265 mm/year แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดนี้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบแสงไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบไทเทเนียมและอลูมิเนียม ความดันรวมขณะเคลือบ และระยะห่างจากเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับเวลา ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยสมบัติทางกายภาพของฟิล์มสามารถขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของการเคลือบฟิล์มอื่นๆ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงแนะนำว่าควรศึกษาพารามิเตอร์ของการเคลือบ เช่น การไบแอสแรงดันไฟฟ้าแก่วัสดุรองรับ การให้ความร้อนกับวัสดุรองรับขณะเคลือบฟิล์ม และการอบอ่อนของฟิล์มที่เคลือบได้ ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์

2. ควรมีการศึกษาวิจัยในเชิงลึกครอบคลุมทั้งด้านเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ และสมบัติทางกายภาพของฟิล์มด้านอื่นๆ เช่น ความแข็ง การนำไฟฟ้า และความเสถียรภาพทางความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมอัลลอยด์ให้ดีขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติกร มณีสว่าง. (2554). วิธีวัดคุณสมบัติที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในสภาวะเปียก. *ไฟฟ้าสาร*, 18 (1), 53-57.
- จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. (2542). การศึกษาสภาพพื้นผิวของโพลีเมอร์โดยใช้เทคนิค Atomic Force Microscopy. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, (15), 46-50.
- ณัฐที ถึงสุข. (2557). การพัฒนาพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคพลาสมา. *ดุษฎีนิพนธ์* ปริญญา ดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ. (2544). *การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธันสถา รัตน์. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสเปคโตรริงตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2. รายงานการวิจัยประจำปี 2547 ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พิสิทธ์ราชมงคลดอทคอม. (2559). การโค้งงอของผิวของเหลว. วันที่ค้นหาข้อมูล 13 มกราคม 2562, เข้าถึงได้จาก <http://www.neutron.rmutphysics.com/news/>
- รุจิภรณ์ นาคขุนทด. (2561). การประเมินผลพฤติกรรมการกักกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve). วันที่ค้นหาข้อมูล 23 เมษายน 2562, เข้าถึงได้จาก <https://www.tistr.or.th/tistrblog/>
- วรวิทย์ จันทรสุวรรณ. (2554). หน่วยที่ 3 โลหะและการกัดกร่อนของโลหะ. วันที่ค้นหาข้อมูล 20 มกราคม 2562, เข้าถึงได้จาก <http://sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/>
- Abu Sulik, S. B., Takeshita, K., Kitagawa, H., Tetsui, T., & Hasezaki, K., (2007). Preparation and high temperature oxidation behavior of refractory disilicide coatings for  $\gamma$ -TiAl intermetallic compounds. *Intermetallics*, 15(8), 1084-1090.
- Alvarez, R., Garcia-Martin, J.M., Garcia-Valenzuela, A., Macias-Montero, M., Ferrer, F.J., Santiso, J., Rico, V., Cotrino, J., Gonzalez-Elipe, A.R., & Palmero, A., (2016). Nanostructured Ti thin films by magnetron sputtering at oblique angles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49, 1-10.

