



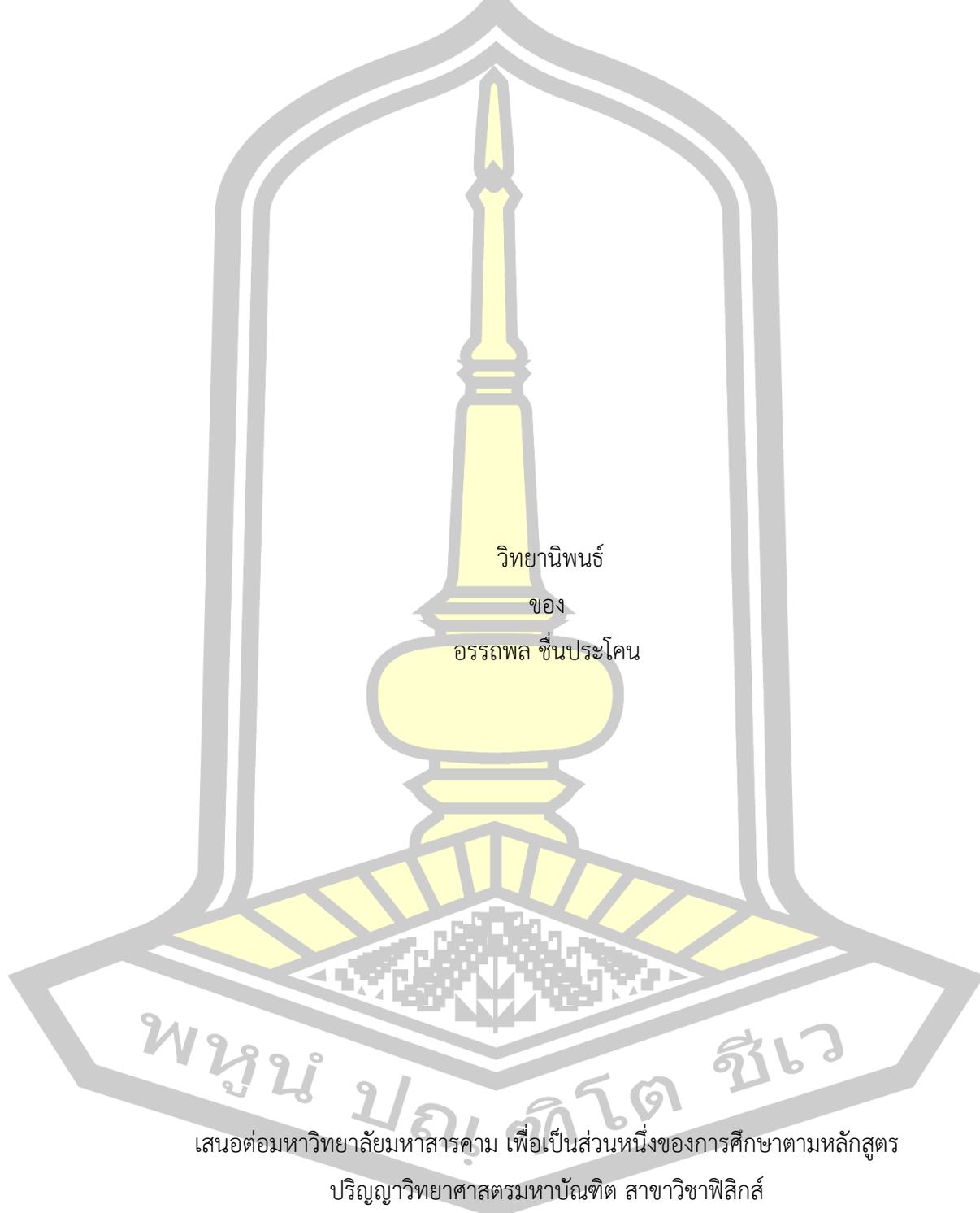
อิทธิพลของการไบอัสที่ชั่วแอนดต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางไทเทเนียมได
โบไรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

วิทยานิพนธ์
ของ
อรรถพล ชื่นประโคน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
เมษายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อิทธิพลของการไปอัสที่ข้าวแอนด์โนตต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางไทเทเนียมได
โบไรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง



พหุณ บอริโต ชิเว

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Influence of Anode Bias Voltage on the Structural and Mechanical Properties of
Titanium Diboride Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering Technique

Auttapon Chuenprakhon

พหุบัณฑิตวิทยา

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Physics)

April 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายอรรถพล ชื่นประโคน แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. วิรัตน์ เจริญบุญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. พิษณุ พูลเจริญศิลป์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน)

.....กรรมการ

(ดร. นิตศักดิ์ ปาสาจะ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พญน ปญฺทิตฺตํ สิว

พญน ปญฺทิตฺตํ สิว

ชื่อเรื่อง	อิทธิพลของการไปอัสที่ขั้วแอโนดต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง		
ผู้วิจัย	อรรถพล ชื่นประโคน		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ พูลเจริญศิลป์		
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB₂) ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง จากเป้าสารประกอบไทเทเนียมไดโบไรด์ บนชิ้นงานซิลิกอน (100) เพื่อศึกษาอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนศักย์บวกที่ขั้วแอโนดในช่วง 0 ถึง 150 V ที่มีต่อสมบัติของพลาสมา ด้วยหัววัดแลงเมียร์ จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มศักย์แอโนดจะส่งผลทำให้ศักย์พลาสมามีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง -0.41 ถึง 111.76 V สำหรับพลังงานไอออนของแก๊สอาร์กอน วัดด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงซึ่งก็พบว่าพลังงานไอออนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง และสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ 0.22 ถึง 138.41 eV เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น ส่วนฟิล์มบาง TiB₂ แบ่งการวิเคราะห์เป็นสมบัติเชิงโครงสร้าง ปรากฏโครงสร้างของผลึกแบบหกเหลี่ยมที่ระนาบ (001) ของ TiB₂ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และความหนาแน่นของฟิล์มมีค่ามากที่สุดที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V ซึ่งมีค่าเป็น 4.47 g/cm³ สมบัติเชิงไฟฟ้าวัดด้วยเทคนิคหัววัดสี่จุด ซึ่งสภาพการนำไฟฟ้าของฟิล์มมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น สำหรับผลที่ได้จากภาพถ่ายภาคตัดขวางด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 750 nm และความแข็งของฟิล์มวัดด้วยเทคนิค nanoindentation โดยที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V ฟิล์มมีค่าความแข็งที่สูงที่สุดเป็น 31.37 GPa

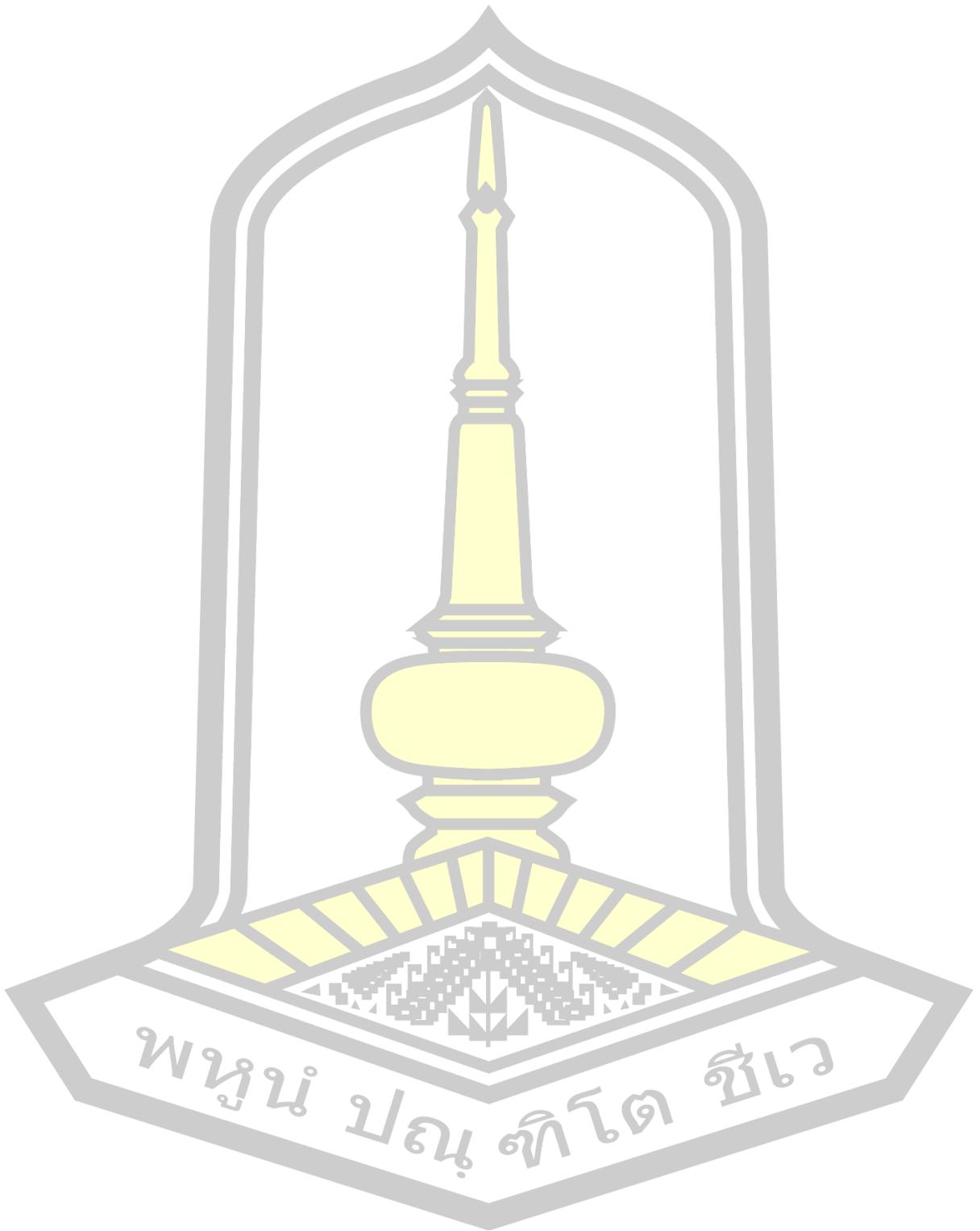
คำสำคัญ : ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง; แอโนดไปอัส; สมบัติพลาสมา; พลังงานไอออน; สมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์

TITLE	Influence of Anode Bias Voltage on the Structural and Mechanical Properties of Titanium Diboride Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering Technique		
AUTHOR	Auttapon Chuenprakhon		
ADVISORS	Assistant Professor Phitsanu Poolcharuansin , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Physics
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

In this research, titanium diboride (TiB_2) thin film was prepared using DC magnetron sputtering technique. From target compound titanium diboride on the Si wafer (100). To study the influence of positive bias voltage at an anode electrode in the range of 0 to 150 V. On the properties of the plasma with a Langmuir probe. From the results, we found that increasing the anode voltage increases the plasma potential in the range of -0.41 to 111.76 V. For the ion energy of Ar gas. Measured with a retarding field analyzer probe, we found that the ion energy tended to increase in the range of 0.22 to 138.41 eV when increasing anode voltage. For structural properties of films, showed hexagonal TiB_2 structure with (001) preferred orientation, which was analyzer by XRD. The density of films was the highest at an anode voltage of 75 V, which was 4.47 g/cm^3 . The electrical properties were measured by a four-point probe technique. the electrical conductivity of film tends to increase as the anode voltage increase. For the results obtained from the cross-section images with the scanning electron microscope technique. we found that the TiB_2 thin film has a thickness of approximately 750 nm and the hardness of the film had the highest hardness value of 31.37 GPa.

Keyword : DC magnetron sputtering; anode biasing; plasma properties; ion energy; properties of titanium diboride thin film.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหลายอันได้แก่ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พิชญ พูลเจริญศิลป์ ที่ได้เสียสละเวลาให้ความรู้ แนะนำ และคำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบทั้ง ผศ.ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ ผศ.ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน และ ดร.นิติศักย์ ปาสาจะ ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำการปรับปรุงวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณนิสิตชั้นปีที่ 4 ปริญาโท และปริญาเอกทุกท่านในหน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด และที่สำคัญที่สุด คือ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสงฆ์วิชาความรู้ทางด้านฟิสิกส์

อรรถพล ชื่นประโคน

พหุณ ปณุ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
บทที่ 2.....	6
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	6
2.1 ทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 หลักการของการไบอัส.....	12
2.2.1 วิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์บวก (Positive-Plasma-Bias Method, PPB).....	12
2.2.2 วิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์ลบ (Negative-Target-Bias Method, NTB).....	14

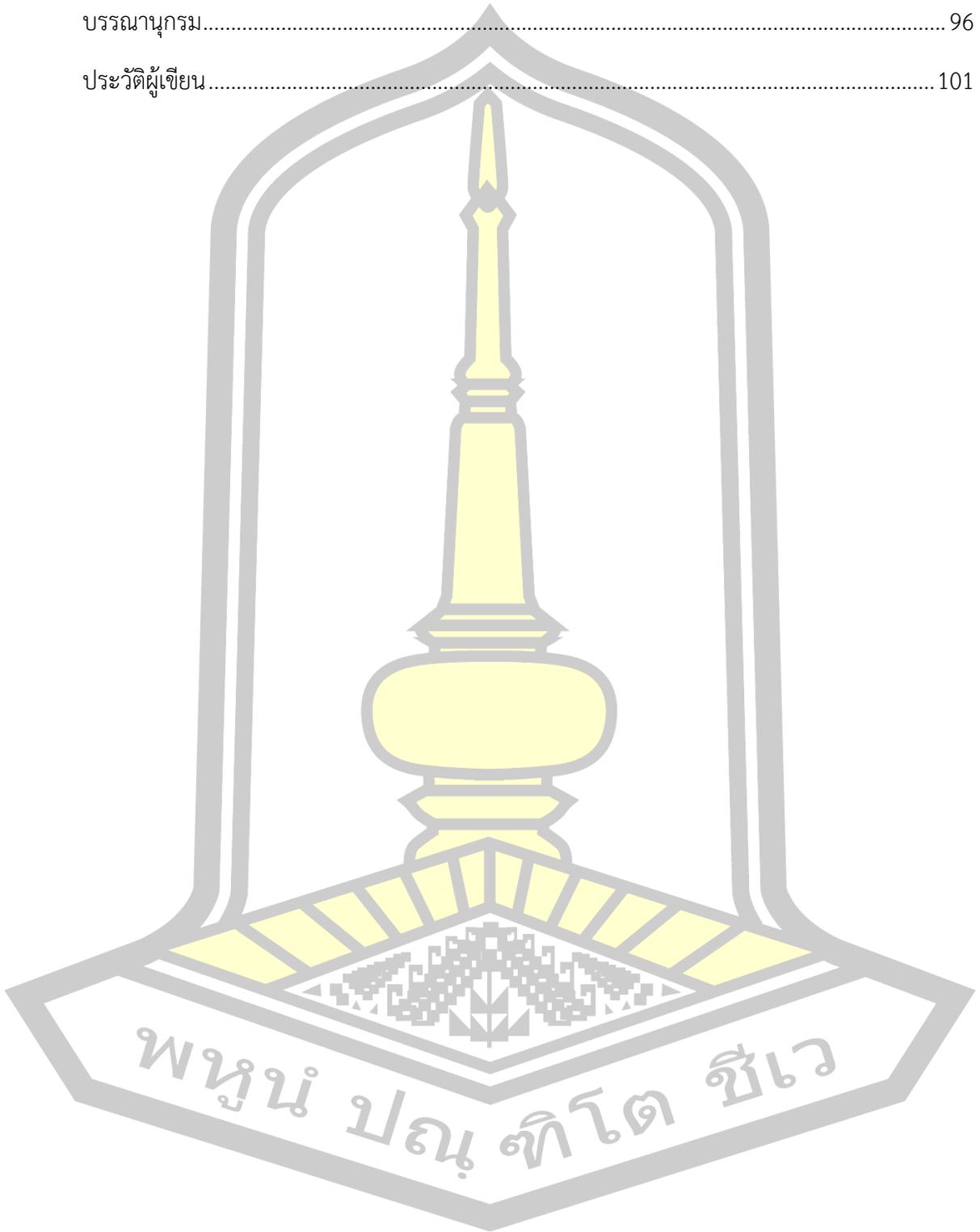
2.2.3	วิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์บวก (Positive-Target-Bias Method, PTB).....	14
2.2.4	วิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์ลบ (Negative-Plasma-Bias Method, NPB).....	15
2.3	การเคลือบสปีดเตอริง.....	16
2.3.1	หลักการของกระบวนการสปีดเตอริง.....	17
2.3.2	ค่ายึดของการสปีดเตอริง.....	18
2.3.3	ระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	19
2.4	โครงสร้างของฟิล์มบาง.....	20
2.5	หลักการตรวจวัดสมบัติของพลาสมา.....	23
2.6	หลักการตรวจวัดพลังงานของไอออน.....	25
2.6	การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบาง.....	29
2.6.1	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD).....	29
2.6.2	การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Reflectivity, XRR).....	31
2.6.2.1	ความหนาของฟิล์ม.....	32
2.6.2.2	ความหนาแน่นของฟิล์ม.....	33
2.6.2.3	ความขรุขระของพื้นผิว.....	33
2.7	การวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคหัววัด 4 จุด (Four-point probe).....	34
2.8	การวัดความแข็งของฟิล์มด้วยเทคนิค nanoindentation measurement.....	35
บทที่ 3	38
	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1	ระบบสุญญากาศ.....	39
3.1.1	การพัฒนาาระบบเคลือบฟิล์มบางแมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	39
3.1.2	ระบบสุญญากาศ.....	40
3.1.3	ขั้นตอนการเดินและหยุดระบบสุญญากาศ.....	41
3.2	การดำเนินงาน.....	43

3.2.1 การวัดอัตราการตกสะสมด้วยผลึกควอตซ์	43
3.2.2 การวัดสมบัติของพลาสมา.....	44
3.2.3 การวัดพลังงานไอออน.....	45
3.2.4 การวัดค่าความต้านทานด้วยหัววัด 4 จุด	46
3.2.5 การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์	46
3.2.5.1 การทำความสะอาดชิ้นงาน	47
3.2.5.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	48
3.3 วิธีการวิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์.....	49
3.3.1 การใช้งานเครื่อง XRD ในโหมด Grazing Incidence Diffraction (GID).....	49
3.3.2 การใช้งานเครื่อง XRD ในโหมด X-Ray Reflectometry (XRR).....	51
3.3.3 การปรับเส้นโค้งสเปกตรัม X-Ray Reflectivity.....	52
บทที่ 4.....	57
ผลการดำเนินงานวิจัย	57
4.1 ผลการศึกษาการไปอัสคักย์บวกที่ขั้วแอโนด.....	57
4.2 ผลการศึกษาอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์.....	65
4.3 ผลการศึกษาสมบัติของพลาสมาของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์	67
4.4 ผลการศึกษาพลังงานไอออนของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์.....	70
4.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์	74
4.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง TiB ₂	80
4.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง TiB ₂	88
4.8 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มบาง TiB ₂	90
บทที่ 5.....	95
สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95

5.2 ข้อเสนอแนะ 95

บรรณานุกรม..... 96

ประวัติผู้เขียน..... 101



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1. 1 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
ตาราง 1. 2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	5
ตาราง 2. 1 สมบัติเชิงกลและความร้อนของฟิล์มชนิดต่างๆ [12]	7
ตาราง 2. 2 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนและค่าความขรุขระของ TiB ₂ – Cu ที่ความค่าเข้มข้นของ ทองแดงต่างๆ [14].....	10
ตาราง 2. 3 สมบัติของการเคลือบฟิล์ม Ti/TiB ₂ [16].....	11
ตาราง 2. 4 ค่ายึดติดของการสปัตเตอร์ของธาตุแต่ละชนิด [20].....	19
ตาราง 4. 1 ความหนาของฟิล์มที่ศักย์แอโนดต่างกัน.....	79
ตาราง 4. 2 แสดงตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และขนาดของผลึก.....	85
ตาราง 4. 3 ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มที่ศักย์แอโนดต่างกัน	88
ตาราง 4. 4 แสดงค่าความหนาของฟิล์ม ค่าความต้านทานเชิงแผ่น และสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	89

พหุบัน ปณุ กิติโต ชีเว

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2. 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเข้มกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการไบอัส [13]	8
รูปที่ 2. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการไบอัส [13].....	8
รูปที่ 2. 3 เป็นการแสดงภาคตัดขวางของการเคลือบฟิล์ม Ti/TiB ₂ แบบหลายชั้น [16].....	11
รูปที่ 2. 4 (a) การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้า (b) การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า และ (c) ทิศทางของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์บวก [18].....	12
รูปที่ 2. 5 (a) การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้า (b) การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า และ (c)ทิศทางของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการไบอัสเป่าวัสดุด้วยศักย์ลบ [18].....	14
รูปที่ 2. 6 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้า การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า และทิศทางของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการไบอัสเป่าวัสดุด้วยศักย์ลบ [18].....	15
รูปที่ 2. 7 ไดอะแกรมระบบสปีดเตอริง.....	16
รูปที่ 2. 8 การเกิดปรากฏการณ์สปีดเตอริงที่เป่าวัสดุด้วยอนุภาคพลังงานสูง	18
รูปที่ 2. 9 การแสดงภาคตัดขวางของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	20
รูปที่ 2. 10 ไดอะแกรมโครงสร้างฟิล์มที่เสนอโดย Thornton [24]	21
รูปที่ 2. 11 ไดอะแกรมโครงสร้างฟิล์มที่เสนอโดย Anders [10].....	22
รูปที่ 2. 12 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของ I-V ที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดแลงเมียร์.....	23
รูปที่ 2. 13 ไดอะแกรมแนวการเคลื่อนที่ของไอออนในหัววัดพลังงานแบบสนามหมุนง	26
รูปที่ 2. 14 ฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานไอออน	27
รูปที่ 2. 15 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร์ริก	29
รูปที่ 2. 16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ [6].....	30
รูปที่ 2. 17 การสะท้อนของรังสีเอกซ์บนฟิล์มทอง [31].....	32
รูปที่ 2. 18 เส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์บน ฟิล์มทอง ทองแดง และซิลิกอนไดออกไซด์ (ความหนาฟิล์ม 20 nm) [31].....	33

รูปที่ 2. 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์กับมุม [31].....	34
รูปที่ 2. 20 การวัดค่าความต้านทานด้วยหัววัด 4 จุด [32]	35
รูปที่ 2. 21 Indentation load และ Indentation displace curve b) กระบวนการ loading-unloading และตัวแปรที่สำคัญ [34]	36
รูปที่ 3. 1 ไตอะแกรมของการดำเนินงานวิจัย.....	38
รูปที่ 3. 2 ระบบเคลือบฟิล์มบางแมกนีตรอนสปัตเตอร์จริง.....	39
รูปที่ 3. 3 ไตอะแกรมแสดงระบบสุญญากาศ.....	40
รูปที่ 3. 4 ไตอะแกรมสำหรับควบคุมการดำเนินงานของระบบ.....	41
รูปที่ 3. 5 อะแกรมแสดงการติดตั้งระบบการวัดอัตราการตกสะสม	43
รูปที่ 3. 6 ไตอะแกรมการวัดสมบัติของพลาสติก.....	44
รูปที่ 3. 7 ไตอะแกรมหัววัดพลังงานไอออน	45
รูปที่ 3. 8 (a) ไตอะแกรมการต่อหัววัดสี่จุดกับเครื่อง SMU (b) การติดตั้งหัววัด 4 จุด.....	46
รูปที่ 3. 9 ไตอะแกรมการติดตั้งอุปกรณ์เครื่อง XRD ในโหมด Grazing Incidence Diffraction (GID)	49
รูปที่ 3. 10 แลหน้าต่างของโปรแกรมสั่งการเครื่อง XRD.....	50
รูปที่ 3. 11 กราฟที่ได้จากการ Scan type Z.....	50
รูปที่ 3. 12 แลหน้าต่างการตั้งค่าสำหรับหรับการวัด XRD ในโหมด GID	51
รูปที่ 3. 13 ไตอะแกรมการติดตั้งอุปกรณ์เครื่อง XRD ในโหมด X-Ray Reflectometry (XRR).....	51
รูปที่ 3. 14 แลหน้าต่างการตั้งค่าสำหรับหรับการวัด XRD ในโหมด XRR	51
รูปที่ 3. 15 หน้าต่างแสดงตัวอย่างชั้นฟิล์มที่ระบุค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มที่ทำการจำลอง	52
รูปที่ 3. 16 หน้าต่างที่แสดงช่วงมุม 2Theta ในการวิเคราะห์ตั้งแต่ 0 ถึง 4 องศา	53
รูปที่ 3. 17 แสดงแลหน้าต่างในโหมดของอุปกรณ์ที่เลือกใช้เป็น Not used.....	53
รูปที่ 3. 18 หน้าต่างแสดงการเลือกข้อมูลที่ได้กับการจำลอง	53

รูปที่ 3. 19 หน้าต่างแสดงแถบที่ใช้กดเพื่อเริ่มการจำลอง	54
รูปที่ 3. 20 แสดงเส้นโค้งเฉพาะการจำลอง.....	54
รูปที่ 3. 21 หน้าต่างแสดงปุ่มกด Create Fit Curve.....	54
รูปที่ 3. 22 หน้าต่างแสดงข้อมูลในการกรอกก่อนการจำลอง	55
รูปที่ 3. 23 แสดงเส้นโค้งที่ได้จากการทดลอง และเส้นโค้งที่ได้จากการจำลอง	55
รูปที่ 3. 24 หน้าต่างแสดงตัวอย่างชั้นฟิล์มที่ระบุค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มที่ทำการจำลอง	56
รูปที่ 4. 1 ไดอะแกรมระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบหัวเดียว.....	58
รูปที่ 4. 2 ฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เงื่อนไข (a) ศักย์แอโนด 100 V (b) ศักย์แอโนด 125 V และ (c) ศักย์แอโนด 100 V และ 125 V เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง	58
รูปที่ 4. 3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เงื่อนไขศักย์แอโนดไบอัส 0 25 50 และ 75 V	59
รูปที่ 4. 4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดงภาพภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เงื่อนไขศักย์แอโนดไบอัส 0, 25, 50 และ 75 V.....	60
รูปที่ 4. 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์.....	61
รูปที่ 4. 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์เทียบกับศักย์แอโนด	62
รูปที่ 4. 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดหับความลึกของหัวกดของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0, 25, 50 และ 75 V	63
รูปที่ 4. 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และสภาพยืดหยุ่นของแข็งเทียบกับศักย์แอโนดไบอัส.....	64
รูปที่ 4. 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานไอออนที่ตำแหน่งสูงสุดของพีคเทียบกับศักย์แอโนดไบอัส.....	65
รูปที่ 4. 10 อัตราการตกสะสมของเป้า TiB_2 ที่กำลังไฟฟ้า และศักย์แอโนดต่างกัน.....	66
รูปที่ 4. 11 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า	67

รูปที่ 4. 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับสองของกระแสและศักย์ไฟฟ้าของหัววัด เทียบกับศักย์ไฟฟ้าของหัววัด	68
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ลอยและศักย์พลาสมาเทียบกับศักย์แอโนดที่ต่างกัน	69
รูปที่ 4. 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ลอยและศักย์พลาสมาเทียบกับกำลังไฟฟ้าต่างกัน	69
รูปที่ 4. 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ลอยและศักย์พลาสมา ความดันแก๊สต่างกัน	70
รูปที่ 4. 16 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานไอออนที่ศักย์แอโนดต่างกัน	71
รูปที่ 4. 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนกับพลังงานของไอออน เทียบกับศักย์แอโนดที่ค่าต่างกัน	72
รูปที่ 4. 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนกับพลังงานของไอออนเทียบกับ กำลังไฟฟ้าที่ค่าต่างกัน	73
รูปที่ 4. 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนกับพลังงานของไอออน เทียบกับความดันแก๊สขณะเคลือบ	73
รูปที่ 4. 20 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางบนแผ่นซิลิกอนที่ เคลือบด้วยเงื่อนไขการปรับค่าศักย์แอโนด	75
รูปที่ 4. 21 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดง (a) พื้นผิว (b) ภาคตัดขวางและความหนาของ ฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 V บนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100)	76
รูปที่ 4. 22 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดง (a) พื้นผิว (b) ภาคตัดขวางและความหนาของ ฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V บนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100)	77
รูปที่ 4. 23 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดง (a) พื้นผิว (b) ภาคตัดขวางและความหนาของ ฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 150 V บนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100).....	78
รูปที่ 4. 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มชั้น Ti interlayer, TiB ₂ layer และ ผลรวมความหนาของทั้ง 2 ชั้น ที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0, 75 และ 150 V	79
รูปที่ 4. 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเป่าวัสดุไทเทเนียมโบรด์	80
รูปที่ 4. 26 ปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 V.....	81

รูปที่ 4. 27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 25 V	81
รูปที่ 4. 28 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 50 V	82
รูปที่ 4. 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V	82
รูปที่ 4. 30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 125 V	83
รูปที่ 4. 31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 150 V	83
รูปที่ 4. 32 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเป้า TiB_2 และฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนดต่างๆ	84
รูปที่ 4. 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดพีคที่ระนาบ 001 และขนาดของผลึกเทียบกับศักย์แอโนดที่ต่างกัน	85
รูปที่ 4. 34 รูปแบบเส้นโค้งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ และเส้นโค้งที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Leptos 7	86
รูปที่ 4. 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์เทียบกับศักย์แอโนดที่ค่าต่างกัน	87
รูปที่ 4. 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางเทียบกับค่าศักย์แอโนดที่ต่างกัน	89
รูปที่ 4. 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเทียบกับเงื่อนไขฟิล์มบาง $TiB0$ $TiB75$ และ $TiB150$	90
รูปที่ 4. 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของห้วงของฟิล์มบาง $TiB0$	91
รูปที่ 4. 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของห้วงของฟิล์มบาง $TiB25$	91
รูปที่ 4. 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของห้วงของฟิล์มบาง $TiB50$	92
รูปที่ 4. 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของห้วงของฟิล์มบาง $TiB75$	92
รูปที่ 4. 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของห้วงของฟิล์มบาง $TiB125$	93
รูปที่ 4. 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของห้วงของฟิล์มบาง $TiB150$	93
รูปที่ 4. 44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และสภาพยืดหยุ่นของแข็งเทียบกับศักย์แอโนดไปอัสที่ต่างกัน	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

ในปัจจุบันฟิล์มบางถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เซลล์แสงอาทิตย์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น สำหรับกระบวนการที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบาง แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการเคลือบด้วยไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) และกระบวนการเคลือบด้วยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition, PVD) ซึ่งการที่จะนำฟิล์มบางมาใช้ประโยชน์ให้ได้ประสิทธิภาพ และเหมาะกับการใช้งานตามสมบัติของฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกได้เป็น สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงไฟฟ้า และสมบัติเชิงแสง นอกจากนี้ฟิล์มบางยังถูกนำมาเคลือบเพื่อความสวยงาม ทำให้มูลค่าของสิ่งนั้นๆ เพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางจากเป่าวัสดุไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) ที่มีสมบัติเชิงกล และเชิงเคมีที่ดี ซึ่งไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) จัดเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุไทเทเนียม (Ti) [1] ที่มีความแข็งที่สูง มีความเหนียว ความหนาแน่นต่ำ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม และมีน้ำหนักเบา เนื่องจากไทเทเนียมเป็นธาตุที่มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 60% ของความหนาแน่นเหล็ก ทำให้สามารถที่จะปรับปรุงสมบัติที่มีอยู่เดิมให้ดียิ่งขึ้นได้ด้วยการเจือซึ่งธาตุที่นำมาเจือคือโบรอน (B) [2] เป็นสารกึ่งโลหะ โบรอนพบมากในแร่บอแรกซ์ ซึ่งมี 2 อัญรูป ได้แก่ amorphous boron เป็นผงสีน้ำตาล และ metallic boron มีสีดำ รูปแบบที่เป็นโลหะมีความแข็งมาก (9.3 บนมาตราของโมห์) แต่นำไฟฟ้าได้ไม่ดีที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ธาตุโบรอนช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้แก่เหล็กที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป ทำให้ส่วนใจกลางของชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กชุบผิวแข็ง มีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยโบรอนสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงนิยมเติมในเหล็กที่ทำฉากกั้นอุปกรณ์นิวเคลียร์ [3] ซึ่งไทเทเนียมไดโบไรด์ จัดเป็นธาตุประกอบที่อยู่ในกลุ่มเซรามิกโดยที่โบรอนสร้างพันธะโควาเลนต์กับไทเทเนียม และมีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม ซึ่งมีสมบัติเชิงกลและเคมีที่ยอดเยี่ยม เช่น ความแข็งที่สูง ความทนทานต่อการกัดกร่อนเชิงกล การมีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง การนำไฟฟ้าและความร้อนได้สูง และมีเสถียรภาพทางเคมี [4-6] ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ แต่การใช้งานในปัจจุบันยังจำกัดอยู่เฉพาะบางสายงานเท่านั้น เช่น เกาะป้องกันแรงกระแทก อุปกรณ์ตัดเฉาะ และสารเคลือบป้องกันการสึกหรอ [6] แต่ยังมีข้อเสียเปรียบของการเคลือบฟิล์ม

ไทเทเนียมไดโบไรด์ เช่น ความเปราะ การยึดติดกับชิ้นงานที่ต่ำเนื่องจากความเค้นตกค้างสูง ซึ่งปัญหานี้อาจส่งผลต่อการหลุดลอกของฟิล์ม และยังส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของฟิล์มบาง จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีนักวิจัยหลายคนได้พยายามศึกษาการเพิ่มการยึดเกาะของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ BERGER et al. [7] พบว่าระหว่างการผลิตฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ ถ้าทำการไปอัสชิ้นงานแบบพัลส์ จะทำให้การยึดเกาะของฟิล์มกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น 60% เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ทำการไปอัส BOHWAN et al. [8] พบว่าชั้นไนไตรด์สามารถปรับปรุงการยึดเกาะของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์บน H13 steel ตัวอย่างการยึดเกาะของฟิล์ม TiN [9] ที่ได้รับการปรับปรุงเป็น Ti/TiN ซึ่งชั้นฟิล์ม Ti (โลหะไทเทเนียม) ถูกพิจารณาว่าเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ในการเชื่อม และพยายามที่จะทำการยึดติดระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม ในงานวิจัยของ André Anders [10] พลังงานไอออนเป็นปัจจัยสำคัญต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบาง ในกรณีการไปอัสพลาสมา รูปแบบของชั้นหุ้มพลาสมาระหว่างชิ้นงานกับพลาสมามีแนวโน้มของความต่างศักย์ที่ลดลง ส่งผลให้อิเล็กตรอนถูกผลักและกลับไปยังพลาสมา ในขณะที่ไอออนถูกเร่งไปยังพื้นผิวของชิ้นงาน [11]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับขั้วแอโนด ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพลาสมา และพลังงานไอออนของแก๊สอาร์กอนด้วยหัววัดแลงเมียร์ และด้วยเทคนิค Retarding Field Analyzer (RFA) ตามลำดับเพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้าง และลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มบาง TiB_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Reflection, XRR) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ส่วนสมบัติทางไฟฟ้าวิเคราะห์ด้วยเทคนิคหัววัดสี่จุด (Four Point Probe) และสมบัติเชิงกลเพื่อวัดความแข็งของฟิล์มด้วยเทคนิค Nanoindentation

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลจากการปรับค่าศักย์แอโนดไปอัส ที่ส่งผลต่อสมบัติของพลาสมา และอิทธิพลของพลังงานไอออนต่อโครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับขั้วแอโนด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับขั้วแอโนด จากเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

- ตัวแปรควบคุม
 1. ระยะห่างระหว่างเป้าวัสดุกับฐานวางชิ้นงาน 10 cm
 2. ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง Pinnacle จ่ายให้กับหัวแมกนีตรอน
 3. ใช้แก๊สอาร์กอนในการแตกตัวเป็นพลาสมา
 4. อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 20 sccm
 5. กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม TiB_2 200 W
 6. ความดันแก๊สอาร์กอนขณะเคลือบฟิล์ม 5 mTorr
- ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง
 1. ศักย์ไฟฟ้าแอโนดไบอัส 0 +25 +50 +75 +125 และ +150 V สำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์
 2. ศักย์ไฟฟ้าแอโนดไบอัส 0 +25 +50 +75 +100 +125 และ +150 V สำหรับการวัดค่าพลังงานไอออน
- ตัวแปรตาม
 1. กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าในการดิสชาร์จ
 2. กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับฐานวางชิ้นงาน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถแสดงให้เห็นว่าการไบอัสศักย์บวกที่ขั้วแอโนด สามารถเพิ่มพลังงานของไอออนได้ เช่นเดียวกับการไบอัสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน
2. สามารถเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์จากการปรับศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดได้
3. ได้เรียนรู้ขั้นตอนและเทคนิคในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา (ห้อง SC1-211) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ลำดับ	แผนการทำงาน	ภาคเรียน ที่ 1/2562		ภาคเรียน ที่ 2/2562		ภาคเรียน ที่ 1/2563		ภาคเรียน ที่ 2/2563	
		M ₄	M ₅	M ₁	M ₂	M ₄	M ₅	M ₁	M ₂
11	วัดความแข็งของฟิล์มบาง TiB ₂ ด้วย เทคนิค nanoindentation								
12	เขียนต้นฉบับ (manuscript) บทความวิทยานิพนธ์								
13	เขียนรายงานการวิจัยบทที่ 4 ถึง 5								
14	ส่งบทความวิจัยตีพิมพ์								
15	ขออนุญาตสอบวิทยานิพนธ์								

หมายเหตุ M₁ = มกราคม ถึง กุมภาพันธ์, M₂ = มีนาคม ถึง เมษายน,

M₃ = พฤษภาคม ถึง มิถุนายน, M₄ = กรกฎาคม ถึง สิงหาคม

M₅ = กันยายน ถึง ตุลาคม, M₆ = พฤศจิกายน ถึง ธันวาคม

1.7 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ตาราง 1. 2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

รายการ	หมายเหตุ
เครื่อง X - ray diffraction	วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ เทคนิค XRR
เครื่อง Nanoindentation	วัดความแข็งของฟิล์ม
หัววัด 4 จุดแบบเชิงเส้น	วัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์ม
เครื่อง SEM	ถ่ายภาพพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม
หัววัดแลงเมียร์	วัดสมบัติของพลาสมา
หัววัดพลังงานไอออน	วัดพลังงานไอออน

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ด้วยการไปอัสที่ชั่วแอนด์ โดยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึง ทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ด้วยเทคนิคต่างๆ และเทคนิคตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เทคนิคการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Reflection, XRR) และ nanoindentation measurement ตามลำดับ การศึกษาพลังงานไอออนด้วยเทคนิค Retarding Field Analyzer (RFA) และ การศึกษาสมบัติของพลาสมาด้วยหัววัดแสงเมียร์

2.1 ทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในโลกปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยี และอุปกรณ์ต่างๆมีความทันสมัยและก้าวหน้าเป็นอย่างมากเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ที่มากขึ้น ทำให้มีการคิดค้นเทคนิคที่มีความแปลกใหม่ และหลากหลายอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการศึกษาสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้งานจริงด้วย ซึ่งการเคลือบฟิล์มบางเป็นอีกหนึ่งหัวข้อที่มีความน่าสนใจในปัจจุบันเป็นอย่างมาก โดยมีงานวิจัยที่ได้รับการยอมรับจนมีการต่อยอดเป็นองค์ความรู้ต่างๆขึ้นมา เพื่อศึกษาให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น สำหรับในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็ง การทนต่อการกัดกร่อน และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำ โดยสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้เหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ตัดเจาะ และแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปต่างๆ

จากวรรณกรรมของ Sundgren และ Hentzell [12] ได้เสนอความคิดเห็นเกี่ยวกับการเคลือบแข็ง สำหรับวัสดุที่อยู่ในช่วง Ultrahard เช่น คาร์บอนคล้ายเพชร (diamondlike carbon, DLC) และเซรามิก อย่างไรก็ตามโลหะทรานซิชันที่มีส่วนประกอบของคาร์ไบด์ และไนไตรด์ ประสบความสำเร็จและถูกนำมาใช้งานมากที่สุด เนื่องจาก สมบัติที่มีความโดดเด่นในด้าน ความแข็ง การต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม มีค่าใช้จ่ายที่สูงในการซื้อเข้าวัสดุ และใช้ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มที่นานเพื่อให้ได้ความหนาที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง นอกจากนี้สมบัติเชิงกล สัมประสิทธิ์ทางความร้อน ยังถูกเปิดเผย และเปรียบเทียบสำหรับ โลหะคาร์ไบด์ ไนไตรด์ เซรามิก และโลหะ ดังตารางที่ 2.1

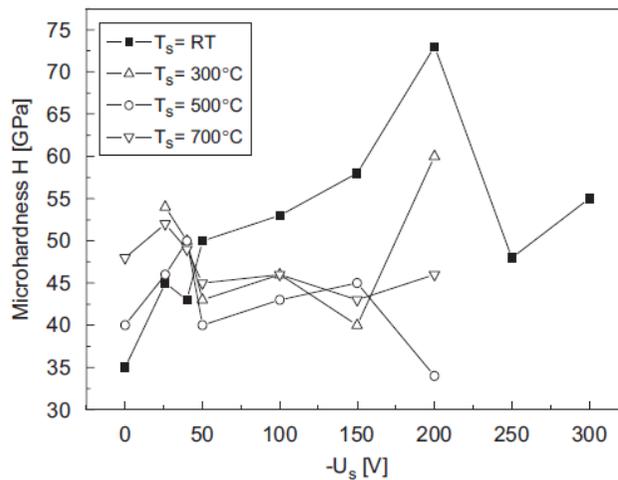
ตาราง 2. 1 สมบัติเชิงกลและความร้อนของฟิล์มชนิดต่างๆ [12]

Material	Young's Modulus (kN.mm ⁻²)	Poisson's ratio	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Vicker Hardness (kg.mm ⁻²)	Melting or decomposition temperature (°C)
Coatings					
TiC	450	0.19	7.4	2900	3067
HfC	464	0.18	6.6	2700	3928
TaC	285	0.24	6.3	2500	3983
WC	695	0.19	4.3	2100	2776
Cr ₃ C ₂	370	...	10.3	1300	1810
TiN	9.35	2000	2949
Al ₂ O ₃	400	0.23	9.0	2000	2300
TiB ₂	480	...	8.0	3370	2980
Substrates					
94WC-6Co	640	0.26	5.4	1500	...
High speed steels	250	0.3	12-15	800 – 1000	...
Al	70	0.35	23	30	658

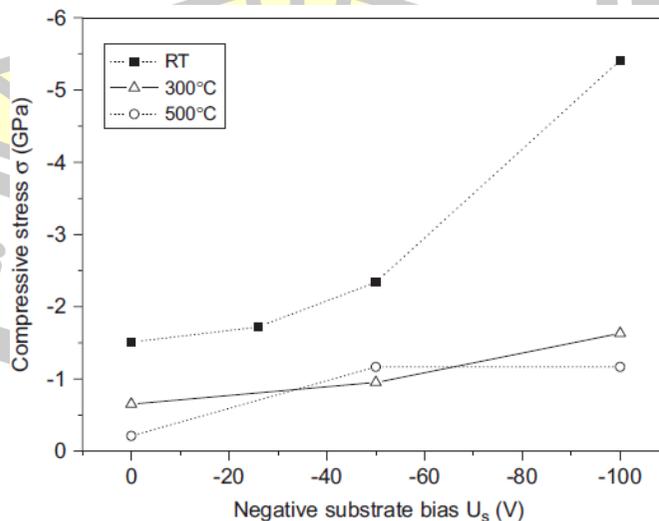
จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงสมบัติเชิงกล และการทนต่อความร้อนของวัสดุต่างๆ พบว่า วัสดุแผ่นฐานที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคลือบแข็ง เช่น stainless steel มีความแข็งที่ 1000 kg.mm⁻² ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าสารเคลือบแข็งอย่างชัดเจน ดังนั้นงานด้านการขึ้นรูปโลหะ อุปกรณ์เหล่านี้จึงจำเป็นต้องได้รับการปกป้อง และเพิ่มคุณสมบัติเชิงพื้นผิว โดยใช้โลหะคาร์ไบด์ เช่น TiC WC และ TiN อย่างไรก็ตาม สำหรับฟิล์ม TiB₂ มีความแข็งที่สูงกว่า โลหะคาร์ไบด์อย่างชัดเจน และยังทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของฟิล์มชนิดนี้ เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานที่มีความหลากหลาย เช่น การทำชุดเการะ อุปกรณ์ตัดเจาะ แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูป (ชิ้นส่วนยานยนต์) สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์ม

ไทเทเนียมไดโอบไรด์มีเอกสารอ้างอิง ถึงเทคนิคหรือกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มชนิดนี้ที่จะได้กล่าวเป็นลำดับถัดไป

Mikula และคณะ [13] ได้ทำการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบไรด์ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าลบที่ใช้ในการไบอัสขึ้นงาน (U_s เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง -300 V) และการให้ความร้อนกับขึ้นงาน (T_s เพิ่มขึ้นจาก (อุณหภูมิห้อง Room temperature, RT) ถึง 700°C) จากการทดลองพบว่าความแข็งของฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขมีค่าตั้งแต่ 34 GPa และความแข็งสูงสุดที่วัดได้คือ $H_v \approx 73$ GPa ที่เงื่อนไข $U_s = -200$ V และ $T_s = RT$ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความแข็งและความเค้นของฟิล์มได้จากรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการไบอัส [13]



รูปที่ 2. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการไบอัส [13]

จากรูปที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในการไบอัส เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ศักย์ไฟฟ้าไบอัส และอุณหภูมิตกสะสม มีผลอย่างมากต่อความแข็งของฟิล์ม TiB_2 โดยที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มจะมีความแข็งที่แตกต่างกันมากที่สุด โดยที่ความแข็งสูงสุด 75 GPa ซึ่งใช้ศักย์ไฟฟ้า -200 V ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิตกสะสม ไม่ได้มีความแตกต่างของความแข็งมากนัก รูปที่ 2.2 แสดงค่าความเค้นจากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการไบอัสซึ่งที่อุณหภูมิห้องมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการไบอัสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่วัดได้คือ ยิ่งฟิล์มมีค่าความเค้นที่มากจะบ่งบอกถึงความแข็งของฟิล์มที่มากขึ้นด้วย แต่ข้อเสียของฟิล์มที่มีความเค้นสูงคือฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการยึดติดกับตัวมันได้ดี แต่ยึดติดกับวัสดุอื่นได้ไม่ดี จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในการไบอัส และอุณหภูมิของชิ้นงานมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์

ในปี ค.ศ. 2018 Ding และคณะ [14] ได้ทำการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) ด้วยการเจือทองแดง (Cu) ในกระบวนการเคลือบ โดยใช้แหล่งจ่ายไฮฟิมส์ (HiPIMS) กับเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ ส่วนแหล่งจ่ายพัลส์ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (PDCMS) ใช้กับเป้าทองแดง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์ม โครงสร้างระดับจุลภาค และสมบัติเชิงกลของฟิล์ม $TiB_2 - Cu$ จากผลการทดลองได้ระบุว่าฟิล์ม TiB_2 เพียงอย่างเดียวแสดงโครงสร้างที่เป็นแบบคอลัมน์นาร์ และปรากฏระนาบ (001) ของไทเทเนียมไดโบไรด์ ในขณะที่มีการเจือทองแดงที่ทำให้พบพีคที่ระนาบ (001) น้อยลง และยังส่งผลต่อขนาดของคอลัมน์นาร์มีขนาดใหญ่ขึ้น และไม่แสดงลักษณะของคอลัมน์นาร์ที่ปริมาณของทองแดงเป็น 11.9 at% นอกจากนี้ฟิล์มทั้งหมดได้รับการตรวจสอบลักษณะเชิงผิวโดยเทคนิค AFM ค่าความขรุขระเฉลี่ยประมาณ 3 nm เมื่อปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 19.2 at% ค่าความแข็งของฟิล์มแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงแรก แล้วลดลงอย่างมากจาก 32 GPa ถึง 18 GPa เมื่อความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้น

พหุบัน ปณ สก โตะ ชีเว

ตาราง 2. 2 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนและค่าความขรุขระของ TiB₂ – Cu ที่ความค่าเข้มข้นของทองแดงต่างๆ [14]

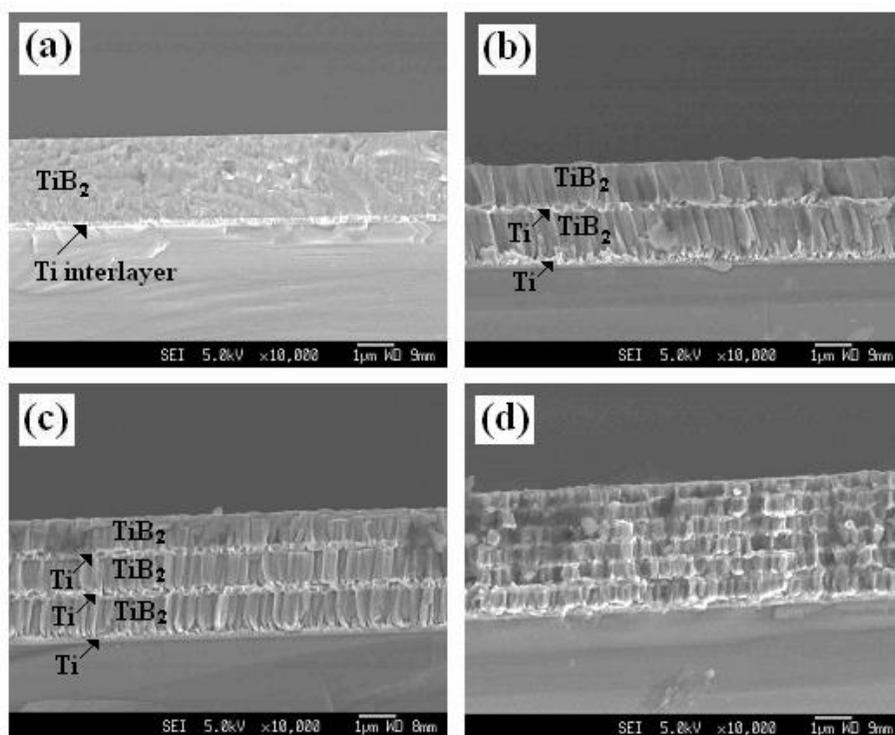
Cu content (at. %)	Grain size (nm)	RMS roughness (nm)
0	9.2	3.5
4.5	6.9	3.4
7.6	6.4	3.3
11.9	5.7	2.9
17.5	4.2	2.8
19.2	4.7	2.4

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการเติมทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทองแดงมากขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดเกรน และความขรุขระของฟิล์มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งขนาดของเกรนสามารถบ่งบอกถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุได้ ยกตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้อง ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเกรนลดลง [15]

Panich และคณะ [16] ได้ทำการเคลือบฟิล์ม Ti/TiB₂ แบบหลายชั้นบนชิ้นงาน HSS โดยใช้โลหะไทเทเนียมเป็นชั้นรองพื้น ซึ่งแบ่งเป็น 4 โครงสร้างหลักดังนี้

1. การเคลือบ Ti – TiB₂ แบบชั้นเดียว
2. การเคลือบ Ti – TiB₂ เป็นการเคลือบสลับกันทั้งหมด 4 ชั้น
3. การเคลือบ Ti – TiB₂ เป็นการเคลือบสลับกันทั้งหมด 6 ชั้น
4. การเคลือบ Ti – TiB₂ เป็นการเคลือบสลับกันทั้งหมด 12 ชั้น

พบว่าฟิล์มยังคงรักษาความแข็ง และมีการยึดติดของฟิล์มแบบหลายชั้นกับแผ่นฐานมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากชั้น Ti ซึ่งเป็นชั้นอ่อนนุ่ม (Soft layer) สามารถช่วยลดความเค้นระหว่างชั้นฟิล์ม TiB₂ กับแผ่นฐานได้



รูปที่ 2.3 เป็นการแสดงภาคตัดขวางของการเคลือบฟิล์ม Ti/TiB₂ แบบหลายชั้น [16]

ตาราง 2.3 สมบัติของการเคลือบฟิล์ม Ti/TiB₂ [16]

Samples	Layers	Coating Thickne ss (µm)	Average Roughness R _a (nm)	Hardnes s (GPa)	Reduced Modulus (GPa)	Critical load L _c (mN)
No.1	2 layers	2.20	2.33	34.3±1.2	329.5±4.2	1,240
No.2	4 layers	2.52	15.49	33.4±0.9	340.2±5.2	1,855
No.3	6 layers	3.10	18.18	35.6±2.2	365.4±7.2	1,995
No.4	12 layers	3.42	20.61	20.61	216.4±2.5	1,650

จากตารางที่ 2.3 ได้แสดงผลของการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์แบบหลายชั้น สรุปได้ว่าฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ค่ามอดูลัสมีค่าน้อยสำหรับฟิล์ม Ti/TiB₂ แบบ 12 ชั้นเคลือบ แสดงถึงฟิล์มมีการยึดหยุ่นที่ดี และมีการยึดติดกับแผ่นฐานได้ดีกว่าฟิล์มเงื่อนไขอื่น

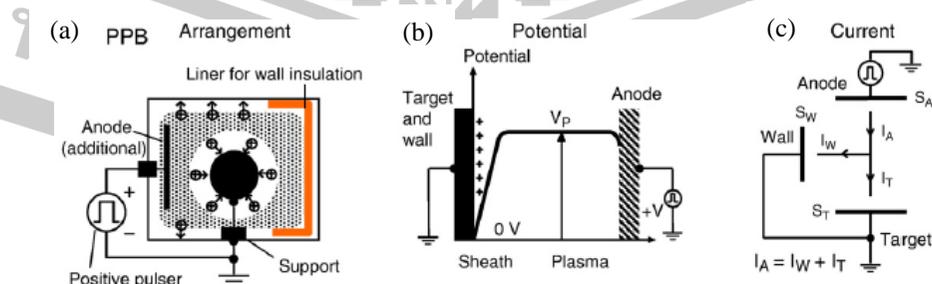
จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำเสนอแนวคิด วิธีการ กระบวนการ และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์ม TiB_2 ได้แก่ การไบอัสศักย์ลบที่ชิ้นงาน อุณหภูมิของชิ้นงาน ความดันแก๊สขณะเคลือบฟิล์ม การมีชั้นรองพื้นก่อนการเคลือบฟิล์ม และการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์แบบหลายชั้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์โดยตรง ทำให้ในงานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอเทคนิคการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์แบบใหม่ คือการไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนดเพื่อควบคุมพลังงานของไอออนในการตกสะสม รวมถึงพัฒนาการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ให้มีความแข็งที่สูงขึ้น