- Brou, S. Y., Siab, R., Bonnet, G., & Grosseau-Poussard, J.L., (2007). On dipping of  $\gamma$ -TiAl in low-concentration phosphoric acid solution and consecutive oxidation resistance at 800 °C. *Scripta Materialia*, 56(6), 517-520.
- Bubert, H., & Jenett, H. (Eds.). (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*: William Andrew.
- Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Chinmulgund, M., Inturi, R.B., & Barnard, J.A., (1995). Effect of Ar gas pressure on growth, structure, and mechanical properties of sputtered Ti, Al, TiAl, and Ti<sub>3</sub>Al films. *Thin Solid Films*, 270, 260-263.
- Chu, M.S., Xu, W., Shi, X., & Lu, S., (2011). Controlled growth of superhydrophobic films without any low-surface-energy modification by chemical displacement on zinc substrates. *Materials Chemistry and Physics*, 129, 1042–1046.
- Dettenwanger, F., Schumann, E., RuÈhle, M., Rakowski, J., & Meier, G.H., (1998). Microstructural study of oxidized-TiAl. *Oxidation of Metals*, 50, 269-307.
- Ebach-Stahl, A., & Fröhlich, M., (2016). Oxidation study of Pt–Al based coatings on  $\gamma$ -TiAl at 950 °C. *Surface and Coatings Technology*, 287, 20-24.
- Habouti, S., Mátéfi-Tempfli, M., Solterbeck, C.-H., Es-Souni, M., Mátéfi-Tempfli, S., & Es-Souni, M., (2011). On-substrate, self-standing Au-nanorod arrays showing morphology controlled properties. *Nano Today*, 6(1), 12-19.
- Hua, Q., Ligang, W., Ruijin, L., & Wenfeng, Y., (2014). Influence of target substrate distance on the properties of transparent conductive Si doped ZnO thin films. *Optik*, 125, 3902-3907.
- Kang, Z., Ye, Q., Sang, J., & Li, Y., (2009). Fabrication of super-hydrophobic surface on copper surface by polymer plating. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4543–4547.
- Kim, H.C., Theodore, N.D., Gadre, K.S., & Alford, T.L., (2004). Microstructure and stability of sputtered titanium aluminides on SiO<sub>2</sub>. *Scripta Materialia*, 50(4), 517-521.

- Kuranishi, T., Habazaki, H., & Konno, H., (2005). Oxidation-resistant multilayer coatings using an anodic alumina layer as a diffusion barrier on  $\gamma$ -TiAl substrates. *Surface and Coatings Technology*, 200, 2438 – 2444.
- Leyens, C., & Peters, M. (Eds.). (2003). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and application*: John Wiley & Sons.
- Li, J., Pan, L., Fu, Q., Zhou, Y., & Guo, N., (2019). Wettability and corrosion behavior of a Ni coating on 304 stainless steel surface. *Surface and Coating Technology*, 357, 740-747.
- Lintymer, J., Gavaille, J., Martin, N., & Takadom, J., (2003). Glancing angle deposition to modify microstructure and properties of sputter deposited chromium thin films. *Surface and Coatings Technology*, 174-175, 316–323.
- Liu, T., Chen, S., Cheng, S., Tian, J., Chang, X., & Yin, Y., (2007). Corrosion behavior of super-hydrophobic surface on copper in seawater. *Electrochimica Acta*, 52, 8003–8007.
- Liu, X., Chu, P.K., & Ding, C., (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47(3–4), 49-121.
- Liu, Y., Lu, G., Liu, J., Han, Z., & Liu, Z., (2013). Fabrication of biomimetic hydrophobic films with corrosion resistance on magnesium alloy by immersion process. *Applied Surface Science*, 264, 527–532.
- Liu, Y., Yin, X., Zhang, J., Yu, S., Han, Z., & Ren, L., (2014). A electro-deposition process for fabrication of biomimetic super-hydrophobic surface and its corrosion resistance on magnesium alloy. *Electrochimica Acta*, 125, 395–403.
- Ma, Z., Cao, C., Liu, Q., Wang, Z., & Wang, J., (2011). Designed synthesis and magnetic properties of Co hierarchical nanostructures. *Materials Letters*, 65, 1312–1315.
- Meng, L., Chen, H., Can, L., & Dos Santos, M.P., (2014). Growth of the [110] oriented TiO<sub>2</sub> nanorods on ITO substrates by sputtering technique for dye-sensitized solar cell. *Frontiers in Materials*, 1, 1-8.