2.2 หลักการของการไบอัส

โดยทั่วไป การไบอัสในทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ การตั้งค่าเงื่อนไขการทำงานเริ่มต้น (การปรับกระแส หรือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า) ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และหลอดสุญญากาศ [17] ในลักษณะเดียวกัน การไบอัสศักย์ไฟฟ้าในงานทางด้านเคลือบฟิล์มบาง คือ การจ่ายศักย์ไฟฟ้าไปยังเป้าวัสดุ หรือชิ้นงานเพื่อต้องการสร้างสนามไฟฟ้าในการเร่งอิเล็กตรอนหรือไอออนให้เคลื่อนที่ออกมาจากพลาสมา ด้วยพลังงานตามที่กำหนด Ikehata และคณะ [18] ได้แบ่งวิธีแบบการไบอัสศักย์ไฟฟ้า เป็น 4 วิธี

2.2.1 วิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์บวก (Positive-Plasma-Bias Method, PPB)

โดยปกติแหล่งกำเนิดแมกนีตรอนสปัตเตอร์ประกอบด้วยขั้วแคโทด และขั้วแอโนด (กราวด์) ซึ่งหากต้องการเพิ่มพลังงานไอออน จำเป็นต้องใช้วิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์บวก ที่ซึ่งมีการเพิ่มขั้วไฟฟ้าเข้ามาในระบบอีกหนึ่งขั้ว คือขั้วแอโนด ซึ่งขั้วไฟฟ้างกล่าวได้รับการไบอัสศักย์บวก (ศักย์ไฟฟ้า $V > 0$ V) ในขณะเดียวกันเป้าและผนังภาชนะสุญญากาศเป็นขั้วแคโทด เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับวิธีการ PPB มาจากแบบจำลอง asymmetric double probe [19] ที่สามารถอธิบายการติดตั้งขั้วไฟฟ้าและการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (a) การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้า (b) การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า และ (c) ทิศทางของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์บวก [18]

จากรูปที่ 2.4 (c) พบว่ากระแสที่ไหลผ่านขั้วแอโนดเป็นผลรวมของ กระแสที่ผนังภาชนะสุญญากาศ กับกระแสที่เป้า ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$I_A = S_A J_{es} \left\{ -\frac{e(V_p - V)}{kT_e} \right\} + S_A J_{is} \approx S_A J_{es} \left\{ -\frac{e(V_p - V)}{kT_e} \right\} \quad (2.1)$$

$$I_W + I_T = (S_W + S_T)(1 + \gamma) J_{is} = 0.61(S_W + S_T)(1 + \gamma) enu_B \quad (2.2)$$

โดยที่ J_{es} คือ ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนอิมิตัว

J_{is} คือ ความหนาแน่นกระแสไอออนอิมิตัว

k คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K

T_e คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

u_B คือ ความเร็วของโบรม, $u_B = \sqrt{T_e/m_i}$

γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ขั้วแคโทด

S_W คือ พื้นที่ของผนังภาชนะสุญญากาศ

S_T คือ พื้นที่ของเป้า

S_A คือ พื้นที่ของขั้วแอโนด

ในกรณีเป้าและผนังภาชนะสุญญากาศทำจากวัสดุเดียวกัน กระแสที่ขั้วแอโนดเป็น $I_A = I_W + I_T$

$$\frac{V_p - V}{kT_e / e} = \ln \left\{ \frac{S_A J_{es}}{0.61(S_W + S_T)(1 + \gamma) enu_B} \right\} \quad (2.3)$$

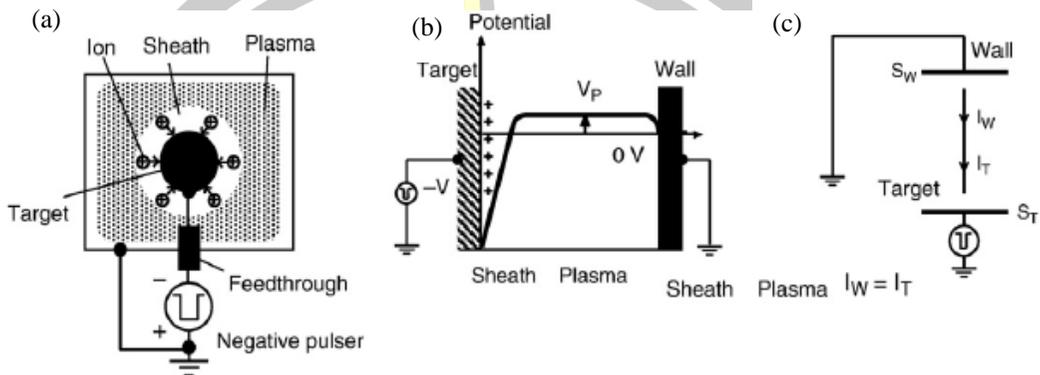
เนื่องจากวิธีการ PPB ต้องการ $V_p - V \geq 0$ และ $J_{es} = (1/4)en\bar{v}_e = (1/4)en(8kT_e / \pi m_e)^{1/2}$ เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับวิธี PPB เขียนได้เป็น

$$(S_W + S_T) / S_A \leq 0.65(m_i / m_e)^{1/2} / (1 + \gamma) \equiv \sigma_c \quad (2.4)$$

เพื่อให้สมการที่ (2.4) เป็นไปตามเงื่อนไขของวิธี PPB จำเป็นต้องลดพื้นที่ของผนังภาชนะสุญญากาศ S_W โดยการใช้นวณหุ้มพื้นผิวผนังภาชนะสุญญากาศ

2.2.2 วิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์ลบ (Negative-Target-Bias Method, NTB)

สำหรับวิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์ลบมีการติดตั้งอุปกรณ์คล้ายกับวิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์บวก แต่ไม่มีขั้วไฟฟ้าเสริมที่ใช้ในการไบอัสสามารถอธิบายการติดตั้งขั้วไฟฟ้าและการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 (a) การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้า (b) การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า และ (c) ทิศทางของกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์ลบ [18]

โดยที่กระแสของ I_w และ I_T สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.5)

$$I_w = S_w J_{es} \exp\left\{-\frac{eV_p}{kT_e}\right\} \tag{2.5}$$

$$I_T = S_T (1 + \gamma) J_{is} = 0.61 S_T (1 + \gamma) enu_B \tag{2.6}$$

จากเงื่อนไขความต่อเนื่องของกระแสที่ $I_w = I_T$ และสัมพันธ์กับ $V_p \geq 0$ จะได้ว่า

$$S_T / S_w \leq 0.65 (m_i / m_e)^{1/2} / (1 + \gamma) \equiv \sigma_c \tag{2.7}$$

จากสมการที่ (2.7) สำหรับวิธี NTB เนื่องจาก $\sigma_c > 1$ ในขณะที่กรณีส่วนใหญ่ $S_T / S_w \ll 1$ สิ่งนี้สามารถยืนยันได้จากที่ชั้นหุ้มไอออนและศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่เป้าวัสดุ

2.2.3 วิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์บวก (Positive-Target-Bias Method, PTB)

มีลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์แบบเดียวกันกับวิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์ลบแต่สลับการจ่ายศักย์ไฟฟ้า ทำให้ที่หัวแมกนีตรอนทำหน้าที่ในการเร่งอิเล็กตรอน สามารถอธิบายการติดตั้งขั้วไฟฟ้าและการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.6 โดยที่กระแส I_w และ I_T สามารถเขียนได้เป็น

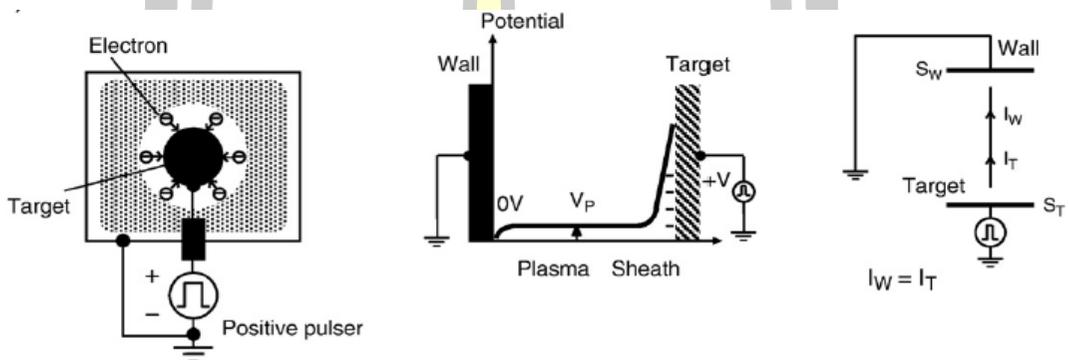
$$I_w = S_w (1 + \gamma) J_{is} \tag{2.8}$$

$$I_T = S_T J_{es} \exp\left\{-\frac{e(V_p V)}{kT_e}\right\} \quad (2.9)$$

จากความสัมพันธ์ $I_W = I_T$ และเมื่อ $V_p - V \ll 0$ จะได้ว่า

$$S_W / S_T \gg \sigma_c \approx 0.65(m_i / m_e)^{1/2} \quad (2.10)$$

โดยหาก $\gamma = 0$ จะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าพลาสมา และพลังงานไอออนมีค่าลดลง



รูปที่ 2. 6 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้า การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า และทิศทางของกระแสไฟฟ้า ด้วยวิธีการไบอัสเป้าวัสดุด้วยศักย์ลบ [18]

2.2.4 วิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์ลบ (Negative-Plasma-Bias Method, NPB)

สำหรับวิธีการไบอัสพลาสมาด้วยศักย์ลบ (NPB) คือวิธีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบให้กับพลาสมา โดยการเพิ่มขั้วไฟฟ้าโดยมีพื้นที่ S_A ที่อยู่ในสถานะเป็นกราวด์ทางไฟฟ้า ซึ่งคาดว่าศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา ต่ำลงกว่า $V_A (< 0)$ และชั้นหุ้มอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นบริเวณเป้าวัสดุ โดยกระแส I_A , I_W และ I_T เป็นดังนี้

$$I_A = S_A (1 + \gamma) J_{is} = 0.61 S_A (1 + \gamma) e n u_B \quad (2.11)$$

$$I_W + I_T = (S_W + S_T) J_{is} \exp\left\{-\frac{eV_p}{kT_e}\right\} \quad (2.12)$$

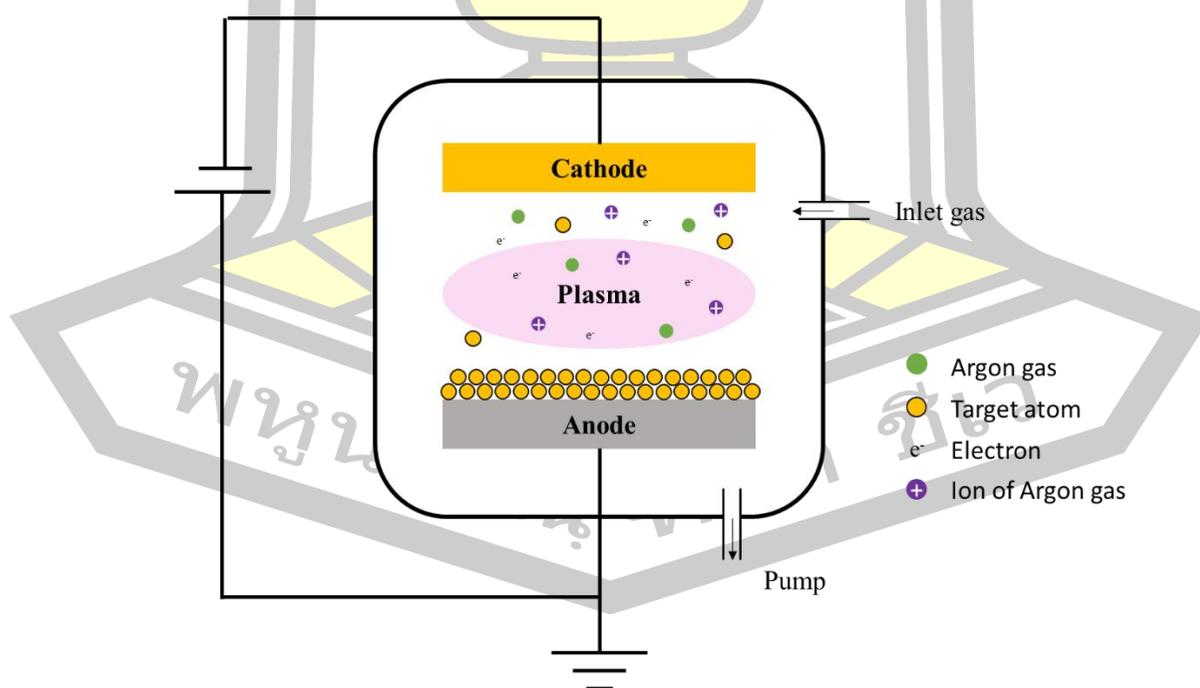
จากความต่อเนื่องของกระแส $I_A = I_W + I_T$ และ $V_A \ll 0$ เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับวิธี NPB คือ

$$S_A / (S_W + S_T) > \sigma_c \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) เนื่องจาก $\sigma_c \gg 1$ จึงเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ในขณะที่ความเป็นจริงแล้ว $S_A / (S_W + S_T) < 1$ ดังนั้นวิธีการ NPB ถูกนำมาใช้ในทางปฏิบัติน้อย

2.3 การเคลือบสปีดเตอริง

เทคนิคการเคลือบแบบสปีดเตอริง เป็นหนึ่งในเทคนิคการเคลือบด้วยไอเชิงกายภาพ ซึ่งไอของสารเคลือบเกิดจากการระดมชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการระดมชนนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมจากอนุภาคที่พุ่งชนให้กับอะตอมของเป้าวัสดุ ทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกกลายเป็นอะตอมอิสระ และตกสะสมบนชิ้นงานเป็นฟิล์มบาง โดยทั่วไปการสปีดเตอริงจะเกิดที่ความดันต่ำ (< 5 mTorr) ในการทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริง ในทางตรงกันข้ามถ้าเพิ่มปริมาณแก๊สในระบบเพื่อให้ได้ความดันในช่วง ($5 - 50$ mTorr) จะทำให้เกิดการสปีดเตอริงน้อยลง เนื่องจากความหนาแน่นของแก๊สสูงส่งผลให้เกิดการชนกันระหว่างอะตอมแก๊สในระบบ และสูญเสียพลังงาน ดังนั้นโอกาสที่กระสุนไอออนจะไประดมชนกับเป้าวัสดุน้อยลง ไม่เพียงแต่ปัจจัยของความดันเท่านั้นที่ส่งผลต่อการสปีดเตอริง ยังมีอีกหนึ่งปัจจัยคือชนิดของเป้าวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดฟิล์ม ซึ่งส่วนมากเป้าวัสดุที่ใช้จะเป็นโลหะ ที่สามารถเกิดการสปีดเตอริงได้ง่ายกว่าเป้าวัสดุที่เป็นสารประกอบสารประกอบ นอกจากนี้หากต้องการฟิล์มที่มีสมบัติต่างจากฟิล์มโลหะธรรมดา สามารถทำได้โดยการฉีดแก๊สชนิดอื่นเพิ่มในระบบ ยกตัวอย่างเช่น แก๊สออกซิเจน (O_2) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) ซึ่งการเคลือบแบบสปีดเตอริงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลายชนิดเช่น การเคลือบผิวในสถาปัตยกรรมทางกระจก การเคลือบแข็ง (ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ตัดเฉาะ) และการเคลือบเพื่อความสวยงาม



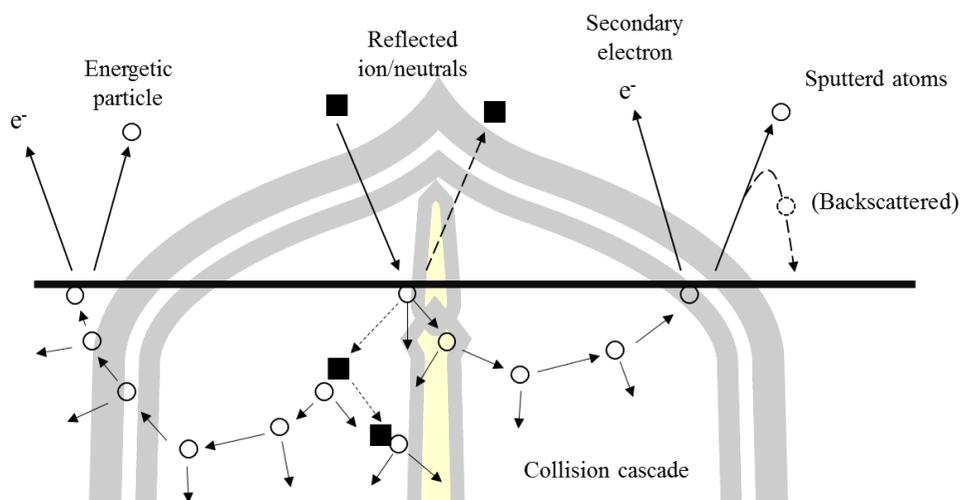
รูปที่ 2. 7 ไดอะแกรมระบบสปีดเตอริง

การที่จะทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริง สามารถอธิบายและทำให้เห็นภาพอย่างง่ายด้วยไดอะแกรมของระบบสปัตเตอริง เริ่มจากการมีภาชนะปิด หรือห้องเคลือบ (Chamber) ที่สร้างสภาวะสุญญากาศด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยภายในห้องเคลือบจะมีขั้วไฟฟ้าอยู่สองชนิดได้แก่ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งที่ขั้วแคโทดได้รับศักย์ไฟฟ้าลบจากแหล่งจ่ายเพื่อใช้สร้างสนามไฟฟ้า และที่สำคัญต้องฉีดแก๊สที่เป็นแก๊สตั้งต้นในการสร้างสถานะพลาสมาที่เป็นสิ่งทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงได้

2.3.1 หลักการของกระบวนการสปัตเตอริง

ปรากฏการณ์ที่เกิดจากกระบวนการสปัตเตอริง ต้องอาศัยการระดมชนจากไอออนที่มีพลังงานสูงเพื่อทำให้อะตอมที่พื้นผิวของเป้าวัสดุหลุดออกเป็นเพียงส่วนหนึ่งของปรากฏการณ์ ซึ่งมีสิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างการสปัตเตอริง ที่ทำให้อย่างคงสถานะของพลาสมาได้ เช่น การสะท้อนของไอออนที่ผิวเป้าวัสดุ (Reflected Ions and Neutrals) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) การฝังตัวของไอออน (Ion Implantation) และการเปลี่ยนโครงสร้างของผิวเป้าวัสดุ (Target Material Structural Rearrangement) ที่แสดงปรากฏการณ์ต่างๆจากกระบวนการสปัตเตอริงดังรูปที่ 2.8

อนุภาคพลังงานสูง (High Energy Particles) เป็นอนุภาคที่ใช้ในการวิ่งชนกับเป้าวัสดุแล้วทำให้อะตอมของเป้าวัสดุหลุดออกมา อนุภาคพลังงานสูงที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรือ อะตอมของธาตุชนิดต่างๆ แต่การที่จะทำการควบคุมอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้านั้นทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้อนุภาคที่มีประจุโดยต้องเร่งให้อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า วิธีนี้สามารถควบคุมพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ ส่วนอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้า แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอะตอมของเป้า ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนกันระหว่างอนุภาคที่มีการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอออนบวกแทนซึ่งมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอน เพื่อให้อนุภาคที่มีพลังงานสูงสำหรับวิ่งเข้าชนกับเป้าสารเคลือบซึ่งสามารถให้อัตราการปลดปล่อยอะตอมของเป้าวัสดุได้สูงพอตามต้องการ



รูปที่ 2. 8 การเกิดปรากฏการณ์สปัตเตอร์ที่เป้าวัสดุด้วยอนุภาคพลังงานสูง

ในกระบวนการทั่วไประบบสปัตเตอร์นิยมดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากพื้นผิวที่เย็นนั้นทำให้สามารถตรึงสีความร้อนที่เกิดจากการสปัตเตอร์ได้ และด้วยระดับความร้อนที่ต่ำทำให้สามารถนำชิ้นงานที่อ่อนไหวต่อความร้อนมาติดตั้งไว้ใกล้กับเป้าวัสดุได้ นอกจากนี้อุณหภูมิที่ต่ำยังสามารถลดการแพร่ของแก๊สไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับพื้นผิวเป้าวัสดุทำให้สามารถใช้เป้าวัสดุที่เป็นอัลลอยได้ในระบบสปัตเตอร์ และปรากฏการณ์สปัตเตอร์ยังสามารถเกิดขึ้นในพื้นผิวของชิ้นงานได้อีกด้วยหากอะตอมที่ตกสะสมมีพลังงานมากเพียงพอ นอกจากนี้ไอออนของเป้าวัสดุยังสามารถทำให้การสปัตเตอร์ที่ผิวเป้าวัสดุได้ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอออนที่มีไอออนหนาแน่นเกิดขึ้นในกระบวนการ เช่น การระเหยด้วยการอาร์ค และกระบวนการเคลือบฟิล์มในระบบไฮฟิมส์ เป็นต้น

2.3.2 ค่าyieldของการสปัตเตอร์

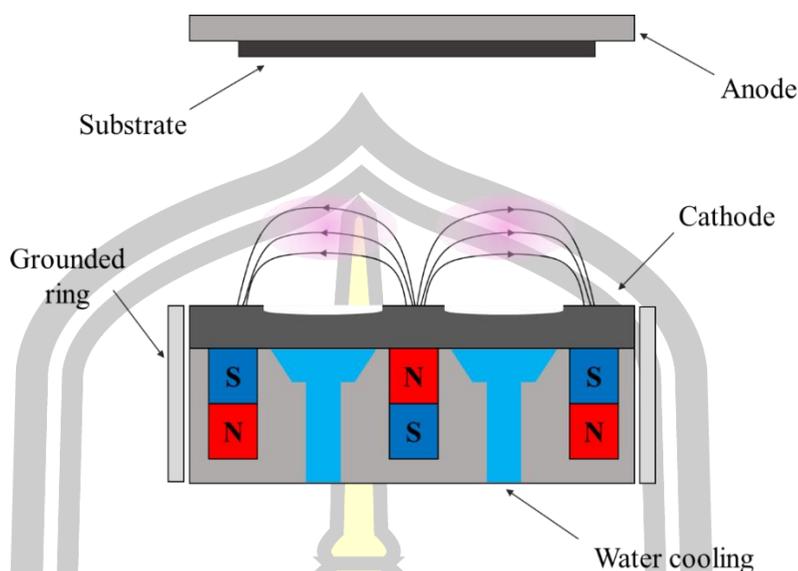
ในการสปัตเตอร์นั้นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสามารถในการหลุดของอะตอมเป้าวัสดุเรียกว่า ค่าyieldของการสปัตเตอร์ (Sputter yield) หรือหมายถึง ค่าเฉลี่ยของการหลุดออกของอะตอมที่ผิวเป้าวัสดุเนื่องจากการชนของไอออน ที่สามารถกำหนดเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนอะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้าวัสดุต่อค่าเฉลี่ยของจำนวนไอออนที่ตกกระทบผิวเป้าวัสดุ ทำให้มีหน่วยเป็นอะตอมต่อไอออน ดังตารางที่ 2.4 แสดงค่าyieldของการสปัตเตอร์ของธาตุแต่ละชนิด

ตาราง 2. 4 ค่าyieldของการสปัตเตอร์ของธาตุแต่ละชนิด [20]

Target Material	Density (g/cm ³)	Yield @ 600 eV	Rate* (Å/sec)
Aluminium (Al)	2.7	1.2	170
Carbon (C)	2.25	0.2	20
Copper (Cu)	8.92	2.3	320
Silicon (Si)	2.33	0.5	80
Titanium (Ti)	4.5	0.6	80
Tungsten (W)	19.35	0.6	80
Zirconium (Zr)	6.49	0.7	85

2.3.3 ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์

การสปัตเตอร์เพียงอย่างเดียวยังมีข้อด้อยในเรื่องของการเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบฟิล์ม เนื่องจากอัตราการสปัตเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าyieldของการสปัตเตอร์ (Sputter yield) ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอร์ อาจทำได้สองวิธี เช่นการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าวัสดุ ในระบบดีซีสปัตเตอร์ ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด หรือการเพิ่มความดันของแก๊สระหว่างกระบวนการเคลือบ ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm² และความดันประมาณ 100 mTorr ส่วนอีกหนึ่งวิธีที่เป็นการพัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มรูปแบบใหม่ด้วยความสามารถในการกักอิเล็กตรอนให้อยู่ที่บริเวณหน้าเป้าวัสดุมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1936 Penning [21] ได้เสนอการใช้สนามแม่เหล็กในระบบสปัตเตอร์ เพื่อยืดอายุของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกจากขั้วแคโทด และดักอิเล็กตรอนพวกนั้นไว้ใกล้บริเวณขั้วแคโทด ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของสนามแม่เหล็กด้วยการปลดปล่อยจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ที่นำไปสู่ค้นพบการเพิ่มขึ้นของการไอออนไนเซชัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของการเกิดไอออนไนเซชันเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบริเวณหน้าเป้าวัสดุในลักษณะการหมุนวนเป็นวงกลม ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก จึงทำให้โอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอน และอะตอมของแก๊สอาร์กอนมีมากขึ้นทำให้โอกาสในการไอออนไนเซชันมากขึ้นไปด้วย นำไปสู่อัตราการตกสะสมที่ยอมรับได้และสามารถดำเนินการได้ที่ความดันแก๊สขณะเคลือบต่ำกว่า 0.03 Torr (Gill and Kay, 1965) [22]



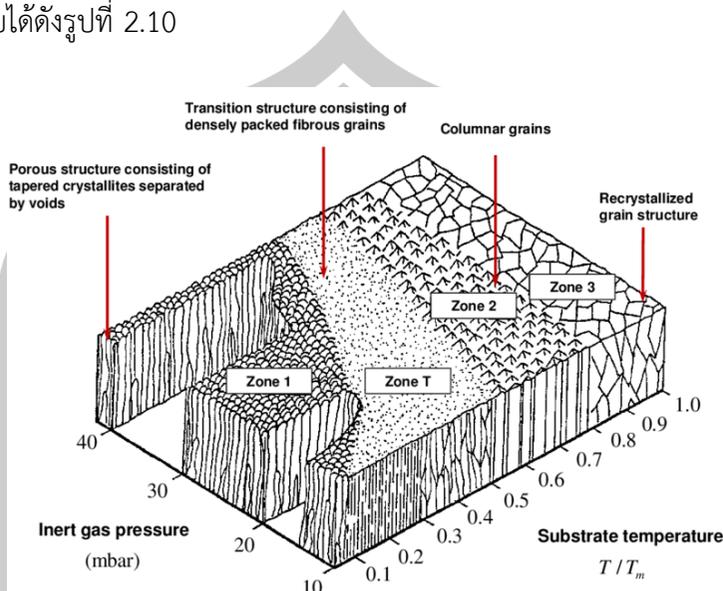
รูปที่ 2.9 การแสดงภาคตัดขวางของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงแผนภาพของแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง สำหรับเป้าวัสดุที่ใช้เป็นได้ทั้งแผ่นกลม และสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีสนามแม่เหล็กอยู่ที่บริเวณหน้าเป้าวัสดุซึ่งประกอบด้วยเม็ดแม่เหล็กที่อยู่ศูนย์กลาง และเม็ดแม่เหล็กด้านขอบที่มีการวางแนวเป็นวงกลม ซึ่งมีขั้วของสนามแม่เหล็กตรงข้ามกับเม็ดแม่เหล็กที่บริเวณศูนย์กลาง โดยที่เส้นแรงของสนามแม่เหล็กมีทิศทางพุ่งออกจากศูนย์กลาง ส่วนประกอบของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กที่มีความสำคัญในการกักอิเล็กตรอน ส่วนที่เป็นระบบน้ำหล่อเย็นทำหน้าที่ในการระบายความร้อนที่เกิดจากการระดมชนของอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่องที่บริเวณผิวเป้าวัสดุซึ่งทำให้เกิดความร้อนสะสม ถ้าไม่มีการระบายความร้อนอาจส่งผลต่อเม็ดแม่เหล็กที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กที่อาจเสื่อมสภาพจากความร้อนที่มากเกินไป ส่วนสุดท้ายเป็น Grounded ring ที่ทำหน้าที่ในการทำให้เกิดพลาสมาเฉพาะบริเวณหน้าเป้าวัสดุเพียงอย่างเดียว

2.4 โครงสร้างของฟิล์มบาง

โครงสร้างของฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบเทคนิคต่างๆ หรือการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ เช่น กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดพลาสมา ความดันแก๊สขณะเคลือบ อุณหภูมิของชิ้นงานขณะเคลือบ และการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน ล้วนส่งผลต่อโครงสร้าง และสมบัติของฟิล์ม ซึ่งเป็นสิ่งที่เราสามารถกำหนดได้จากพารามิเตอร์เหล่านั้น ในปี ค.ศ. 1974 Thornton [23] ได้นำเสนอไดอะแกรมที่อธิบายถึงโครงสร้างฟิล์มที่มีผลของความดันแก๊สอาร์กอน และอุณหภูมิไฮโมโลกัส คือ

อุณหภูมิของฟิล์มขณะเคลือบ ต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุที่นำมาเคลือบเป็นฟิล์ม (T/T_m) สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.10



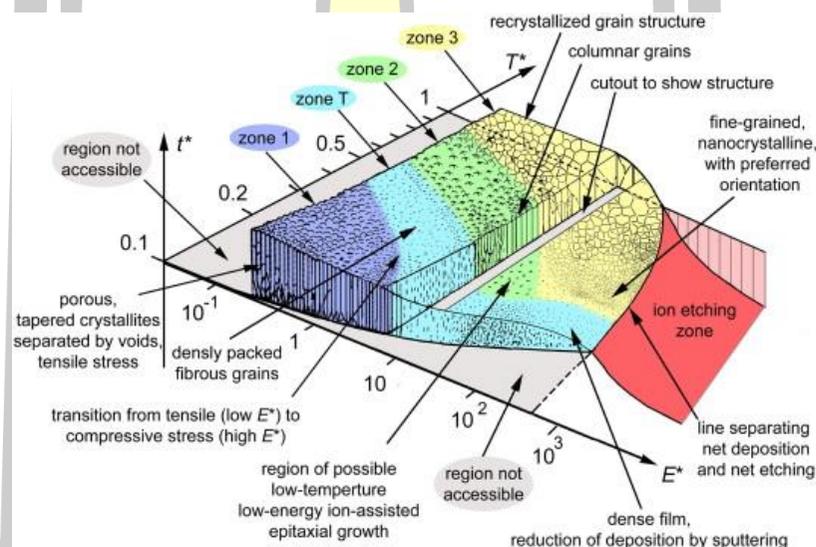
รูปที่ 2. 10 ไดอะแกรมโครงสร้างฟิล์มที่เสนอโดย Thornton [24]

จากรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายโครงสร้างที่แบ่งออกเป็น 4 บริเวณ ตามการปรับค่าความดันและอุณหภูมิไอโมเลกุลส์ได้ดังนี้

1. บริเวณที่ 1 (Zone 1) เป็นบริเวณการเคลือบที่ช่วงอุณหภูมิ T/T_m ต่ำ และที่ความดันขณะเคลือบสูง ทำให้อะตอมที่อยู่บนชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ และเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ ซึ่งทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ เนื่องจากความดันที่สูงส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่จะมาเคลือบเป็นฟิล์ม ทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอ
2. บริเวณที่ T (Zone T) เป็นบริเวณการเคลือบที่ช่วงอุณหภูมิ T/T_m เพิ่มขึ้นมากกว่า Zone 1 ที่ความดันต่ำซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดอยู่ระหว่าง บริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุรองรับจะมีปริมาณมากขึ้นและได้รับพลังงานจากการชนของอนุภาคสารเคลือบทำให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น ทำให้อะตอมที่เกิดเป็นฟิล์มมีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่มากขึ้น และจะไม่เกิดช่องว่างที่บริเวณขอบ
3. บริเวณที่ 2 (Zone 2) เป็นบริเวณการเคลือบที่ช่วงอุณหภูมิ T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.8 ถ้าสังเกตจากภาคตัดขวางของ Zone T จะเกิดโครงสร้างแบบคอลัมน์นาร์ ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกและขนาดของคอลัมน์นาร์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอลัมน์นาร์

4. บริเวณที่ 3 (Zone 3) เป็นบริเวณการเคลือบที่ช่วงอุณหภูมิ T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8 – 1.0 ที่อุณหภูมิขณะเคลือบต่ำ การแพร่จะมีค่าสูง โครงสร้างที่ได้เป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด และขนาดของคอลัมน์าร์มีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูง อาจจะทำให้เกิดการจัดเรียงผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored Strain Energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบเกรนที่เกิดขึ้นในชั้นตอนนี้ จะเปลี่ยนจากคอลัมน์าร์เป็นผลึกเดี่ยว

ในปี ค.ศ. 2010 Anders [10] ได้เสนอรูปแบบไดอะแกรมที่อธิบายโครงสร้างของฟิล์ม โดยนำเสนอผลของความหนาของฟิล์มที่อธิบายว่าถ้ามากกว่าศูนย์เมื่อเกิดการเคลือบ ส่วนน้อยกว่าศูนย์เมื่อเกิดการกัดเซาะผิวชิ้นงาน และ พลังงานจลน์ของไอออนก่อนกระทบผิวฟิล์ม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

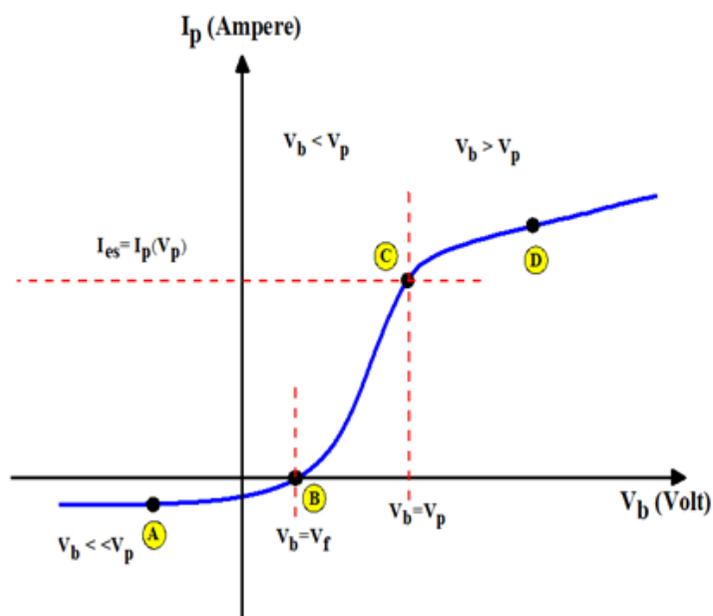


รูปที่ 2. 11 ไดอะแกรมโครงสร้างฟิล์มที่เสนอโดย Anders [10]

จากรูปที่ 2.11 สามารถใช้คำอธิบายของ Thornton ที่อธิบายไว้ข้างต้นได้สำหรับการเกิดบริเวณทั้ง 4 ที่พลังงานจลน์ของไอออนก่อนกระทบผิวฟิล์มต่ำกว่า 10^2 ซึ่งหากพลังงานของไอออนมากกว่า 10^2 จะไม่เกิดเหตุการณ์การเคลือบฟิล์ม แต่จะเกิดการกัดเซาะของชิ้นงานแทน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนการเคลือบฟิล์มโดยการกำจัดชั้นออกไซด์ที่เป็นปัญหาเกี่ยวกับการยึดติดของฟิล์ม

2.5 หลักการตรวจวัดสมบัติของพลาสมา

ในการวัดสมบัติต่างๆ ของพลาสมา หัววัดแลงเมียร์ถือเป็นวิธีที่ง่าย องค์กรประกอบไม่ซับซ้อน และต้นทุนในการสร้างต่ำ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ หัววัดแลงเมียร์ประกอบด้วยขั้วรับกระแส (C) ที่ต่อเข้ากับเครื่อง Source Meter Unit (SMU) ทำหน้าที่ทั้งจ่ายศักย์ไฟฟ้า และวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลที่บันทึกได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วรับกระแส (C) ที่สอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง (I-V characteristic) สามารถนำข้อมูลมาตีความเพื่อหาค่า ศักย์พลาสมา (V_p) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e)



รูปที่ 2.12 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของ I-V ที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดแลงเมียร์

ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวัดสมบัติของพลาสมาสามารถอ้างอิงดังรูปที่ 2.12 เมื่อ I_p คือกระแสไฟฟ้าที่หัววัด V_b คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัด ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 จุด [25] ได้แก่ จุด A เป็นบริเวณที่มีการจ่ายศักย์ลบทำให้อิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่มายังหัววัดถูกผลักออกจนหมด เหลือเพียงไอออนเพียงอย่างเดียวที่สามารถที่เคลื่อนที่มายังหัววัดได้ แทนด้วย I_{is} (ion saturation current) คือ กระแสไอออนที่อิ่มตัว สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสไอออนที่อิ่มตัวได้ตามสมการ (2.14)

$$I_{is} = mV_b + C \quad (2.14)$$

จุด B เป็นบริเวณที่กระแสของหัววัดที่วัดได้มีค่าเท่ากับศูนย์ $I_p(V_f) = 0$ เนื่องจากบริเวณนี้กระแสของอิเล็กตรอนและกระแสของไอออนมีค่าเท่ากันหรือถูกเรียกว่า ศักย์ลอย (V_f , Floating potential) จุด C เป็นบริเวณที่ศักย์ไบอัสมีค่าเป็นบวกมากขึ้นทำให้ไอออนที่มีพลังงานจลน์ต่ำถูกผลักออกจากหัววัดและดึงให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้ามายังหัววัด ซึ่งที่จุด C จะสามารถคำนวณหาศักย์พลาสมา (V_p , plasma potential) ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของ d^2I/dV^2 สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Origin เมื่อทราบค่า V_p แล้วสามารถหากระแสอิเล็กตรอนที่อิ่มตัว (I_{es} , Electron saturation current) ได้จากการลากเส้นตรงที่ค่า V_p ตัดกับเส้นโค้ง I-V แล้วลากเส้นตรงที่ขนานกับแกน x ไปตัดกับแกน y ซึ่งก็คือค่ากระแสอิเล็กตรอนที่อิ่มตัว ส่วนจุด D เป็นบริเวณที่ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดมากกว่าศักย์พลาสมา $V_b > V_p$

เมื่อทราบค่า I_s และ I_{es} พารามิเตอร์ต่อไปที่สามารถคำนวณได้คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) โดยเริ่มจากการหากระแสของอิเล็กตรอน (I_e) จากสมการ (2.15)

$$I_e = I_p + |I_{is}| \quad (2.15)$$

เมื่อทราบค่าได้ค่า I_e ที่สร้างเป็นคอลัมน์ใหม่โดยพล็อตกราฟเทียบกับ V_b จะได้ว่า

$$I_e(V_b) = I_{es} \exp\left[\frac{e(V_b - V_p)}{kT_e}\right]; V_b < V_p \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.16) พิจารณาในกรณีนี้ที่ $V_b < V_p$ และทำการคูณลอการิทึมฐานธรรมชาติตลอดสมการ

$$\ln I_e(V_b) = \ln I_{es} + \frac{e(V_b - V_p)}{kT_e} \quad (2.17)$$

กระจายพจน์ที่อยู่ในวงเล็บออกเป็นสองส่วนเพื่อง่ายต่อการพิจารณา

$$\ln I_e(V_b) = \ln I_{es} + \frac{eV_b}{kT_e} - \frac{eV_p}{kT_e} \quad (2.18)$$

ทำการรวมพจน์ที่เป็นค่าคงที่เข้าด้วยกันให้อยู่ในรูปของ C_2

$$\ln I_e(V_b) = C_2 + \left(\frac{e}{kT_e}\right) V_b \quad (2.19)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln I_e$ กับ V_b พบว่าค่าความชันของกราฟคือ e/kT_e

$$T_e = \frac{e}{k(\text{slope})} \quad (2.20)$$

อุณหภูมิของอิเล็กตรอนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ อิเล็กตรอนเย็น (cold electron) มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1.2 eV และอิเล็กตรอนร้อน (hot electron) มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1.2 ถึง 5 eV [26] โดยที่ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ เท่ากับ 11,604.52 K ซึ่งในงานวิจัยนี้วัดค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ในช่วง 1.9 ถึง 3.5 eV ซึ่งอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเป็นหนึ่งตัวแปรที่นำมาคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) ได้ตามสมการ

$$I_{es} = \frac{1}{4} e n_e \langle v_e \rangle A_p \quad (2.21)$$

เมื่อ $\langle v_e \rangle = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}$ ซึ่ง $\langle v \rangle$ คือความเร็วเฉลี่ย m_e คือมวลของอิเล็กตรอน e คือค่าประจุของอิเล็กตรอนและ A_p คือพื้นที่ของหัววัด โดยสามารถเขียนสมการที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้ดังสมการ

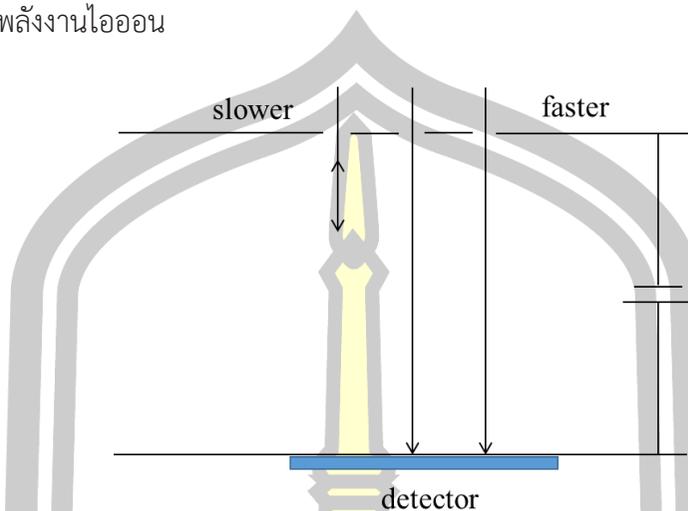
$$n_e = \left(\frac{4}{e A_p} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8kT_e}} \right) I_{es} \quad (2.22)$$

จากสมบัติเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมา (quasi-neutrality) ทำให้พิจารณาได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมามีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของไอออน ดังนั้น $n_e \approx n_i$ จึงสามารถแทนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน เป็นความหนาแน่นของไอออนได้ในผลการทดลอง

2.6 หลักการตรวจวัดพลังงานของไอออน

พลังงานของไอออนเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของฟิล์มที่อธิบายในหัวข้อที่ 2.4 และสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ด้วยความที่ไอออนอยู่ในสถานะที่เป็นประจุสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ และพลังงานได้ด้วยการใช้สนามไฟฟ้า การวัดพลังงานไอออนด้วย retarding field energy analyzer (RFEA) [27] ไม่เพียงแต่วัดพลังงานของไอออน ยังสามารถแยกแยะมวลของไอออนได้ ความสามารถในการตรวจวัดการกระจายตัวของพลังงานไอออน (Ion Energy Distribution, IED) มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่มีการประยุกต์ใช้พลาสมาเนื่องจากพลังงานไอออนมีบทบาทสำคัญในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิว การใช้สนามไฟฟ้ายับยั้งหรือหน่วงไม่ให้ไอออนเคลื่อนที่

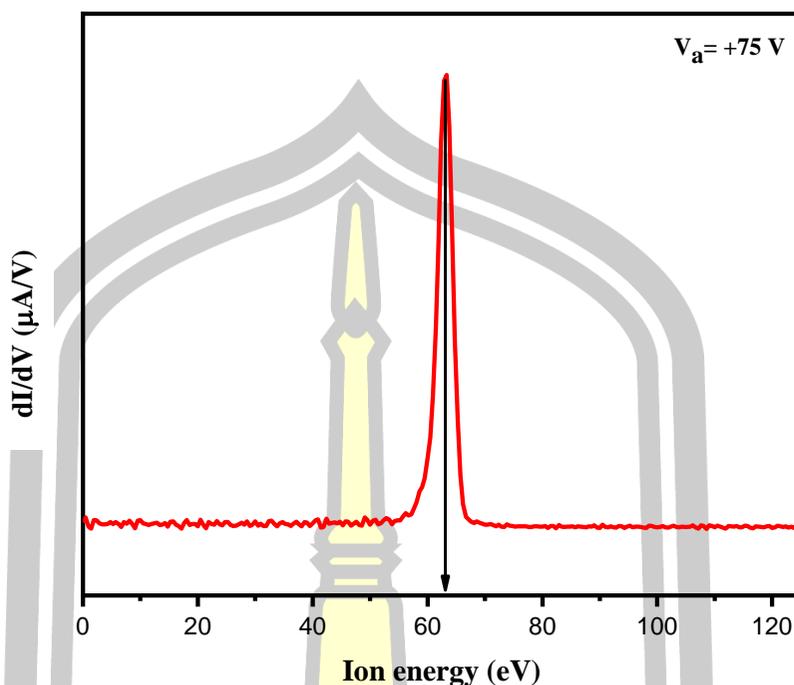
มาถึงจุดตรวจวัด เป็นวิธีที่ง่ายและ เหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความละเอียด ชับซ้อนของ การวิเคราะห์พลังงานไอออน



รูปที่ 2. 13 ไดอะแกรมแนวการเคลื่อนที่ของไอออนในหัววัดพลังงานแบบสนามหว่ง

แนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุได้แก่ อิเล็กตรอนและไอออน ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ บริเวณด้านหน้าหัววัดพลังงานที่มีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบซึ่งจะทำหน้าที่ในการแยกอิเล็กตรอนออกจาก ไอออน ทำให้พลังงานของอนุภาคส่วนใหญ่ที่ตรวจวัดได้เป็นของไอออน ส่วนบริเวณด้านในของหัววัด จะมีการสร้างสนามไฟฟ้าในทิศทางที่สวนทางกับการเคลื่อนที่ของไอออน หรือที่เรียกว่าสนามหว่ง ซึ่งถ้าไอออนที่เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในสนามหว่งนี้มีพลังงานจลน์น้อยกว่าพลังงานศักย์หว่งจะไม่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาที่หัววัดได้ มีเพียงไอออนที่มีพลังงานจลน์ที่สูงเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ไปยัง หัววัดได้ ในการวิเคราะห์พลังงานของไอออนจะใช้ค่ากระแสของไอออนและค่าศักย์หว่ง ในการ เชื่อมโยงฟังก์ชันแจกแจงความเร็ว และฟังก์ชันแจกแจงพลังงานจลน์ของไอออน

สำหรับการคำนวณหาค่าพลังงานของประชากรส่วนใหญ่ของฟังก์ชันการกระจายตัวของ พลังงานไอออน จากข้อมูลกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วยหัววัด RFA ซึ่งสามารถ คำนวณได้ด้วยโปรแกรม Origin2018 ด้วยการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของกระแสและศักย์ไฟฟ้า จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ I-V characteristic เป็นแกน ตั้ง ส่วนแกนนอนแสดงถึงค่าพลังงานไอออนดังแสดงตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2. 14 ฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานไอออน

จากรูปที่ 2.14 เป็นการแสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานไอออน ที่เงื่อนไขศักย์แอโนดไบอัส +75 V ซึ่งสามารถหาค่าพลังของประชากรไอออนส่วนใหญ่ได้จากการลากเส้นตรงที่จุดสูงสุดของพีคมาตัดที่แกน X ซึ่งมีค่าประมาณ 63.09 eV และข้อมูลอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ I-V Characteristic เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของไอออน และพลังงานไอออน ซึ่งเริ่มมาจากความสัมพันธ์ของสมการ ฟังก์ชันการกระจายตัวของความเร็ว ดังสมการที่ 2.23

$$f(v) = -\frac{M}{\chi A e^2} \frac{dI}{dV} \quad (2.23)$$

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้า $f(V)$ มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการกระจายตัวของความเร็ว $f(v)$ และฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงาน $f(\epsilon)$ หาความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.24

$$\int f(\epsilon) d\epsilon = \int f(v) dv \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 อินทิเกรตทั้งสองข้างหายไปดังแสดงตามสมการที่ 2.25

$$f(\epsilon) = f(v) \frac{dv}{d\epsilon} \quad (2.25)$$

$$\frac{dv}{d\varepsilon} = \frac{dv}{d\left(\frac{1}{2}Mv^2\right)} = \frac{dv}{Mvdv} = \frac{1}{Mv} = \frac{1}{M\sqrt{\frac{2\varepsilon}{M}}} = \frac{1}{\sqrt{2M\varepsilon}} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 เป็นการหาค่าอนุพันธ์ของความเร็วกับพลังงาน ซึ่งผลที่ได้ออกมาเป็นค่าคงที่

$$f(\varepsilon) = f(v) \frac{1}{\sqrt{2M\varepsilon}} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ 2.27 ได้มาจากการแทนสมการที่ 2.26 ในสมการที่ 2.25

$$f(\varepsilon) = -\frac{M}{\chi Ae^2} \frac{1}{\sqrt{2M\varepsilon}} \frac{dI}{dV} \quad (2.28)$$

และเมื่อแทนค่า $f(v)$ ในสมการที่ 2.27 จะได้ค่า $f(\varepsilon)$ ดังสมการที่ 2.28

$$\int f(\varepsilon) d\varepsilon = \int f(\varepsilon) e dV = \int f(V) dV \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $f(v)$ $f(\varepsilon)$ และ $f(V)$

$$f(V) = f(\varepsilon) \times e \quad (2.30)$$

ซึ่งฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างฟังก์ชันที่ขึ้นกับพลังงานและประจุของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเป็น -1.6×10^{-19} C แสดงดังสมการที่ 2.30 และจะได้สมการที่ 2.31 ที่เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่บันทึกได้ที่อยู่ในรูป I-V Characteristic

$$f(V) = -\frac{1}{\chi Ae} \sqrt{\frac{M}{2e}} \frac{1}{\sqrt{V}} \frac{dI}{dV} \quad (2.31)$$

โดยที่ M คือมวลของไอออนแก๊สอาร์กอน

V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัด

A คือ พื้นที่ที่รับอนุภาค

χ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านของกริด

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

$$n = \int f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.32)$$

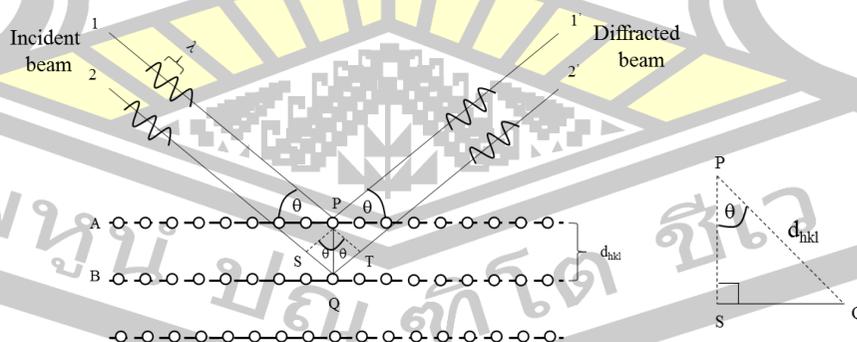
$$\varepsilon_{avg} = \frac{\int \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon}{n} \quad (2.33)$$

การหาค่าความหนาแน่นของไอออน คือการอินทิเกรตสมการที่ 2.31 หรือสมการที่ 2.32 ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นพื้นที่ใต้กราฟ หรือค่าคงที่ โดยหน่วยของความหนาแน่นเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และสามารถความคำนวณหาค่าพลังงานเฉลี่ยได้ดังสมการที่ 2.33

2.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบาง

2.6.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ อาศัยกฎของแบร็กก์ (Bragg law) ที่เสนอแนวคิดว่าให้มองโครงสร้างผลึกประกอบด้วย “ชั้น (layer)” หรือ “ระนาบ (plane)” ของอะตอมที่สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบได้ โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่ถูกสะท้อนออกมาจากระนาบต่างๆ จะมีความเข้มสูง (เกิดจากการแทรกสอดแบบเสริม) ความต่างระหว่างระยะเดินทางของคลื่นที่ถูกสะท้อนจากระนาบใดๆกับระนาบข้างเคียงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบหลายคนอาจเกิดความสงสัยว่าทำไมถึงใช้คำว่า “สะท้อน” มาอธิบายปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยโครงสร้างผลึกในวัสดุเกิดจากการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ในทุกทิศทางโดยอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างผลึก แต่หากพิจารณาการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จากอะตอมที่อยู่บนระนาบผลึกเดียวกัน จะพบว่ามุมที่พบความเข้มของรังสีเอ็กซ์สูงสุดจะมีค่ามุมเท่ากับมุมที่รังสีเอ็กซ์มาตกกระทบระนาบผลึกนั้น



รูปที่ 2.15 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร็กก์

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าระยะทางที่คลื่นทั้ง 2 ขบวนเดินทางไปที่ตกกระทบระนาบ A และ B แล้วสะท้อนออกมา มีความแตกต่างระหว่างระยะเดินทางเท่ากับ $SQ + QT$ โดยที่ระยะ SQ มีค่าเท่ากับระยะ QT และสามารถหาค่าของระยะ SQ ได้จากความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของสามเหลี่ยม PSQ ซึ่งได้ค่าระยะ SQ ออกมาเท่ากับ $d_{hkl}\sin\theta$ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างระยะเดินทางของคลื่นทั้ง 2 ขบวนจึงมีค่าเท่ากับ $2d_{hkl}\sin\theta$ และจากแนวคิดของแบร็กก์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้ได้สมการที่ใช้ในการอธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยโครงสร้างผลึก ที่มีชื่อว่า “กฎของแบร็กก์” ดังสมการที่ 2.34

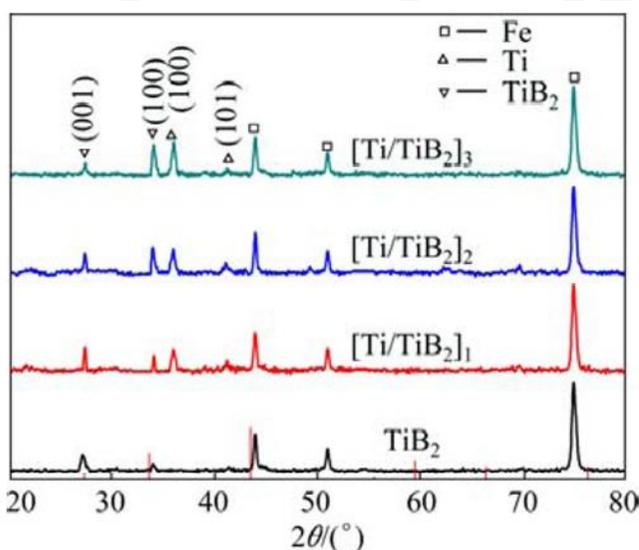
$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.34)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของการสะท้อน