- Noda, T., (1998). Application of cast gamma TiAl for automobiles. *Intermetallics*, 6, 709-713.
- Oliveira, J.C., Manaia, A., Diasb, J.P., Cavaleiro, A., Teer, T.D., & Taylor, S., (2005). Structure and mechanical properties of Ti–Al films deposited by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 200, 395 – 398.
- Padmaprabu, C., Kuppusami, P., Terrance, A.L.E., Mohandas, E., Raghunathan, V.S., Banerjee, S., & Sanyal, M.K., (2000). Microstructural characterisation of TiAl thin films grown by DC magnetron co-sputtering technique. *Materials Letters*, 43(3), 106-113.
- Rickerby, D.S., & Matthews, A. (1991). *Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering*.
- Scully, J.R., & Kelly, R. G. (2003). Methods for determining aqueous corrosion reaction rates. *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, 13A, 68 – 86.
- Senhov, O.N., Uchic, M.D., Menon, S., & Miracle, D.B., (2002). Crystallization kinetics of an amorphous TiAl sheet produced by PVD. *Scripta Materialia*, 46, 187-192.
- Smith, D.L. (1995). *Thin-film deposition: principles and practice*: McGraw Hill Professional.
- Stansbury, E.E., & Buchanan, R.A. (2000). *Fundamentals of electrochemical corrosion*. ASM international.
- Sudheendra, P., Surendranathan, A.O., & Udayashankar, N.K., (2012). Titanium-aluminium intermetallic thin films preparation by dc sputtering and their characterization. *International Journal of Mechanical Engineering*, 3, 12-17.
- Takeda, F., & Nakajima, T., (1998). Preparation of Ti–Al gradient composite films by sputtering. *Thin Solid Films*, 316, 68-72.
- Tetsui, T., & Ono, S., (1999). Endurance and composition and microstructure effects on endurance of TiAl used in turbochargers. *Intermetallics*, 7(6), 689 -697.
- Ting Liu, K., & Gong Duh, J., (2008). Grain size effects on the corrosion behavior of  $\text{Ni}_{50.5}\text{Ti}_{49.5}$  and  $\text{Ni}_{45.6}\text{Ti}_{49.3}\text{Al}_{5.1}$  films. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 618, 45-52.

- Vieira, M.T., Trindade, B., Ramos, A.S., Fernandes, J.V., & Vieira, M.F., (2002). Mechanical characterisation of  $\gamma$ -TiAl thin films obtained by two different sputtering routes. *Materials Science and Engineering A*, 329–331, 147–152.
- Vossen, J.L., & Kern, W. (1978). *Thin Film Processes*. New York: Academic Press.
- Wang, J., Kong, L., Wu, J., Li, T., & Xiong, T., (2015). Microstructure evolution and oxidation resistance of silicon-aluminizing coating on  $\gamma$ -TiAl alloy. *Applied Surface Science*, 356, 827-836.
- Wasa, K., & Hayakawa, S. (1992). *Handbook of sputter deposition technology: principles, technology, and applications*: William Andrew Publishing.
- Wei, D., Zhang, P., Yao, Z., Zhou, J., Wei, X., & Chen, X., (2015). Double glow plasma chromizing of Ti6Al4V alloys: Impact of working time, substrate–target distance, argon pressure and surface temperature of substrate. *Vacuum*, 121, 81-87.
- Wendler, B. G., & Kaczmarek, Ł., (2005). Oxidation resistance of nanocrystalline microalloyed  $\gamma$ -TiAl coatings under isothermal conditions and thermal fatigue. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 947-953.
- Witusiewicz, V.T., Bondar, A.A., Hecht, U., Rex, S., & Velikanova, T.Y., (2008). The Al–B–Nb–Ti system: III. thermodynamic re-evaluation of the constituent binary system Al–Ti. *Journal of Alloys and Compounds*, 465, 64–77.
- Wu, X., (2006). Review of alloy and process development of TiAl alloys. *Intermetallics*, 14(1), 114–1,122.
- Yoshihara, M., & Kim Y.W., (2005). Oxidation behavior of gamma alloys designed for high temperature applications. *Intermetallics*, 13, 952–958.
- Zhang, J., Dai, C., Wen, Z., & Wei, J., (2015). Study on the effect of the coating thickness on corrosion behavior of AZ91D magnesium alloy in m-SBF. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 6002-6013.



- Zhang, W., Yang, Y.Q., Zhao, G.M., Huang, B., Li, M.H., Luo, S., & Ouyang, S., (2013). Microstructure evolution of TiAl matrix in the process of magnetron sputtering and hot isostatic pressing for fabricating TiAl/SiC<sub>f</sub> composites. *Intermetallics*, 39, 5-10.
- Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., & Long, A., (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*, 200, 2192 – 2207.