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ ($h\ k\ l$)

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา



รูปที่ 2. 16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ [6]

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากรูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ (Intensity) กับมุมที่ทำการวัด (2θ) ซึ่งถ้าหากเปรียบเทียบตำแหน่งของมุมที่เกิดพีคที่สามารถระบุขนาดของผลึก ชนิดของธาตุและสารประกอบ และสามารถระบุได้ว่าโครงสร้างของผลึก

ของสารชนิดนั้นเป็นผลึกแบบใด โดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่รวบรวมโดยองค์กรที่มีชื่อว่า The International Center for Diffraction Data (ICDD) จากตัวอย่างข้างต้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่มีชั้นรองพื้นเป็นไทเทเนียมและชั้นงานเป็น AISI 316L โดยพิกที่ปรากฏจะเป็นพิกของธาตุไทเทเนียมไดโบไรด์ ไทเทเนียม และเหล็ก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชั้นงาน

สำหรับการคำนวณหาขนาดผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้ หาได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลื่อนที่ได้ โดยใช้สมการของ Scherrer ในการคำนวณหาขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่ได้หลังจากการเคลือบ ดังสมการที่ 2.35

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.35)$$

เมื่อ L คือ ขนาดของผลึก

k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.9

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}_\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพิกที่มีค่าความเข้มสูงสุด

θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพิก

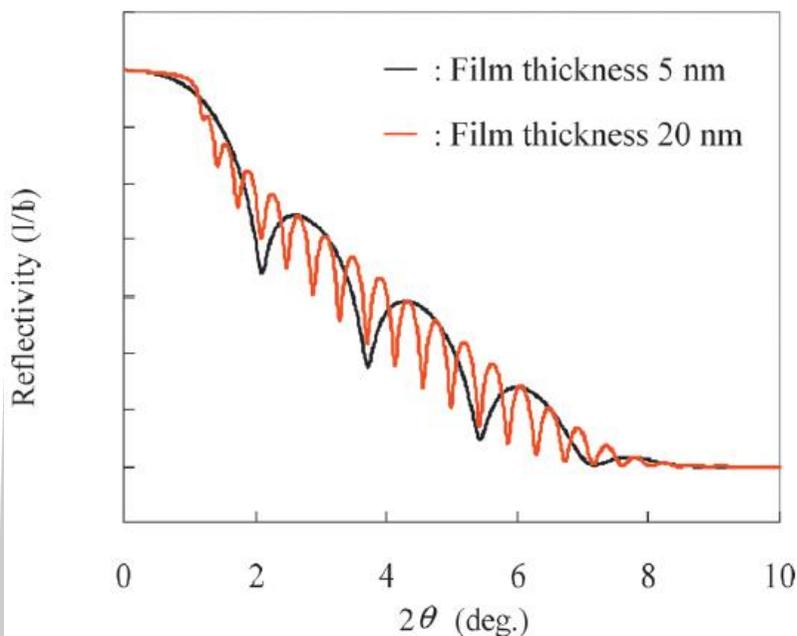
2.6.2 การสะท้อนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Reflectivity, XRR)

เทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ [28] เป็นเทคนิคเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์ฟิล์มบาง ซึ่งให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความหนา ความหนาแน่น และความขรุขระของฟิล์ม เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับและไม่ทำลายชิ้นงาน จากการสะท้อนกลับหมดของรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่มายังพื้นผิวชิ้นงานที่เป็น ออสซิลเลชัน ผลึก และของเหลว ความหนาของชั้นฟิล์มทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 400 นาโนเมตร แนวคิดพื้นฐานของเทคนิคนี้คือการสะท้อนของลำรังสีเอกซ์จากพื้นผิวของชิ้นงาน หากพื้นผิวของชิ้นงานมีความไม่สมบูรณ์ และไม่เรียบ แล้วความเข้มของรังสีที่สะท้อนจะเบี่ยงเบนไปจากที่คาดไว้ การเบี่ยงเบนนั้นสามารถวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นของอินเทอร์เฟซปกติกับพื้นผิว

เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ตกกระทบชิ้นงานจะทำให้เกิดทั้งการสะท้อน และการหักเห สำหรับการหักเหเกิดขึ้นในกรณีที่ดัชนีหักเหของวัสดุมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้น การที่รังสีเอกซ์จะเกิดการสะท้อนกลับหมดได้ เมื่อรังสีที่ตกกระทบพื้นผิววัสดุ เป็น grazing angle [29] หรือใช้เรียกมุมตกกระทบที่มีค่าน้อยๆ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า มุมวิกฤต (Critical angle) [30] คือมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดมุมหักเห

เท่ากับ 90° ดังนั้นการสะท้อนกลับของรังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีการหักเห และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ [31]

2.6.2.1 ความหนาของฟิล์ม

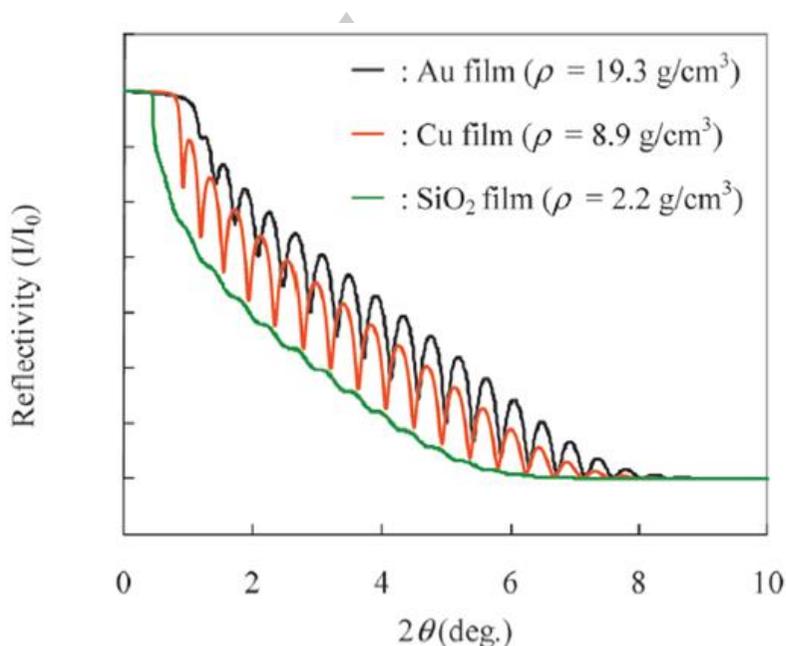


รูปที่ 2. 17 การสะท้อนของรังสีเอกซ์บนฟิล์มทอง [31]

จากรูปที่ 2.17 แสดงเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์ โดยทั่วไปแกนตั้งจะแสดงเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์ โดยใช้เกลลอกลิทึม ของการ normalized ความเข้มของ I/I_0 เส้นโค้งที่ได้จากการสะท้อนของรังสีเอกซ์มีลักษณะเป็นการสั่นขึ้นลง เนื่องจากรังสีเอกซ์เกิดการแทรกสอด จากรูปที่ 2.17 ยิ่งฟิล์มมีความหนาที่มากขึ้นช่วงการสั่นของเส้นโค้งก็กว้างขึ้นตามด้วย แสดงว่าสิ่งที่บ่งบอกถึงความหนาของฟิล์มคือระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเส้นโค้งหนึ่งถึงเส้นโค้งหนึ่ง

พหุ ประ โท ชี เว

2.6.2.2 ความหนาแน่นของฟิล์ม

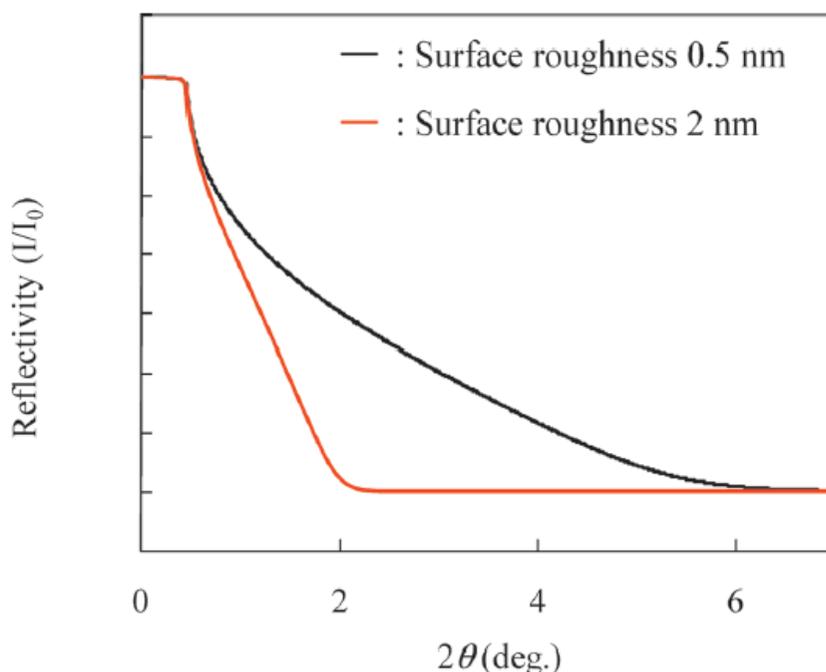


รูปที่ 2. 18 เส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์บน ฟิล์มทอง ทองแดง และซิลิกอนไดออกไซด์ (ความหนาฟิล์ม 20 nm) [31]

จากรูปที่ 2.18 แสดงผลความหนาแน่นจากเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มที่เคลือบ ทอง ทองแดง และซิลิกอนไดออกไซด์ บนชิ้นงานที่เป็นซิลิกอนโดยฟิล์มทุกชั้นมีความหนาเท่ากัน 20 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มทั้ง 3 ชนิด สังเกตได้ว่าฟิล์มที่มีความหนาแน่นมากจะมีแอมพลิจูดของการสั่นที่สูงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยแอมพลิจูดของการสั่นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นระหว่างฟิล์มกับชิ้นงาน

2.6.2.3 ความขรุขระของพื้นผิว

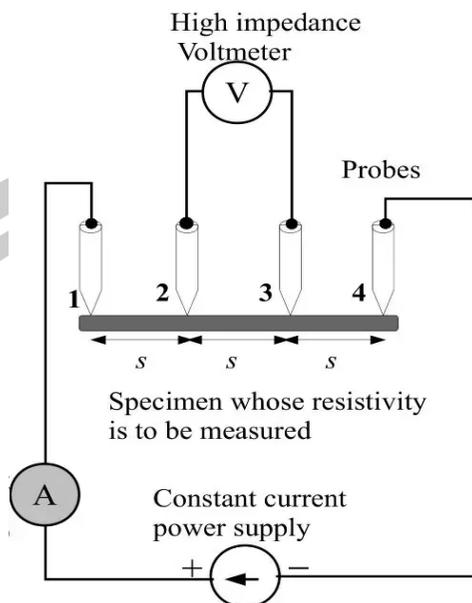
ความขรุขระของฟิล์มเป็นอีกหนึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์กับมุม โดยชิ้นงานที่ใช้เป็นซิลิกอน ดังรูปที่ 2.19 ทั้งสองชั้นมีความขรุขระของพื้นผิวที่ต่างกัน สามารถระบุได้ว่าการลดลงอย่างรวดเร็วของการสะท้อนของรังสีเอกซ์ แสดงถึงความขรุขระของพื้นผิวที่มาก หรือกล่าวได้ว่าความขรุขระของฟิล์มสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2. 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งการสะท้อนของรังสีเอกซ์กับมุม [31]

2.7 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคหัววัด 4 จุด (Four-point probe)

โดยปกติแล้วการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฟิล์มบางมีความจำเป็นอย่างเมื่อต้องการใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีที่สามารถควบคุมหรือตรวจวัดพารามิเตอร์รอบข้างได้อย่างแม่นยำ การวัดค่าความต้านทานช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของฟิล์มได้ง่าย และสามารถวิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามการวัดค่าความต้านทานให้มีค่าความต้านทานให้มีความแม่นยำสูงทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากผลกระทบหลายด้าน เช่น อุณหภูมิ เครื่องมือวัด และการติดตั้งเครื่องที่วัด เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัววัด 4 จุดที่หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาได้ประดิษฐ์ขึ้นซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเข็มวัดคู่หนึ่งใช้จ่ายกระแสให้กับชิ้นงานทดสอบ ส่วนเข็มวัดอีกคู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงานทดสอบ โดยใช้เครื่อง Source Meter Unit (SMU) ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม ด้วยลักษณะเช่นนี้สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟที่ใช้วัด และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดวัด จึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 2. 20 การวัดค่าความต้านทานด้วยหัววัด 4 จุด [32]

จากรูปที่ 2.20 เป็นการวัดค่าความต้านทานด้วยหัววัด 4 จุด ต้องมีค่าเท่ากันคือ s การวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่เข้าที่ขั้วด้านนอก ซึ่งกระแสจะไหลจากขั้ว A ผ่านพื้นผิวฟิล์มไปยังขั้ว D ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมจึงทำการวัดค่ากระแสและค่าแรงดันที่เข็ม B และ C ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.36

$$\rho = \frac{R(2\pi\omega)}{1.3863} \quad (2.36)$$

โดยที่ ρ คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

R คือความต้านทานเชิงแผ่น

ω คือความหนาของฟิล์ม

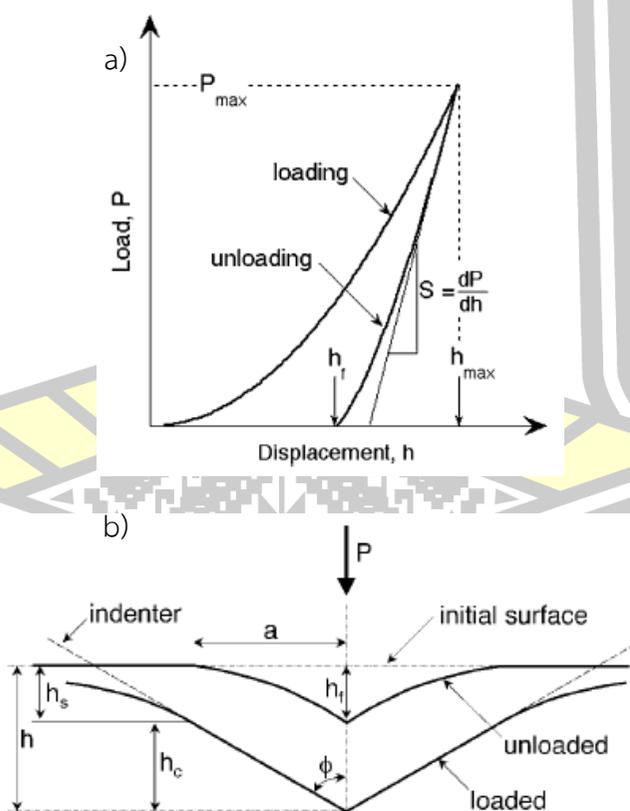
2.8 การวัดความแข็งของฟิล์มด้วยเทคนิค nanoindentation measurement

สมบัติเชิงกลที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือ ความแข็ง (Hardness) หมายถึงความสามารถในการต้านทานหรือทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุ โดยการทดสอบความแข็งของวัสดุที่ง่าย และได้รับการยอมรับคือ โมห์สเกล (Mohs Scale) เป็นการทดสอบความแข็งเริ่มแรก

สุด ทดสอบโดยการนำวัสดุหนึ่งมาขีดกับอีกวัสดุหนึ่ง โดยวัสดุที่มีความอ่อนกว่าจะเกิดรอยเมื่อถูกขีดด้วยวัสดุที่มีความแข็งกว่า [33]

ในการวัดความแข็งของฟิล์มบางจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความสามารถในการวัดในระดับนาโนได้โดยการใช้หัวกด Berkovic ที่มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยม หลักการในการวิเคราะห์ความแข็งของฟิล์มคือ การค่อยๆเพิ่มแรงกดที่ผิวหน้าของชิ้นงาน (loading) จนถึงจุดๆหนึ่ง ชิ้นงานที่มีฟิล์มจะเกิดการเสียรูปร่างถาวร แล้วค่อยๆคายแรงกดของหัวกด (unloading) สำหรับบริเวณที่ถูกกด ถ้ามีความยืดหยุ่นจะเกิดการคายตัว ส่วนชิ้นงานที่มีความเค้นตกค้างที่สูงหรือความแข็งที่มากเมื่อนำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ SEM จะปรากฏรอยแตกของฟิล์มที่บริเวณที่มีการกด ซึ่งบ่งบอกได้ว่าชิ้นงานมีความเปราะ

เมื่อทำการทดสอบความแข็ง ผลที่ได้เป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (Load) และไม่มีแรงกด (Unloading) ต่อระยะลึก (Displacement) สามารถนำมาหาค่าความแข็งและสมบัติของการยืดหยุ่นของฟิล์มได้ ที่แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2. 21 Indentation load และ Indentation displace curve b) กระบวนการ loading-unloading และตัวแปรที่สำคัญ [34]

จากรูปที่ 2.21 สามารถนำมาคำนวณความแข็งของฟิล์มได้สมการที่ 2.37

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2.37)$$

เมื่อ H คือ ความแข็งของผิวเคลือบ (Pa)

P_{\max} คือ ภาระสูงสุดในการกด (N)

A คือ พื้นที่รอยกด

พื้นที่ของรอยกดสามารถหาได้จากฟังก์ชันของพื้นที่ $F(h)$ ที่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ตัดขวางของหัวกดกับความลึกของการกด (h) ความลึกของการกดไม่ควรเกิน 1/10 ของความหนาฟิล์ม เพราะอาจทำให้ค่าความแข็งของแผ่นฐานรบกวนค่าความแข็งของฟิล์มที่ต้องการวัด ทำให้ค่าความแข็งของฟิล์มที่วัดได้คลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถหาพื้นที่รอยกดได้จากสมการที่

$$A = F(h_c) \quad (2.38)$$

$$h_c = h_{\max} - \left[\varepsilon \frac{P_{\max}}{dP / Ph} \right] \quad (2.39)$$

เมื่อ h_c คือ ระยะความลึกสัมผัสของการกด (nm)

h_{\max} คือ ระยะความลึกสูงสุด (nm)

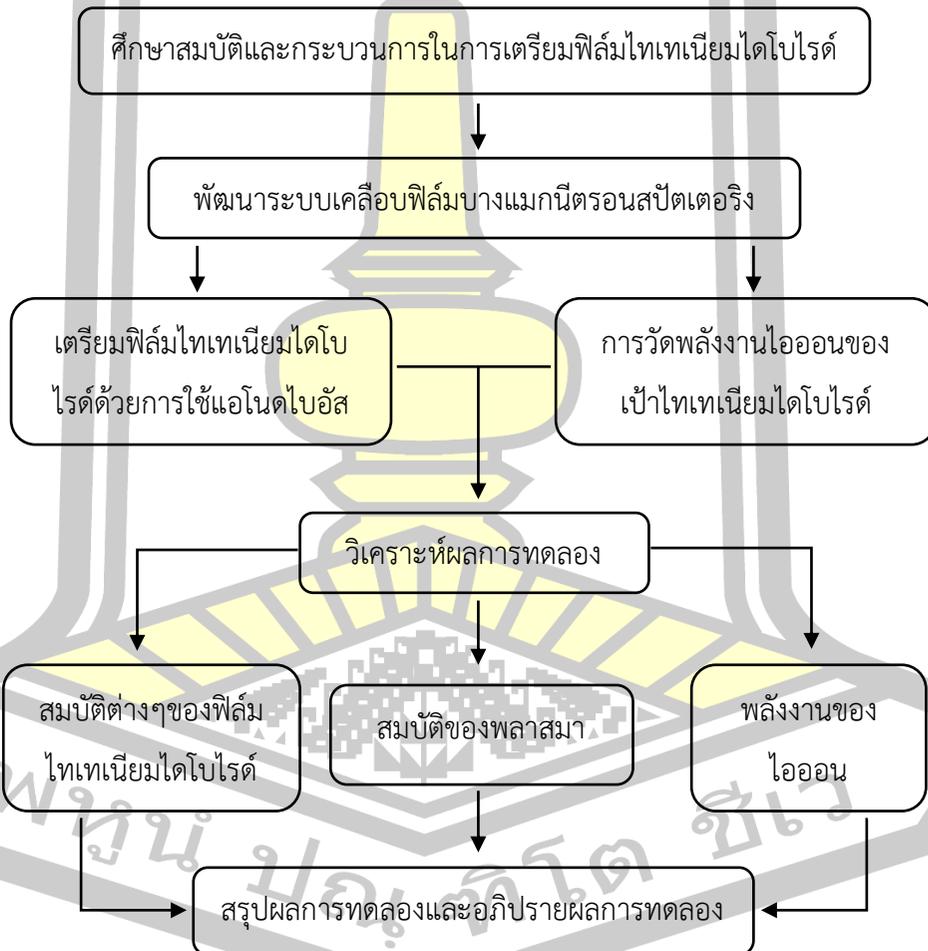
ε คือ ค่าคงที่ของหัวกด

พหุบัน ปณุ ทิโต ชีเว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโอบโรไซด์ด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้การปั๊มไอซ์ที่ชั่วแอนด์เพื่อศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้ 1. ศึกษาสมบัติและกระบวนการในการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบโรไซด์ 2. พัฒนาระบบเคลือบฟิล์มบางแมกนีตรอนสปัตเตอริง 3. เตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบโรไซด์ด้วยการใช้แอนด์ปั๊มไอซ์ 4. วิเคราะห์ผลการทดลอง 5. สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 ไตอะแกรมของการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระบบสุญญากาศ

3.1.1 การพัฒนาระบบเคลือบฟิล์มบางแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาระบบเคลือบฟิล์มบางเพื่อให้ระบบมีความทันสมัย ใช้งานได้ง่าย และลดข้อผิดพลาดจากการทำงานมากขึ้น สำหรับอุปกรณ์ที่มีการเพิ่มเข้ามาในระบบได้แก่

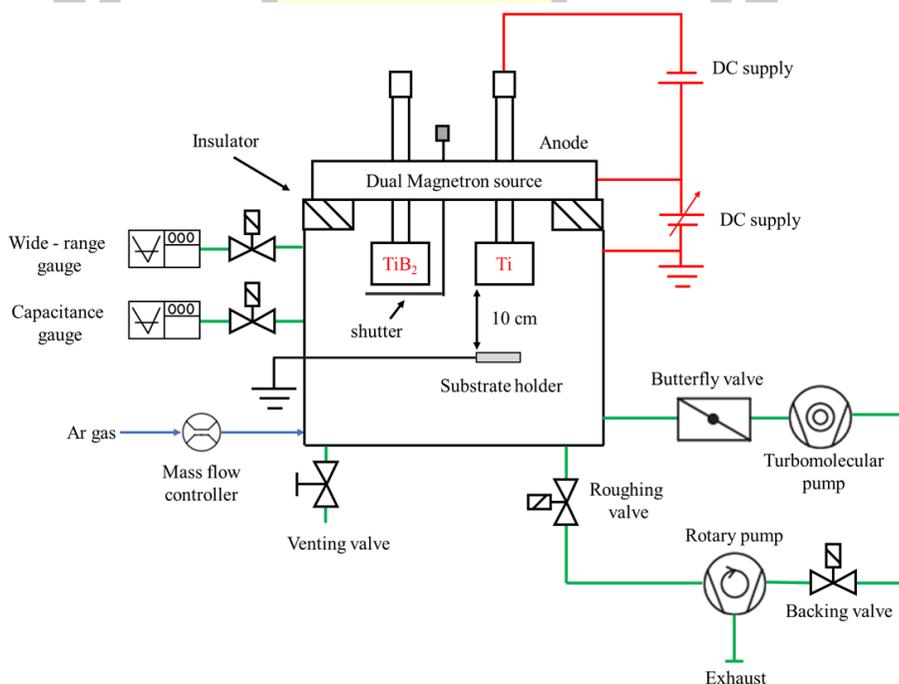
1. คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงาน และวัดค่าสัญญาณไฟฟ้า PCI eXtension for Instrumentation (PXI) โดยจะมีโปรแกรมที่สั่งการการเปิด-ปิดวาล์ว และควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส
2. ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ (Turbo-molecular pump) ทำหน้าที่สูบลำอากาศออกจากระบบ ที่ความดันสุญญากาศต่ำกว่า 10^{-5} Torr ด้วยการทำงานร่วมกับปั๊มโรตารี ซึ่งต่างจากการทำงานของระบบเดิมที่ใช้ปั๊มไอแพร์น้ำมัน
3. วาล์วปีกผีเสื้อที่ควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Butterfly valve control system) ทำหน้าที่ควบคุมความดันของระบบขณะทำการเคลือบ
4. ชุดวัดความดันมี 2 ส่วน ได้แก่ Dual gauge ที่มีเกจไอออน และเกจพิรามิ อยู่ในเครื่องเดียวกันสามารถวัดความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึงความดันต่ำกว่า 10^{-5} Torr ส่วนเกจคาปาซิเตน ใช้สำหรับวัดความดันขณะเคลือบ โดยมีช่วงการทำงานอยู่ระหว่าง 0.1 Torr ถึงความดันต่ำกว่า 10^{-5} Torr



รูปที่ 3. 2 ระบบเคลือบฟิล์มบางแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

3.1.2 ระบบสุญญากาศ

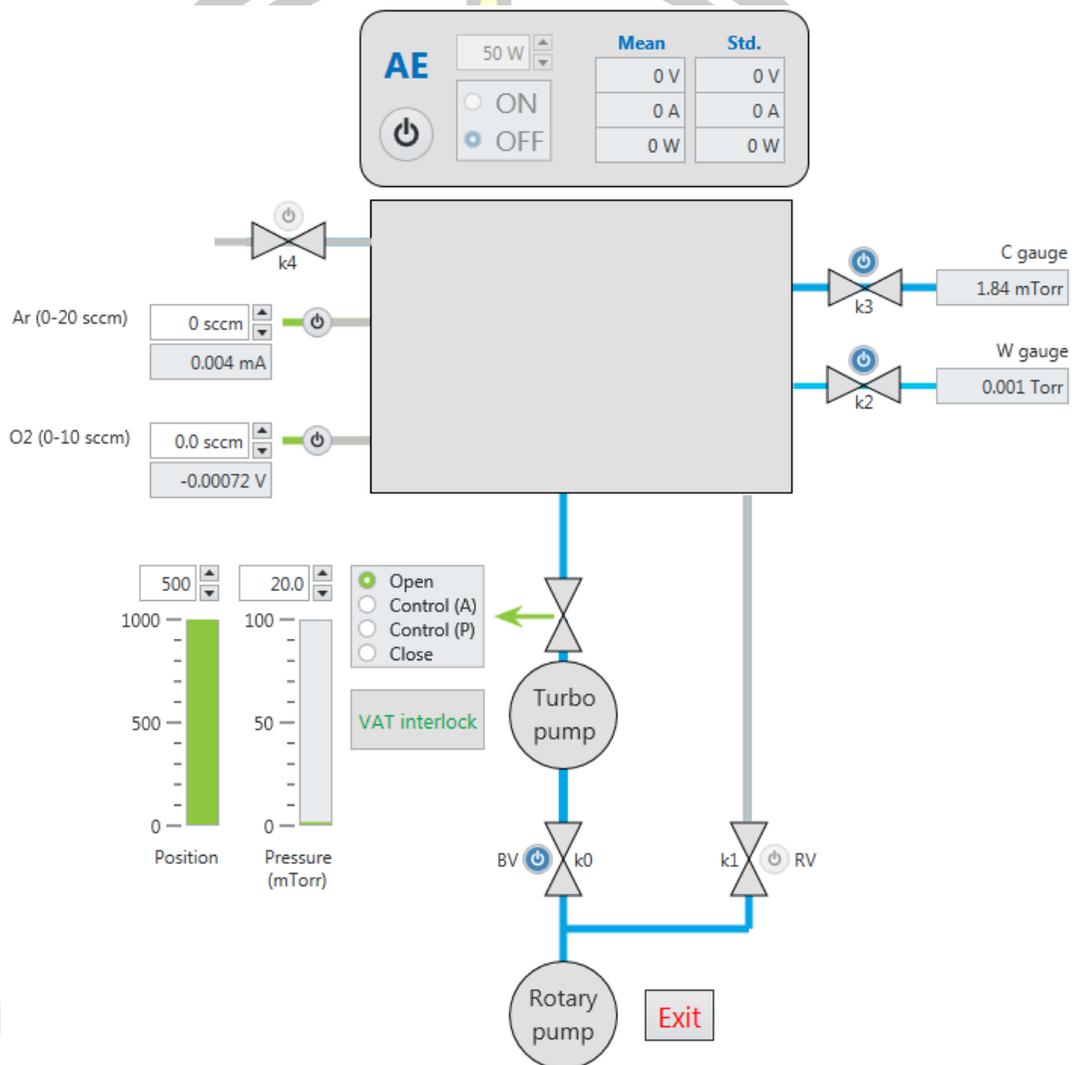
สำหรับระบบสุญญากาศที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ซึ่งระบบสุญญากาศมีความสำคัญในการสร้างสภาวะที่มีความเหมาะสมการเกิดฟิล์มบาง ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.3 ที่ประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศที่ไร้รอยเชื่อมรูปทรงกระบอกขึ้นรูปจากอลูมิเนียม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงภายใน 250 mm และ 300 mm ตามลำดับ ในส่วนของปั๊มสุญญากาศประกอบด้วย ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์สามารถทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศได้ในช่วง 10^{-1} ถึง 10^{-6} Torr ซึ่งต้องทำงานร่วมกับปั๊มโรตารีที่ทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศได้ในช่วง 10^{-1} ถึง 10^{-6} Torr สำหรับวาล์วปิดกั้นเชื้อเพลิงติดตั้งอยู่ระหว่างภาชนะสุญญากาศกับ ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ทำหน้าที่ในการควบคุมความดันภายในในระบบสุญญากาศขณะทำการเคลือบฟิล์มได้โดยการปรับตำแหน่งของวาล์ว สำหรับส่วนที่เป็นเกจวัดความดันแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ 1. Wide – range gauge ที่ภายในประกอบไปด้วย ion gauge และ pirani gauge สามารถอ่านค่าความดันได้ในช่วง 10^3 ถึง 10^{-6} Torr ใช้สำหรับอ่านค่าความดันฐานของระบบเท่านั้น 2. Capacitance gauge สามารถอ่านค่าความดันได้ในช่วง 10^{-1} ถึง 10^{-4} Torr ใช้สำหรับอ่านค่าความดันขณะทำการเคลือบฟิล์ม ซึ่งเกจวัดความดันทั้งสองอย่างนี้จะมีการสลับกันสำหรับเปิด – ปิด การเชื่อมต่อระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเกจวัดความดัน ส่วนระบบแก๊สควบคุมอัตราการไหลของแก๊สโดยใช้ Mass flow controller และส่วนสุดท้ายเป็น venting valve ที่ทำหน้าที่ในการเปิดเพื่อนำอากาศเข้าในภาชนะสุญญากาศ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดยกเว้น venting valve ถูกควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3. 3 ไดอะแกรมแสดงระบบสุญญากาศ

3.1.3 ขั้นตอนการเดินและหยุดระบบสุญญากาศ

ในขั้นตอนการดำเนินการของระบบสุญญากาศมีความเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1.2 โดยการดำเนินการทุกอย่างจะผ่านโปรแกรมควบคุมที่มีหน้าต่างสำหรับควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3. 4 ไดอะแกรมสำหรับควบคุมการดำเนินงานของระบบ

จากรูปที่ 3.4 เป็นไดอะแกรมของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานสำหรับระบบสุญญากาศ เป็นโปรแกรมเบื้องต้นในการเตรียมระบบสุญญากาศก่อนที่จะทำการเตรียมฟิล์ม โดยก่อนการดำเนินการระบบจะอยู่ในสถานะความดันบรรยากาศ ซึ่งปั๊มโรตารียังไม่เปิดใช้งาน และภาชนะสุญญากาศอยู่ในสถานะปิดพร้อมที่จะเตรียมเดินระบบสุญญากาศ ซึ่งการทำการทดลองทุกครั้งต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง และเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการเดินระบบสุญญากาศ

1. เมื่อภาชนะสุญญากาศอยู่ในสถานะพร้อมที่จะเดินระบบสุญญากาศ เพื่อให้มั่นใจต้องทำการเช็คที่ venting valve ว่าปิดอยู่ จึงเริ่มเปิดปั๊มโรตารี จากนั้นค่อยเริ่มกระบวนการเดินระบบ โดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.4 ซึ่งวาล์วทุกตัวต้องปิด
2. เริ่มต้นด้วยการกดที่ Roughing valve (RV) ทำหน้าที่ในการสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านปั๊มโรตารีโดยตรงซึ่งในส่วนนี้ต้องการความดันที่ต่ำกว่า 5×10^{-2} Torr เพื่อให้สามารถอ่านค่าความดันได้ต้องเปิดวาล์วที่ Wide – range gauge
3. เมื่อความดันที่ต่ำกว่า 5×10^{-2} Torr ปิด Roughing valve แล้วเปิด Backing valve ที่เป็นการปั๊มอากาศผ่านปั๊มเทอร์โบแต่ยังไม่ได้สูบอากาศผ่านภาชนะสุญญากาศเพราะวาล์วปีกผีเสื้อยังปิดอยู่ จากนั้นค่อยๆเปิดวาล์วปีกผีเสื้อเป็นขั้นๆ จนตำแหน่งวาล์วปีกผีเสื้ออยู่ในสถานะเปิด 100% เพื่อไม่ให้ใบพัดของเทอร์โบเกิดความเสียหาย สำหรับ Roughing valve และ Backing valve ไม่สามารถใช้งานพร้อมกันได้เมื่อต้องการใช้งานต้องสลับกันใช้
4. เปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ โดยสังเกตรอบการหมุนของใบพัดซึ่งค่าสูงสุดจะอยู่ที่ 1000 Hz ถึงจะอยู่ในสถานะการทำงานที่ปกติ จากนั้นเปิดวาล์วของ Capacitance gauge รอกการปั๊มอากาศประมาณ 30 นาที ถึงจะได้ความดันฐานของระบบอยู่ที่ประมาณ 1×10^{-5} Torr
5. เปิดระบบน้ำหล่อเย็นของหัวแมกนีตรอนเพื่อเป็นการพร้อมสำหรับการเคลือบฟิล์มในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนการปิดระบบ

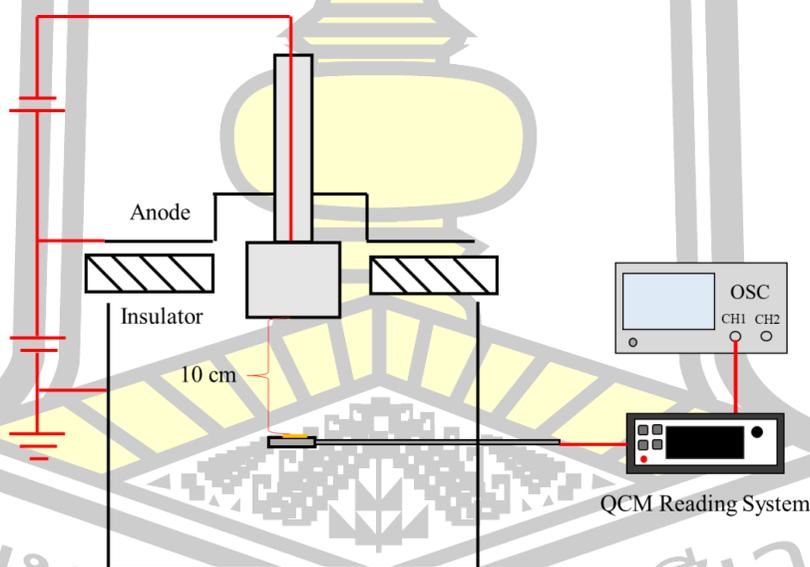
1. เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วให้เริ่มจากการปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อเป็นการหยุดการสร้างพลาสมา
2. ปิดวาล์วควบคุมการจ่ายแก๊ส สามารถสังเกตได้จากความดันของระบบที่ลดลง
3. ปิดวาล์วของเกจวัดความดันสำหรับ Capacitance gauge และ Wide – range gauge
4. ปิดวาล์วปีกผีเสื้อให้อยู่ในปิด 0% แล้วปิด Backing valve แล้วปั๊มโรตารี
5. ปิดโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ แล้วเปิด venting valve เพื่อให้อากาศเข้ามาในระบบจนภายในภาชนะสุญญากาศเป็นความดันบรรยากาศ

3.2 การดำเนินงาน

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้ทำการเก็บข้อมูล และเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบไรด์เพื่อนำเสนอเทคนิคการเตรียมฟิล์มรูปแบบใหม่ด้วยการใช้การไปอัสที่แอโนด โดยการศึกษาเหตุการณ์ระหว่างการเคลือบ พารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง และสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม รวมถึงขั้นตอนการทำความเข้าใจงานที่มีความสำคัญต่อการยึดติดที่ดี

3.2.1 การวัดอัตราการตกสะสมด้วยผลึกควอตซ์

ในการวัดอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโอบไรด์ มีวัตถุประสงค์เพื่อที่บอกถึงความหนาของฟิล์มแบบคร่าวๆ ก่อนการเคลือบจริง เนื่องจากการวิเคราะห์ฟิล์ม บางเทคนิคต้องการความหนาของฟิล์มอยู่ในระดับไม่เกิน 200 nm การวัดอัตราการตกสะสมด้วยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (Quartz Crystal Microbalance, QCM) [35] เป็นการวัดมวลที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่การสั่นพ้องของผลึกควอตซ์ งานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ รุ่น STM – 2XM (Inficon) สามารถอธิบายไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราการตกสะสมดังรูปที่ 3.5



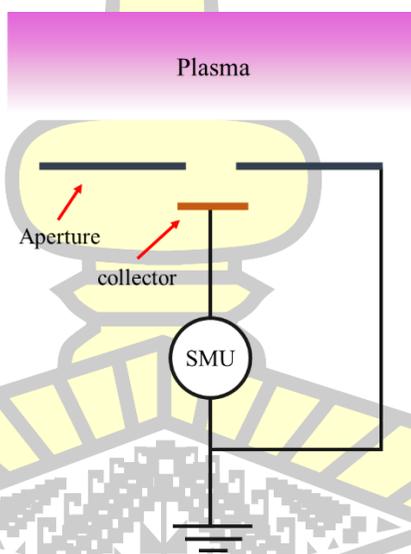
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบการวัดอัตราการตกสะสม

จากรูปที่ 3.5 แสดงไดอะแกรมสำหรับการวัดอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโอบไรด์ จำเป็นต้องมีการตั้งค่า Density และ Z - Ratio ให้มีความเหมาะสมกับเป้าวัสดุที่เป็นธาตุหรือสารประกอบชนิดนั้นๆ ซึ่งสำหรับเป้าไทเทเนียมไดโอบไรด์มีค่า Density และ Z - Ratio เป็น 4.500 และ *1.000 ตามลำดับ เพื่อให้สะดวกและมีความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลที่ได้อิงจากการตั้งข้อมูลที่ได้

จากเครื่องวัดอัตราการตกสะสมเป็นสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่เป็นค่าของอัตราการตกสะสมมาที่เครื่องออสซิลโลสโคป ในการวัดอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ มีเงื่อนไขในการทดลองดังนี้ ความดันฐานของระบบก่อนการทดลอง 1.56×10^{-5} Torr ระยะห่างระหว่างเป้าวัสดุกับหัววัดอัตราการตกสะสม 10 cm อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm ความดันแก๊สอาร์กอนขณะทดลองประมาณ 2.14 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวแมกนีตรอนทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 50 100 150 และ 200 W และการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับแอโนดเป็น Ground, +25, +50, +75, +100 และ +125V

3.2.2 การวัดสมบัติของพลาสมา

ในการศึกษาสมบัติของพลาสมาในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัววัดแลงเมียร์ซึ่งหน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาประดิษฐ์ ซึ่งโครงของหัววัดไม่ซับซ้อน เข้าใจได้ง่ายเหมาะสำหรับใช้ในระดับแลปสเกล โดยทำงานควบคู่กับเครื่อง Source Meter Unit (SMU) ซึ่งทำหน้าที่ในการจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแส โดยสามารถแสดงไดอะแกรมของการวัดสมบัติของพลาสมาได้ดังรูปที่ 3.6



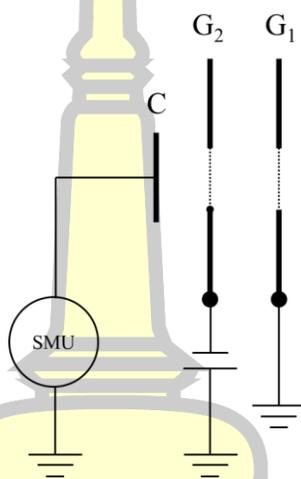
รูปที่ 3. 6 ไดอะแกรมการวัดสมบัติของพลาสมา

จากรูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของหัววัดแลงเมียร์ประกอบด้วย Aperture ที่ทำหน้าที่เป็นรูเปิดให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ซึ่งต่อลงกราวด์ ส่วนหัวรับกระแสไฟฟ้าจะอยู่ถัดจาก Aperture ซึ่งถึงขั้นด้วยแผ่น PEEK ทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าทั้งสองมิให้สัมผัสกัน โดยในการวัดสมบัติของพลาสมาถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การปรับค่าศักย์แอโนดไบอัสเป็น 0 +25 +50 +75 +100 และ +150 V

การปรับค่ากำลังไฟฟ้าเป็น 50 100 150 200 และ 250 W และการปรับค่าความดันแก๊สเป็น 2 4 6 8 และ 10 mTorr

3.2.3 การวัดพลังงานไอออน

การศึกษาพลังงานของไอออนจากการไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนด โดยใช้เทคนิค Retarding Field Energy Analyzer (RFEA) ที่ทำงานร่วมกับเครื่อง Source Measure Unit (SMU) และมีการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบที่ขั้วกริดที่สองของหัววัด ขั้วกริดที่หนึ่งต่อกับกราวด์ ส่วนขั้วที่ทำ การวัดพลังงานไอออนต่อกับเครื่อง SMU สามารถแสดงไดอะแกรมของหัววัดได้ดังรูปที่ 3.7



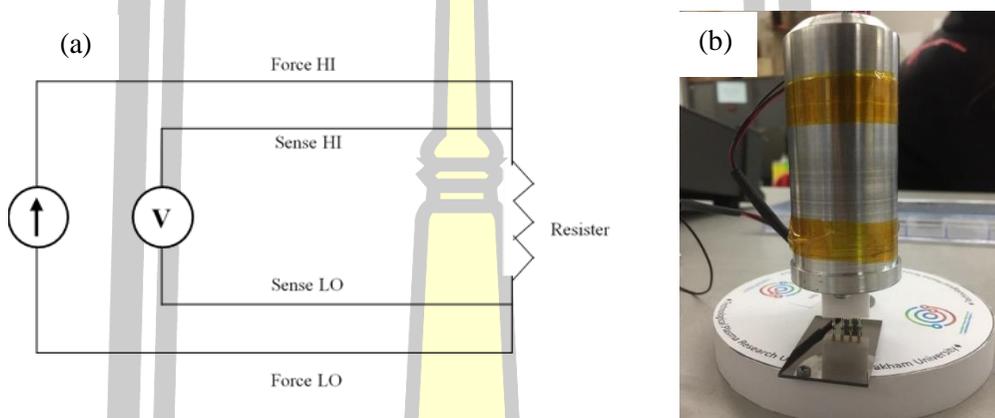
รูปที่ 3. 7 ไดอะแกรมหัววัดพลังงานไอออน

การติดตั้งหัววัดพลังงานไอออนมีลักษณะเหมือนกับการติดตั้งการวัดอัตราตกสะสม ดังรูปที่ 3.7 จากรูปที่ 3.7 ที่ขั้ว G_2 จ่ายศักย์ไฟฟ้า -15 V ตลอดการทดลองเพื่อทำหน้าที่หลักอิเล็กตรอนไม่ให้ทะลุผ่านถึงขั้ววัดพลังงานไอออน สำหรับขั้ววัดพลังงานไอออนที่ต่อกับ เครื่อง SMU สิ่งที่วัดได้คือกระแสของไอออน โดยทำกับกำหนดช่วงศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้ววัดกระแสเป็น -10 V ถึง 120 V ทั้งหมด 400 จุด ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง SMU คือการจ่ายศักย์ไฟฟ้าไปหนึ่งค่าแล้ววัดกระแสที่ได้หนึ่งค่าจนครบช่วงที่กำหนด โดยการทดลองวัดพลังงานของไอออนจะแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขดังนี้ เงื่อนไขที่ 1 ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขั้วแอโนดเป็น ศักย์ลอย (Floating potential) $+10$ $+20$ $+30$ $+40$ $+50$ $+60$ $+70$ $+80$ $+90$ และ $+100$ V ตามลำดับ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้า 150 W อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm และความดันแก๊สขณะเคลือบ 3 mTorr เงื่อนไขที่ 2 ปรับค่ากำลังไฟฟ้าเป็น 50 100 150 200 และ 250 W ตามลำดับ โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขั้วแอโนดเป็น $+50$ V อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm และความดันแก๊สอาร์กอนขณะเคลือบ 3 mTorr

เงื่อนไขที่ 3 ปรับค่าความดันขณะเคลือบเป็น 3 6 9 12 และ 15 mTorr ตามลำดับ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้า 150 W ศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ขั้วแอโนดเป็น +50 V และความดันแก๊สขณะเคลือบ 3 mTorr

3.2.4 การวัดค่าความต้านทานด้วยหัววัด 4 จุด

สำหรับการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มไทเทเนียมไดโอบไรด์ทั้งหมด 6 เงื่อนไขได้แก่ TiB0 TiB25 TiB50 TiB75 TiB125 และ TiB150 ซึ่งสามารถแสดงไดอะแกรมการต่อหัววัด 4 จุด และการติดตั้งได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3. 8 (a) ไดอะแกรมการต่อหัววัดสี่จุดกับเครื่อง SMU (b) การติดตั้งหัววัด 4 จุด

จากรูปที่ 3.8 (a) ขั้วด้านนอกที่เป็น Force Hi และ Force LO เป็นขั้วที่ต่อกับ SMU ทำหน้าที่ในการจ่ายกระแส ส่วนขั้วด้านใน Sense HI และ Sense LO ทำหน้าที่ในการวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม ซึ่งค่าที่วัดออกมาได้จะเป็นค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานของฟิล์มบางตามสมการที่ 3.1

$$\rho = R_{sh} \times t, t \ll s \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 สามารถใช้ได้ในกรณีที่ฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาน้อยกว่าระยะห่างของเข็มหัววัด ซึ่งสามารถนำค่าความต้านทานเชิงแผ่นคูณกับหนาของฟิล์มได้

3.2.5 การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบไรด์

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบไรด์ด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ใช้การไบอัสที่ขั้วแอโนด รวมถึงการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโอบไรด์เพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพที่ดี

3.2.5.1 การทำความสะอาดชิ้นงาน

การทำความสะอาดชิ้นงานมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการเตรียมฟิล์มทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นชิ้นงานที่เป็นกระจก ซิลิกอน และโลหะขึ้นต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ซิลิกอนในการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ [36] สำหรับวัตถุประสงค์ของกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานคือการกำจัดสารเคมี และอนุภาคสิ่งสกปรกโดยไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงหรือทำลายพื้นผิวหรือสารตั้งต้นของชิ้นงาน พื้นผิวของชิ้นงานที่เป็นซิลิกอนจะต้องไม่ได้รับผลกระทบที่เป็นความขรุขระ หรือการกัดกร่อนส่งผลต่อการทำความสะอาดชิ้นงาน

การทำความสะอาดชิ้นงานที่เป็นซิลิกอน [37] โดยการใช้สารละลายในการทำความสะอาด สารละลายสามารถทำความสะอาดคราบไขมัน และสิ่งปนเปื้อนที่ปรากฏบนพื้นผิวชิ้นงาน แต่นำเสียดายที่สารละลาย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะซิโตน) หลงเหลือสารละลายบนชิ้นงาน ขั้นตอนการทำความสะอาด เทอะซิโตนลงในภาชนะแก้ว และเทเมธานอลลงในภาชนะแก้วอีกอัน แล้วนำภาชนะแก้วลงในอ่างน้ำอุ่น (อุณหภูมิไม่เกิน 55°C) จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานซิลิกอนลงในภาชนะแก้วที่มีอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นย้ายมาที่ภาชนะแก้วที่มีเมธานอลเป็นเวลา 2 ถึง 5 นาที จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำ DI (Deionized water) สุดท้ายเป่าด้วยลมไนโตรเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานดังนี้

1. นำแผ่นชิ้นงานซิลิกอนมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$
2. เตรียมเครื่องอัลตราโซนิค โดยการเทน้ำ RO (Reverse Osmosis) หรือน้ำดื่มลงในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิค และทำการตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำไว้ที่ประมาณ 30°C
3. นำชิ้นงานซิลิกอนที่ตัดแล้วจุ่มวางเรียงในภาชนะแก้ว แล้วเทอะซิโตน (Acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) ลงในภาชนะแก้วจนท่วมแผ่นซิลิกอนเล็กน้อยจากนั้นนำภาชนะแก้วที่มีแผ่นซิลิกอนแช่อะซิโตนลงไปแช่ในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิคโดยทำการสั่นเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนจะทำเพียง 1 รอบ
4. เทเมธานอล (Methanol, CH_3OH) ลงในภาชนะแก้วอีกอันแล้วนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนมาใส่ที่ภาชนะที่มีเมธานอลโดยทำการสั่นเป็นเวลา 10 นาที สำหรับการทำความสะอาดด้วยเมธานอลจะทำ 2 รอบ

5. เทน้ำ DI ลงในภาชนะแก้วอีกอัน แล้วนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเมธานอลมาใส่ที่ภาชนะที่มีน้ำ DI โดยทำการสั่นเป็นเวลา 10 นาที สำหรับการทำความสะอาดด้วยน้ำ DI จะทำ 3 รอบ
6. นำชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดมาเป่าด้วยลมไนโตรเจน และใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าให้แห้ง จากชิ้นงานในตู้ดูดความชื้น

หมายเหตุ สารละลายที่เป็นอะซีโตน และเมธานอลควรทิ้งในขวดทิ้งสารแต่ละชนิด และควรใส่ถุงมือทุกครั้งในการทำทำความสะอาด

3.2.5.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสเปดเตอริง

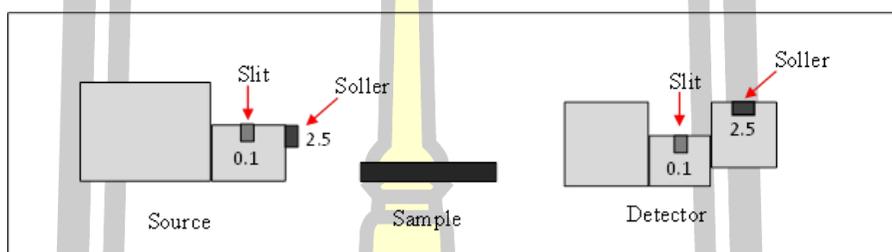
เมื่อชิ้นงานที่จะนำมาเคลือบผ่านกระบวนการทำความสะอาดเป็นอย่างดีแล้วก็สามารถนำชิ้นเข้าเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศได้ โดยต้องติดตั้งเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ความหนา 0.25 นิ้ว ความบริสุทธิ์ 99.5%) ระยะห่างระหว่างผิวเป้าวัสดุกับชิ้นงาน 10 cm สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเคลือบฟิล์มบาง โดยมีวงแหวนเทปลอนชั้นอยู่ระหว่างฝาภาชนะสุญญากาศกับภาชนะสุญญากาศ เพื่อไม่ให้เกิดการสัมผัสกันเมื่อต้องการไบอัสที่ชั่วแอโนด การที่จะสามารถไบอัสที่ชั่วแอโนดได้คือสายดินต้องอยู่ในสถานะที่ลอย และใช้แหล่งแหล่งจ่ายไฟอีกอันเพื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับชั่วแอโนด เมื่อติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้วรอความดันฐานของระบบประมาณ 30 นาที ความดันก่อนเคลือบทุกเงื่อนไขประมาณ 1.45×10^{-5} Torr ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สตั้งต้นในการสร้างพลาสมา อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm ความดันแก๊สอาร์กอนขณะทำความสะอาดด้วยพลาสมาประมาณ 80 mTorr ซึ่งใช้เวลาในการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมา 10 นาที จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดเป้าวัสดุก่อนการเคลือบด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหัวแมกนีตรอน 200 W ขณะที่ทำความสะอาดชิ้นงานไปด้วยเป็นเวลา 2 นาที ซึ่งขณะที่ทำความสะอาดเป้าไทเทเนียม ไดโบไรด์จะถูกปิดหน้าเป้าด้วยชัตเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดการเคลือบที่หน้าเป้า เมื่อผ่านกระบวนการทำความสะอาดเป้าทั้งหมด ชั้นแรกที่ทำคือการเคลือบคือชั้นรองพื้นไทเทเนียม (Ti interlayer) ซึ่งขั้นนี้ไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าศักย์แอโนดไบอัส โดยจะคงสถานะศักย์ไฟฟ้าที่ต่อกับชั่วแอโนดเป็นกราวด์ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 5 นาที จากนั้นจะทำการเคลือบฟิล์มชั้นไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB₂ layer) สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มคือการปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับชั่วแอโนดเป็น 0 +25 +50 +75 +125 และ +150 V ตามลำดับ หลังจากเคลือบฟิล์มเสร็จพักชิ้นงานไว้ในภาชนะสุญญากาศเป็นเวลา 10 นาทีก่อนนำชิ้นงานออกมา

3.3 วิธีการวิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์

สำหรับการวิเคราะห์ฟิล์มบางจำเป็นต้องเรียนรู้ถึงหลักการ และการทำงานพื้นฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง เพื่อให้สามารถทราบถึงโครงสร้างระดับจุลภาคและ สมบัติเชิงกลของฟิล์ม ได้แก่ เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ เทคนิคการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์

3.3.1 การใช้งานเครื่อง XRD ในโหมด Grazing Incidence Diffraction (GID)

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังไดอะแกรมที่ 3.9

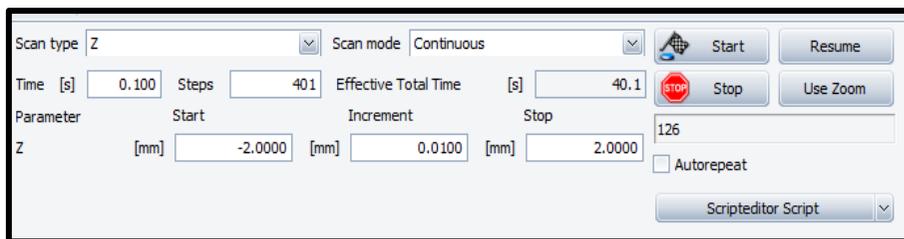


รูปที่ 3. 9 ไดอะแกรมการติดตั้งอุปกรณ์เครื่อง XRD ในโหมด Grazing Incidence Diffraction (GID) จากนั้นตั้งค่าโปรแกรมที่ใช้สั่งการเครื่อง XRD ดังนี้

ในขั้นตอนนี้จะไม่มีชิ้นงานอยู่ในเครื่อง จากนั้นทำการตรวจเช็คค่าต่างๆ เช่น Check the detector : 0D mode กดตั้งค่า the Linear opening เป็น 14 >> กด Apply >> กดปิด จากนั้นไปที่ File >> Application >> High resolution มาที่ set up parameter แล้วทำตามด้านล่าง จากนั้นกดที่ปุ่ม (3.45)

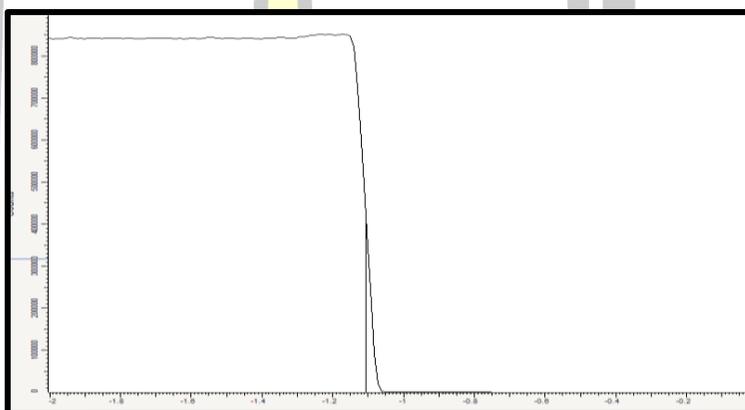
Omega - H = 0	<input checked="" type="checkbox"/>	X = 0	<input checked="" type="checkbox"/>
Theta2 - H = 0	<input checked="" type="checkbox"/>	Y = 0	<input checked="" type="checkbox"/>
Detector = 0	<input type="checkbox"/>	Z = 0	<input checked="" type="checkbox"/>

2. เมื่อตั้งค่าตามข้อที่1 เสร็จแล้วต่อมาจะเป็นการ Alignment โดยตั้งค่า Scan type เป็น Two theta Scan mode เป็น Continuous Time [s] เป็น 0.1 และ 2Theta [°] : Start เป็น -1, Increment เป็น 0.01, Stop เป็น 1 เมื่อทำการใส่ค่าข้อมูลทั้งหมดแล้วกดปุ่ม Start สิ่งที่ได้จะเป็นกราฟที่เป็นพีค ซึ่งตำแหน่งของพีคไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง 0 โดยจะทำการ Scan อีกครั้ง โดยไปที่แถบ Commander จากนั้นกด Reference And Offset Determination แล้วกด Apply จากนั้นกดออก แล้วกด Start ซึ่งสามารถอ้างอิงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3. 10 แถบหน้าต่างของโปรแกรมสั่งการเครื่อง XRD

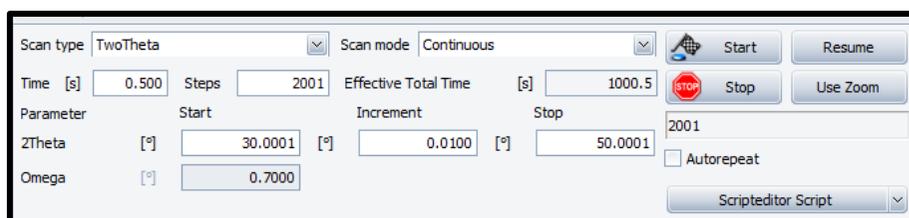
- นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางของฐานวางชิ้นงาน จากนั้นตั้งค่าโดยข้อมูลทุกอย่างตามรูปที่ 3.10 สำหรับ Scan type เป็น Z กราฟที่ได้มีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 3.11 แล้วคลิกสองครั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางกราฟ



รูปที่ 3. 11 กราฟที่ได้จากการ Scan type Z

จากนั้นเปลี่ยน Scan type: Z เป็น Scan type: Rocking Curve โดยอ้างอิงตามรูปที่ 3.10 เริ่มจาก Scan mode เป็น Continuous Time [s] เป็น 0.1s Omega Start เป็น -1 Increment เป็น 0.01 Stop เป็น 1 จากนั้นกด Start เมื่อทำ Scan type: Rocking Curve เสร็จแล้ววนกลับมาทำ Scan type: Z และ Scan type: Rocking Curve อีกครั้ง

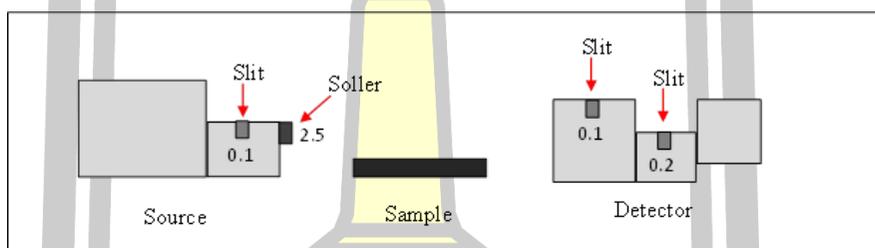
- นำ slit และ Soller ออกให้หมดแล้วใส่ Slit 1.0 ที่กล่องทางด้านซ้ายมือ ในขั้นตอนนี้เป็น การวิเคราะห์ผลจากฟิล์ม โดยตั้งค่าข้อมูลได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งช่วงของมุม 2θ สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม



รูปที่ 3. 12 แลหน้าต่างการตั้งค่าสำหรับการวัด XRD ในโหมด GID

3.3.2 การใช้งานเครื่อง XRD ในโหมด X-Ray Reflectometry (XRR)

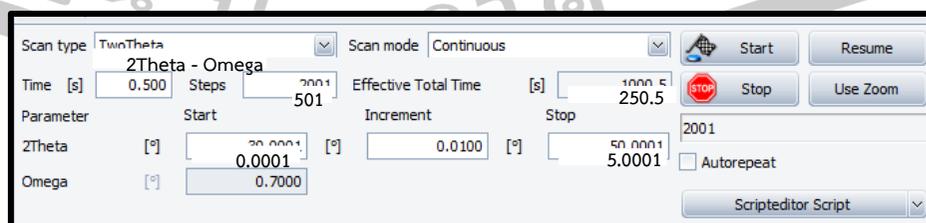
สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่อง XRD ในโหมด X-Ray Reflectometry (XRR) มีขั้นตอนในการวัดคล้ายกับหัวข้อที่ 3.3.1 แต่มีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์เล็กน้อยดังแสดงตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3. 13 ไดอะแกรมการติดตั้งอุปกรณ์เครื่อง XRD ในโหมด X-Ray Reflectometry (XRR)

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เสร็จแล้ว สามารถดำเนินการตามหัวข้อ 3.3.1 สำหรับข้อที่ 1 2 และ 3 โดยข้อข้อที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในขั้นตอนของการทำ Scan type: Z ในรอบที่สองเสร็จแล้วให้เปลี่ยนค่า Theta2 - H เป็น 0.4 สำหรับการวัด ในโหมด XRR เท่านั้น จากนั้นสามารถดำเนินการตามข้อที่ 3 ตามปกติ

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการในข้อที่ 3 จะเป็นการวัดฟิล์มในโหมด XRR ซึ่งสามารถตั้งค่าการวัดได้ดังรูปที่ 3.13 แล้วเปลี่ยนค่าของ Scale จาก Count เป็น Log scale ส่วนการบันทึก ใช้นามสกุล .raw ทั้งโหมด GID และ XRR



รูปที่ 3. 14 แลหน้าต่างการตั้งค่าสำหรับการวัด XRD ในโหมด XRR

3.3.3 การปรับเส้นโค้งสเปกตรัม X-Ray Reflectivity

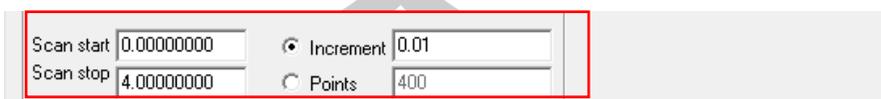
สำหรับการปรับเส้นโค้งสเปกตรัม หรือ Curve fitting สเปกตรัมจากเทคนิค XRR จะใช้โปรแกรม Leptos 7 โดยมีขั้นตอนการปรับเส้นโค้ง ดังนี้

1. นำเข้าข้อมูลไฟล์ .raw เข้ามาในโปรแกรมด้วยการกด Import .raw File (F5) มาที่แถบด้านขวามือ เลือก Edit แล้วเลือกชนิดของชิ้นงานที่ใช้ สำหรับงานวิจัยนี้เป็น Si แล้วเปลี่ยนค่าระนาบ (plane) เป็น (100) ดังรูป
2. คลิกขวาบริเวณที่วางแล้วเลือก New Sample จากนั้นเลือกวัสดุที่ใช้เป็นชิ้นงานเป็นซิลิกอน ซึ่งโปรแกรมจะแสดงข้อมูลพื้นฐานของซิลิกอนมาให้ เช่น Thickness Roughness และ Density จากนั้นเพิ่มชนิดของชิ้นงานหรือฟิล์มที่ทำการเคลือบด้วยการกด Insert ชั้นถัดขึ้นมาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นอย่างบางๆ คือ SiO₂ ซึ่งสามารถยัดข้อมูลจากรูปด้านล่างในการกรอกข้อมูล ถัดขึ้นมาเป็นชั้นฟิล์มที่ผ่านการเคลือบซึ่งที่แถบ density จะขึ้นว่า R ให้เปลี่ยนเป็น density จากนั้นใส่ค่า Thickness ของฟิล์มได้จากข้อมูลที่นำเข้ามา ส่วนค่า Roughness ให้ใส่เป็น 0.5 แล้วทำการเลือก Fit Automatically ให้มีลักษณะเป็นรูปตัว T ดังภาพด้านล่าง

N	R	Material	Cell input	Thickness	Roughness	Density T	Conc X Top, %	Conc X B
1	1	Ti	density	56.5360	0.5000	4.50060	0.0000	0.0000
2	1	SiO ₂	density	1.0000	0.5000	2.65000	0.0000	0.0000
SUB	1	Si	density	0.0000	0.5000	2.32910	0.0000	0.0000

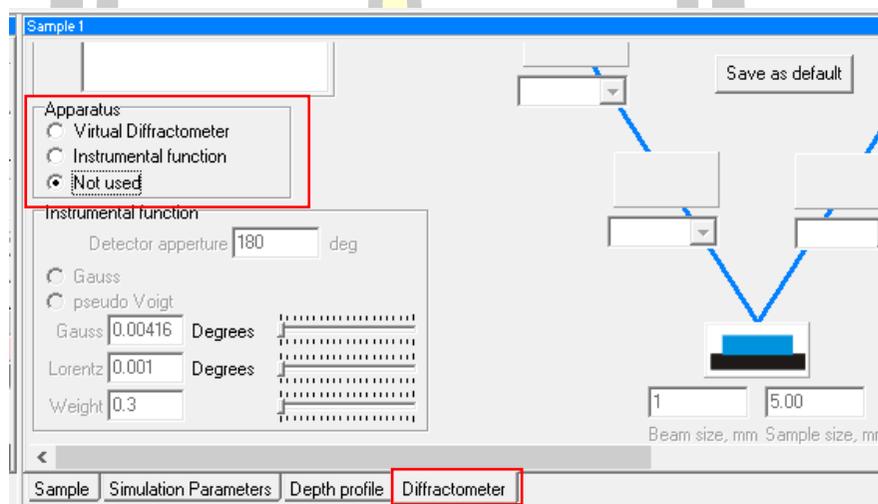
รูปที่ 3. 15 หน้าต่างแสดงตัวอย่างชั้นฟิล์มที่ระบุค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มที่ทำการจำลอง

3. จากนั้นเลื่อนมาทางด้านขวามือ ใส่ช่วงของการสแกน 2Theta แล้วเลือกที่ Increment ดังรูป



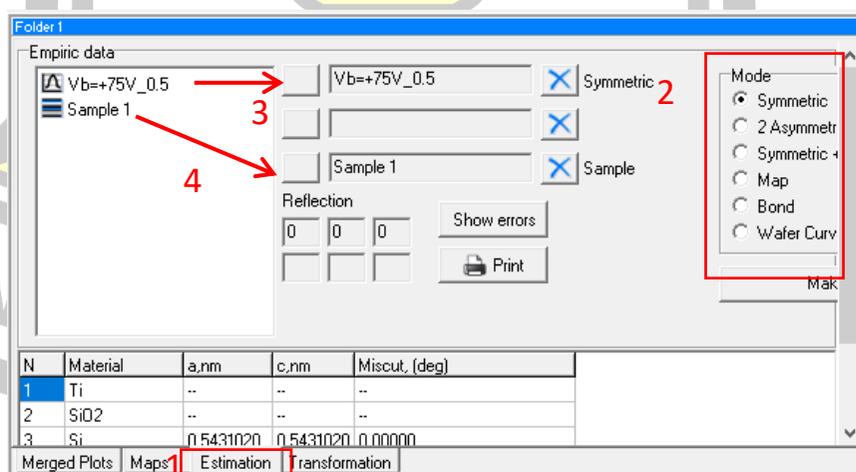
รูปที่ 3. 16 หน้าต่างที่แสดงช่วงมุม 2Theta ในการวิเคราะห์ตั้งแต่ 0 ถึง 4 องศา

4. เลือกแถบ Diffractometer แล้วไปที่ Apparatus เลือก Not Used ดังรูป



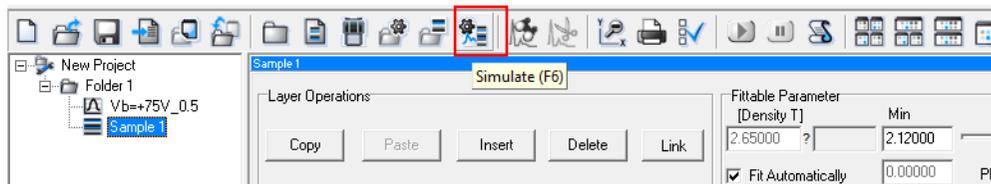
รูปที่ 3. 17 แสดงแถบหน้าต่างในโหมดของอุปกรณ์ที่เลือกใช้เป็น Not used

5. กลับไปที่ Folder1 แล้วไปที่ Estimation จากนั้นไป Mode เลือก Symmetric



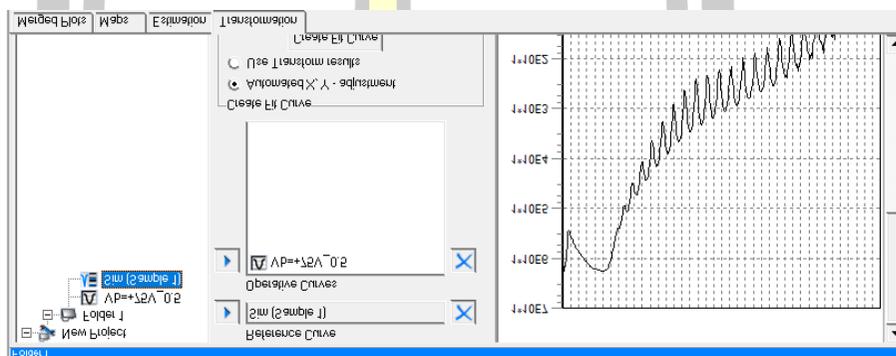
รูปที่ 3. 18 หน้าต่างแสดงการเลือกข้อมูลที่ได้กับการจำลอง

6. ไปที่ sample1 แล้วคลิก simulate (F6) แล้วจะปรากฏไฟล์ simulate ทางซ้ายมือ



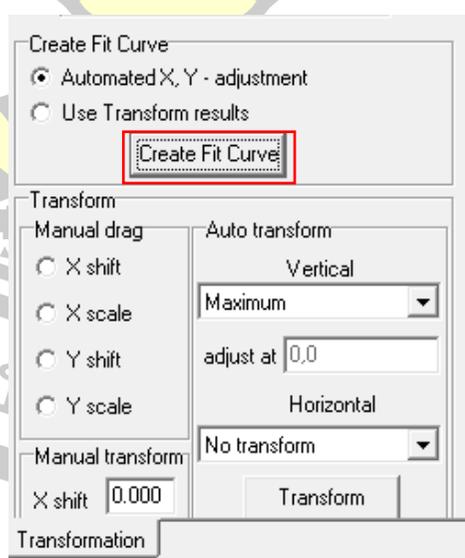
รูปที่ 3. 19 หน้าต่างแสดงแถบที่ใช้กดเพื่อเริ่มการจำลอง

7. ไปที่ folder จากนั้นไปที่ Transformation โดยกดไฟล์ RAW ไปที่ operative ส่วน Sim [sample1] ไปที่ Reference ดังรูป



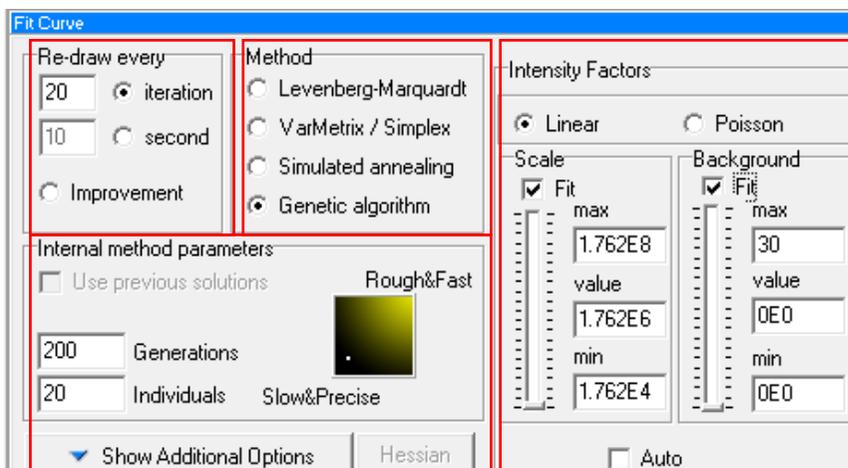
รูปที่ 3. 20 แสดงเส้นโค้งเฉพาะการจำลอง

จากนั้นเลื่อนมาด้านล่างที่ Auto transform ไปที่ Vertical แล้วเลือก Maximum แล้วคลิกที่ Create Fit Curve จะปรากฏไฟล์ Fit curve ทางซ้ายมือ แล้วกดเลือกเข้าไป



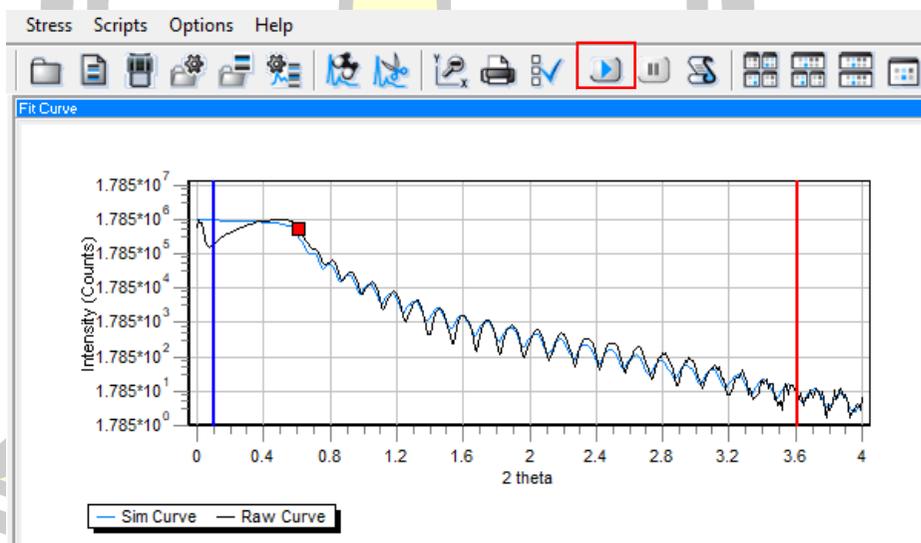
รูปที่ 3. 21 หน้าต่างแสดงปุ่มกด Create Fit Curve

8. เลื่อนมาด้านล่างที่ Fit Curve แล้วปรับค่าตามรูปด้านล่าง



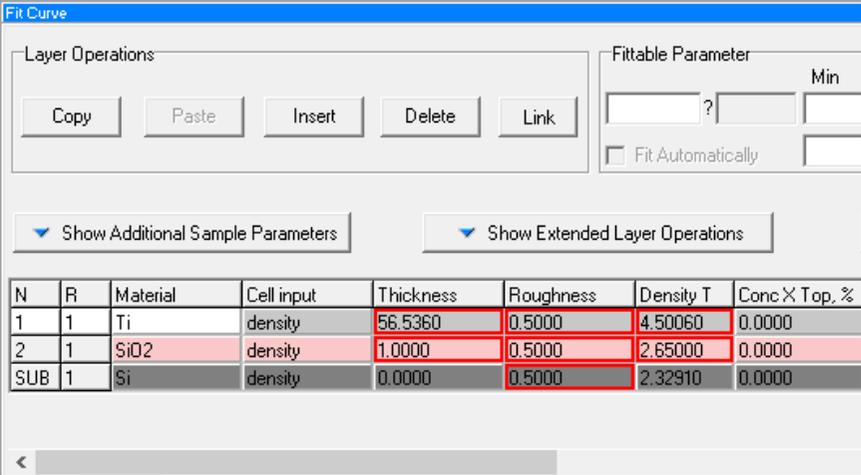
รูปที่ 3. 22 หน้าต่างแสดงข้อมูลในการกรอกก่อนการจำลอง

9. ต่อมาเป็นการเลือกช่วงของการ Fit กราฟด้วยการกด Shift แล้วทำการเลือกช่วงดังรูปด้านล่าง จากนั้นกด Run



รูปที่ 3. 23 แสดงเส้นโค้งที่ได้จากการทดลอง และเส้นโค้งที่ได้จากการจำลอง

10. เมื่อได้กราฟแล้วต้องปรับกราฟให้สองเส้นทับกันมากที่สุด ด้วยการปรับค่าหรือช่วงของ Thickness Roughness และ Density



N	R	Material	Cell input	Thickness	Roughness	Density T	Conc X Top. %
1	1	Ti	density	56.5360	0.5000	4.50060	0.0000
2	1	SiO2	density	1.0000	0.5000	2.65000	0.0000
SUB	1	Si	density	0.0000	0.5000	2.32910	0.0000

รูปที่ 3. 24 หน้าต่างแสดงตัวอย่างชั้นฟิล์มที่ระบุค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มที่ทำการจำลอง



บทที่ 4

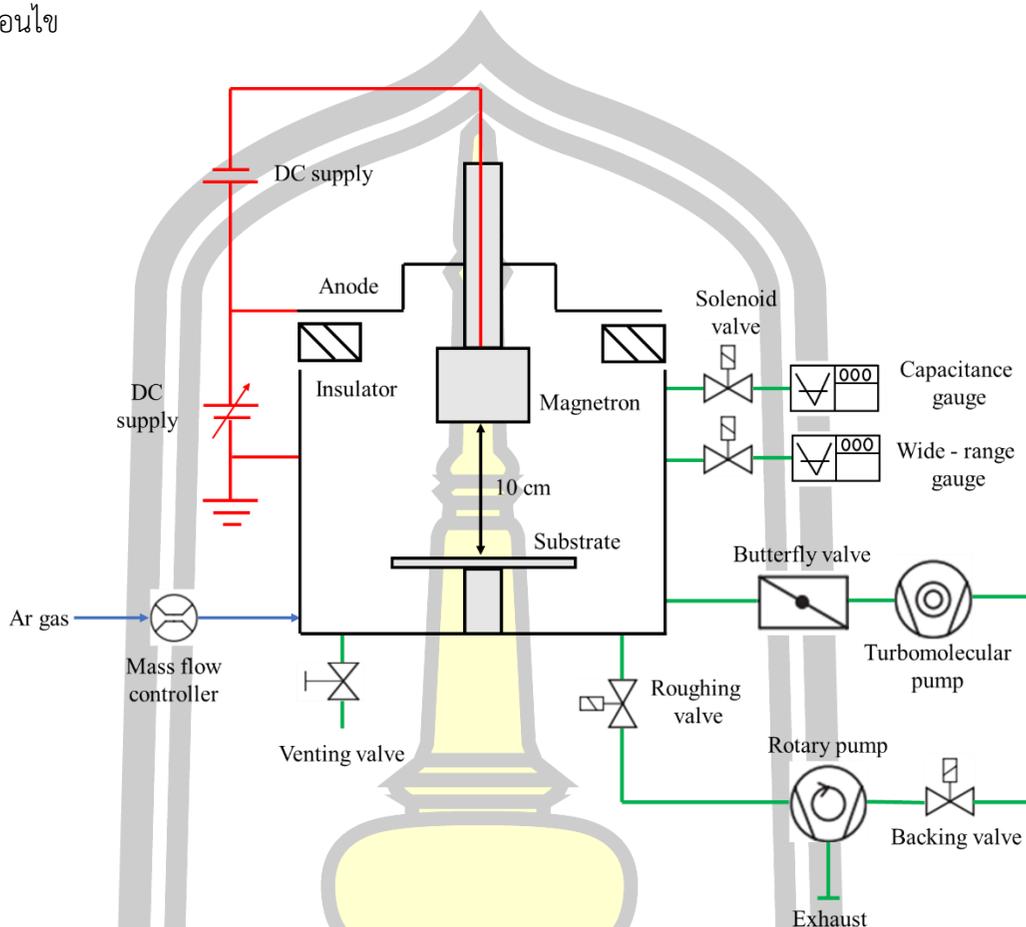
ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ที่เคลือบบนชั้นรองพื้นไทเทเนียมโดยเคลือบบนชิ้นงานที่เป็นแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เป้าสารประกอบไทเทเนียมโบไรด์ (Titanium Boride; TiB_2) (Kurt J. Lesker company, part number: EJTTIBX252A4) มีความบริสุทธิ์ 99.5% เป้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 0.25 นิ้ว โดยปกติแล้วเทคนิคการไบอัสใช้สำหรับเพิ่มพลังงานให้กับไอออนที่ระดมชนกับพื้นผิวของฟิล์มบาง ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของฟิล์มได้เช่นเดียวกัน และสำหรับสมบัติที่โดดเด่นของไทเทเนียมไดโบไรด์ ได้แก่ มีจุดหลอมเหลวที่สูง มีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี และมีความแข็งที่สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมบัติของพลาสมา พลังงานของไอออน คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติเชิงโครงสร้าง ลักษณะสัณฐานวิทยา และคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ที่เคลือบด้วยเทคนิคการไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนด

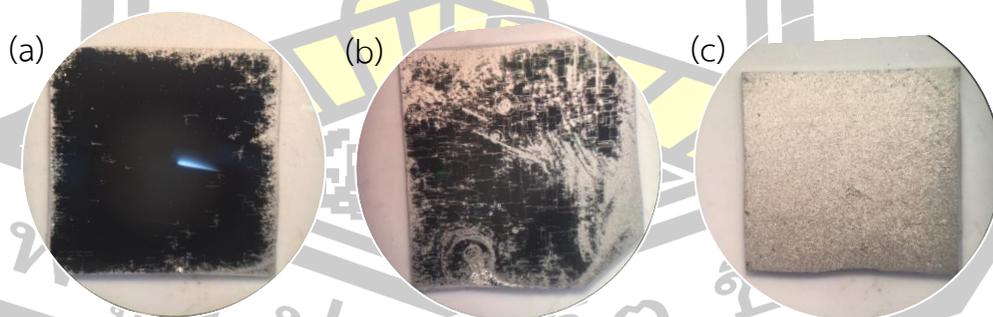
4.1 ผลการศึกษาการไบอัสศักย์บวกที่ขั้วแอโนด

การศึกษาการไบอัสศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนดในหัวข้อนี้ จะเป็นการกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ที่ไม่มีชั้นรองพื้นที่เป็นไทเทเนียม เนื่องจากการติดตั้งระบบที่ง่ายต่อการศึกษาและไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถแสดงต่อแอมแกรมของระบบเคลือบฟิล์ม ตามรูปที่ 4.1 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 แบบคือ การศึกษาพลังงานของไอออนด้วย Retarding Field Energy Analyzer (RFEA) และ ศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และ เทคนิค Nano-indentation ที่เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ได้ทำการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm ตำแหน่งของวาล์วเปิดมีเสื่อเปิดสุด ซึ่งความดันแก๊สอาร์กอนขณะเคลือบประมาณ 2 mTorr กำลังไฟฟ้าดิสชาร์จ 200 W ซึ่งทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์จากการแปลงค่าศักย์แอโนดทั้ง 6 เงื่อนไข ได้แก่ 0, 25, 50, 75, 100 และ 125 V โดยทุกเงื่อนไขใช้เวลาในการเคลือบเท่ากันคือ 6 นาที เพื่อให้สามารถทดสอบด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ และข้อจำกัดของความหนาของฟิล์มที่สามารถเคลือบได้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 200 nm หรือเวลาที่สามารถเคลือบได้โดยที่ฟิล์มไม่เกิดการหลุดลอกต้องไม่เกิน 15 นาที แต่ฟิล์มไทเทเนียมที่เงื่อนไขศักย์แอโนด

100 และ 125 V เกิดการหลุดลอก แสดงดังรูปที่ 4.2 ทำให้เหลือชิ้นงานในการทดสอบเพียง 4 ชิ้น



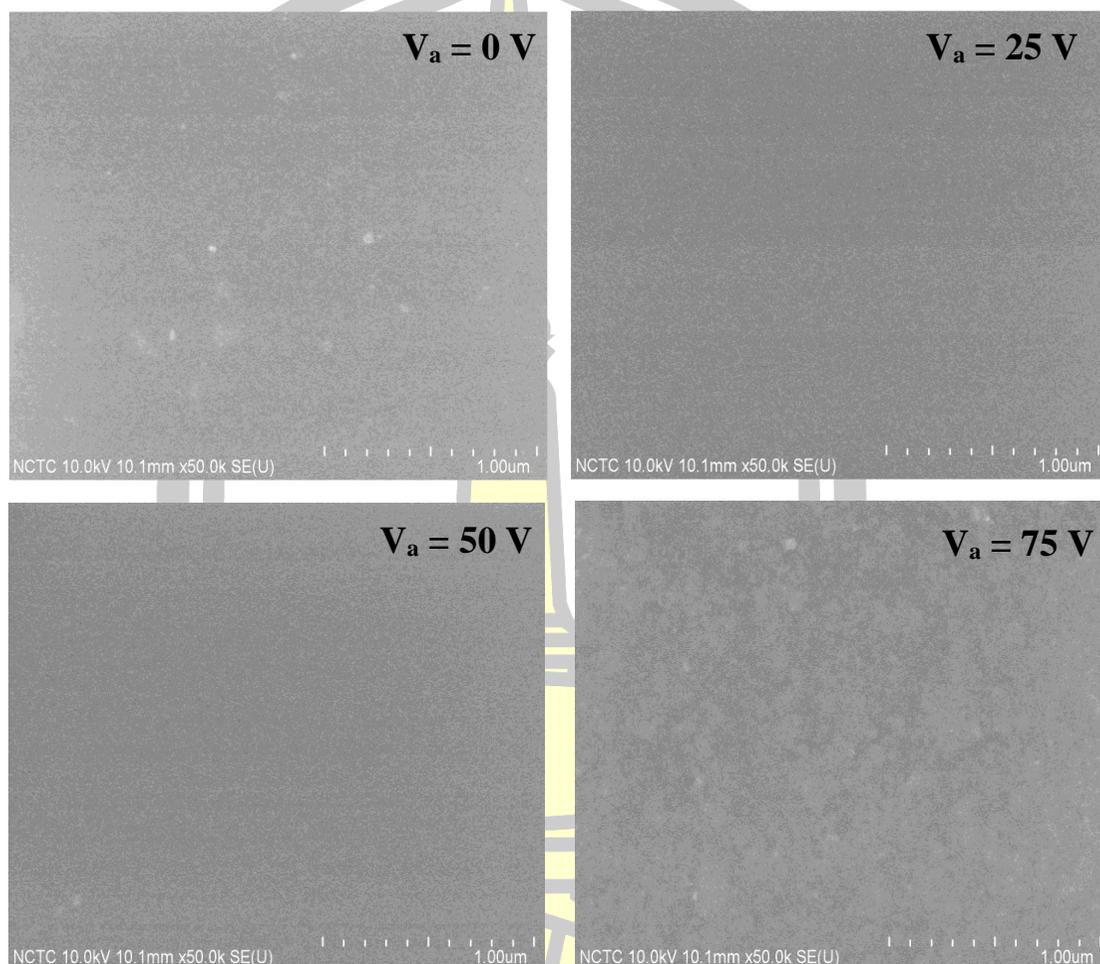
รูปที่ 4. 1 ไดอะแกรมระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบหัวเดียว



รูปที่ 4. 2 फिल्मไทเทเนียมโคโรไรต์ที่เงื่อนไข (a) ศักย์แอโนด 100 V (b) ศักย์แอโนด 125 V และ (c) ศักย์แอโนด 100 V และ 125 V เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงลักษณะของฟิล์มที่เตรียมได้ด้วยเงื่อนไขศักย์แอโนดเป็น 100 V และ 125 V ซึ่งในช่วงแรกเมื่อนำออกมาจากภาชนะสุญญากาศมีลักษณะที่แสดงดังรูปที่ 4.2 (a)

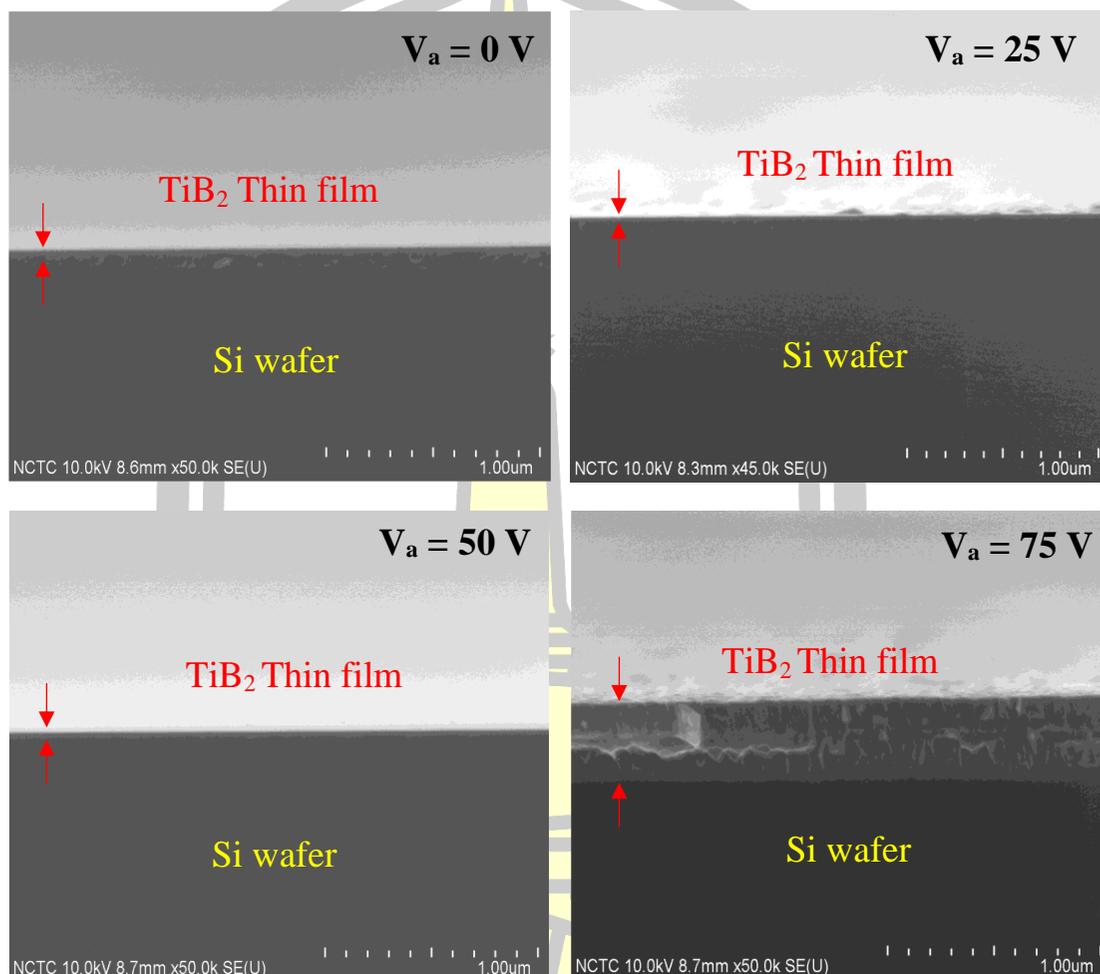
และ (b) แต่เมื่อทิ้งไว้ในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ฟิล์มทั้งสองเงื่อนไขมีลักษณะดังรูป 4.2 (c) สำหรับฟิล์มที่ไม่เกิดการหลุดลอก มีการทดลองดังนี้ เริ่มจากผลจากภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM เพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่
เงื่อนไขศักย์แอโนดไบอัส 0 25 50 และ 75 V

จากภาพที่ 4.3 ภาพด้านบนเป็นพื้นผิวของฟิล์มซึ่งจากภาพพบว่าเมื่อทำการเพิ่มศักย์แอโนดจาก 0 โวลต์ ถึง 75 V ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และฟิล์มที่เตรียมได้ไม่ปรากฏลักษณะของเกรน ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าฟิล์มทั้ง 4 เงื่อนไข มีความเป็นผลึกที่ต่ำหรือไม่พอร์มตัวกันเป็นผลึก โดยสามารถอธิบายผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มตามรูปที่ 4.5 สำหรับภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่เป็นแผ่นซิลิกอน และฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์แสดงดังรูปที่ 4.4 จากภาพพบว่าที่เงื่อนไขแอโนด 0, 25 และ 50 V ไม่สามารถระบุชั้นของฟิล์มบางได้ปรากฏอย่างชัดเพียงแค่ส่วนของชิ้นงานเท่านั้น แสดงว่า

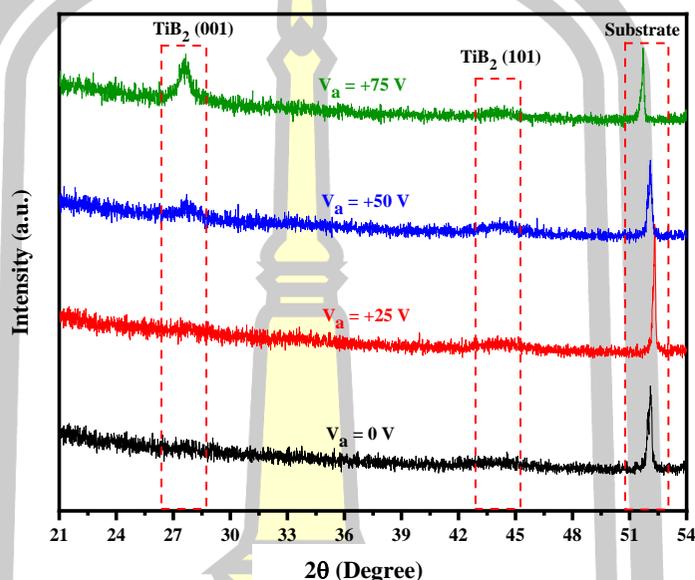
ทั้งฟิล์มบางทั้ง 3 เจือปนกันไม่ได้จับตัวกันเป็นผลึก แต่ที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V จะปรากฏชั้นของฟิล์มบางแยกกันอย่างชัดเจนกับแผ่นซิลิกอน สำหรับความหนาโดยเฉลี่ยของฟิล์มที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V ประมาณ 63.129 nm



รูปที่ 4. 4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดงภาพภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เงื่อนไขศักย์แอโนดไปอัส 0, 25, 50 และ 75 V

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เคลือบบนชิ้นงานเป็นซิลิกอน แสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่าจะปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 2 θ ประมาณ 27.56 ซึ่งเป็นมุมที่เกิดจากระนาบ (001) ของ TiB_2 โดยมีแนวโน้วของพีคที่สูงและฐานที่กว้างขึ้น เมื่อศักย์แอโนดมีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีศักย์แอโนด 0 และ 25 V จะไม่ปรากฏพีคใดๆ แสดงว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้ง 2 เจือปนกันไม่มีการรวมตัวกันภายในฟิล์มเป็นผลึก ต่างจากที่ศักย์แอโนด 50 และ 75 V ที่เริ่มปรากฏพีคอย่างเด่นชัด ในส่วนของมุม 2 θ ประมาณ 44.23 เป็นมุมที่ระนาบ (101) ของ TiB_2

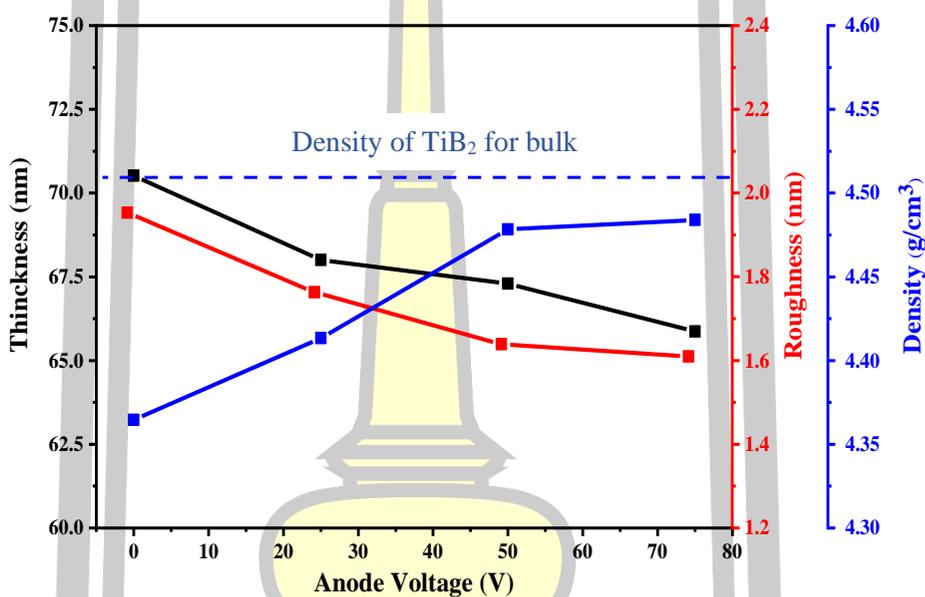
ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนนั้นมีลักษณะเป็นโดมต่ำฐานกว้าง โดยการแปลงค่าศักย์แอโนดไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีคที่ระนาบ (101) และที่มุม 2θ ประมาณ 52.19 ซึ่งเป็นพีคของผลึกซิลิกอน เนื่องจากฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เคลือบมีความหนาที่ต่ำ ทำให้พีคของซิลิกอนปรากฏอย่างเด่นชัด เมื่อเทียบกับพีคการเลี้ยวเบนของ TiB_2



รูปที่ 4. 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์

จากผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่เงื่อนไขการไบอัส 0 และ 25 V ไม่ปรากฏพีคที่ระนาบ 001 อาจเป็นผลมาจากพลังงานไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ระดมชนกับผิวฟิล์มยังมีพลังงานที่ต่ำ ซึ่งยังไม่ทำให้ฟิล์ม TiB_2 เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดีเมื่อเทียบกับการไบอัสศักย์แอโนดเป็น 50 และ 75 V จากผลงานวิจัยของ Mikula et al. ที่ได้ทำงานเตรียมฟิล์ม TiB_2 ด้วยการไบอัสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน ซึ่งอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงานมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง พบว่าที่ศักย์ไบอัส 0 V ไม่ปรากฏพีคที่ระนาบ 001 แต่เมื่อศักย์ไบอัสที่ชิ้นงานมีค่าติดลบมากขึ้น แนวโน้มของพีคที่ระนาบ 001 สูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดเมื่อศักย์ไบอัสมีค่าเป็น -100 V [13] ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองดังภาพที่ 4.5 เมื่อนำข้อมูลของพีคมาคำนวณขนาดของผลึก ซึ่งมีพีคของระนาบ 001 ที่เงื่อนไขการไบอัส 75 V โดดเด่นที่สุดมีค่าเป็น 13.18 nm ซึ่งในงานวิจัยของ Zhang ได้ทำการเตรียมฟิล์ม TiB_2 ด้วยเทคนิค HiPIMS จากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าลบบที่ฐานวางชิ้นงานในช่วง 0 ถึง -200 V และอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงานเป็น 200 และ 300 °C ขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5 ถึง 30 nm [38]

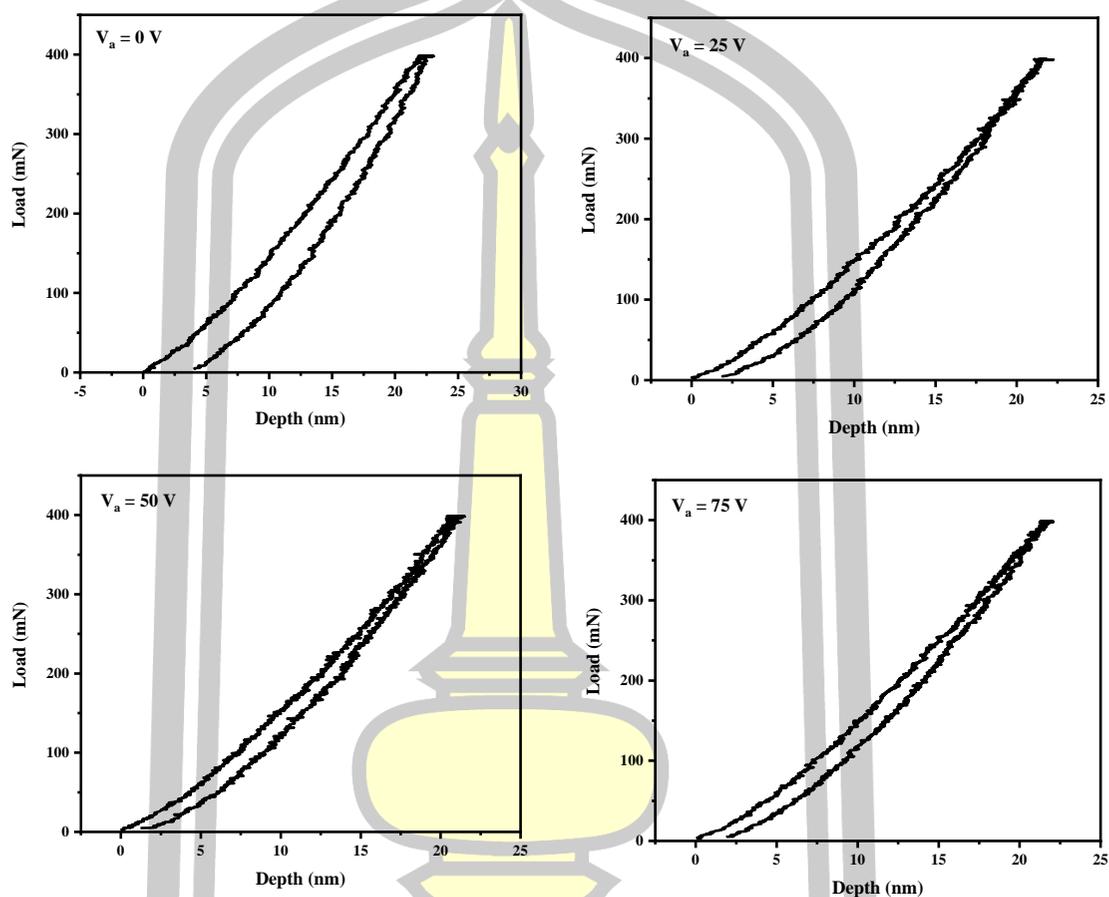
การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิคการสะท้อนกลับหมดของรังสีเอกซ์ จะใช้ฟิล์มที่ได้จากการวิเคราะห์จากเทคนิค XRD เนื่องจากการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ไม่ได้ทำลายชิ้นงาน ซึ่งฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมด 4 เจือจางจากการแปลงศักย์แอโนด ได้แก่ 0, 25, 50 และ 75 V เมื่อได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่มีความสำคัญในการนำมาจำลองด้วยโปรแกรม Leptos 7.8 เพื่อตีความลักษณะของเส้นโค้ง ซึ่งบ่งบอกความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มได้ โดยที่ผลการวิเคราะห์ฟิล์มแสดงดัง รูปที่ 4.6



รูปที่ 4. 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์เทียบกับศักย์แอโนด

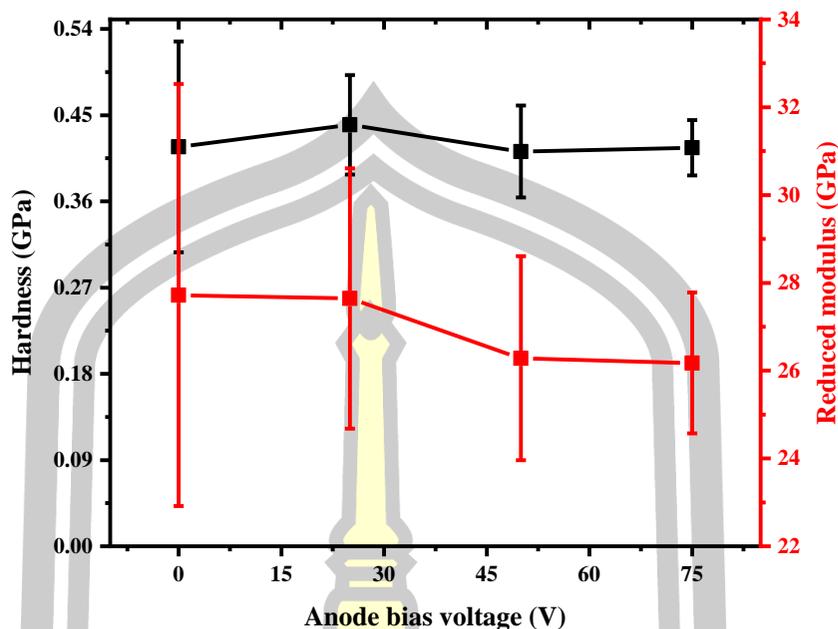
จากรูปที่ 4.6 เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้นความหนา และความขรุขระของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลงจาก 70.51 ถึง 65.86 nm และ 1.95 ถึง 1.6 nm ตามลำดับ ซึ่งต่างจากความหนาแน่นของฟิล์มที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามศักย์แอโนดในช่วง 4.36 ถึง 4.48 g/cm³ โดยที่ความหนาแน่นทางทฤษฎีของไทเทเนียมไดโบไรด์มีค่าเป็น 4.5 g/cm³ ซึ่งสอดคล้องกับความหนาของฟิล์มที่มีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความขรุขระของฟิล์มลดลง เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากหลักการ การใช้ไอออนช่วยในการตกสะสม (Ion assisted deposition) กล่าวได้ว่าในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์ม มีไอออนของแก๊สอาร์กอนระดมชนกับฟิล์มอยู่ตลอด และเกิดการถ่ายโอนพลังงานและโมเมนตัมจากไอออนไปสู่อะตอมฟิล์มบาง ทำให้อะตอมเหล่านั้นเคลื่อนตัวไปยังตำแหน่งวางภายในเนื้อฟิล์ม [39] การเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการไบอัสบวกที่ขั้วแอโนดที่เสนอในงานนี้ มี

หลักการเดียวกับการเคลือบฟิล์มที่มีการไบอัสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานไอออนในกระบวนการตกสะสมของฟิล์มบาง



รูปที่ 4. 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0, 25, 50 และ 75 V

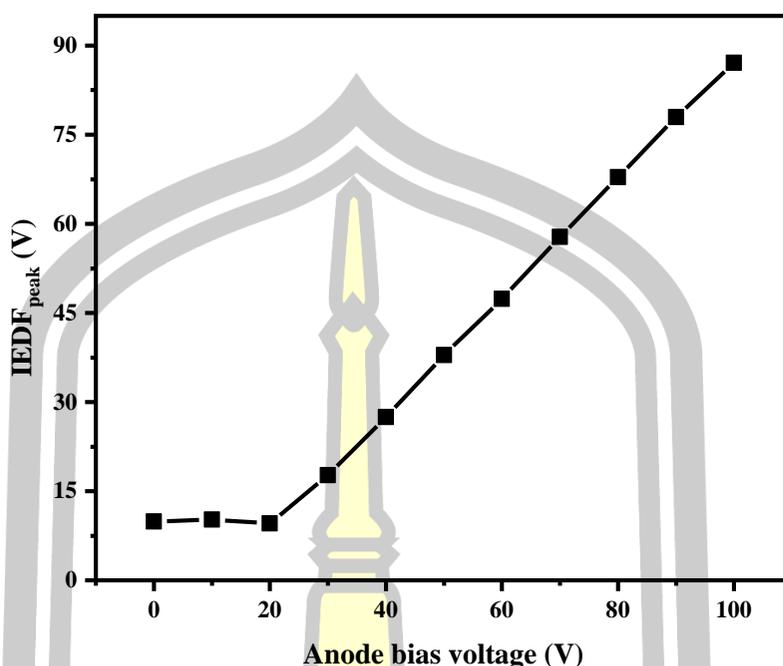
จากรูปที่ 4.7 เป็นการแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0, 25, 50 และ 75 ซึ่งได้ทำการกำหนดแรงบนพื้นผิวของฟิล์มที่ 400 mN เพื่อไม่ให้ความลึกของหัวกดเกิน 20% ของความหนาของฟิล์ม ซึ่งความหนาของฟิล์มทั้ง 4 เงื่อนไขอ้างอิงจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ ที่มีค่าความหนาอยู่ในช่วงไม่เกิน 100 nm โดยที่ความลึกของหัวกดมีค่าประมาณ 22 nm



รูปที่ 4. 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และสภาพยืดหยุ่นของแข็ง เทียบกับศักย์แอโนดไบอัส

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์บนชิ้นงานที่เป็นแผ่นซิลิกอน (100) ซึ่งเส้นสีดำแสดงค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของฟิล์มจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มศักย์แอโนดช่วงของความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และความแข็งที่วัดได้ยังมีค่าต่ำมาก ๆ ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 0.412 ถึง 0.44 GPa ส่วนเส้นสีแดงแสดงค่าสภาพยืดหยุ่นของของแข็ง ซึ่งก็คือสมบัติของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เมื่อมีแรงมากระทำและสามารถคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิม เมื่อหยุดออกแรงกระทำ [40] จากรูปจะพบว่าแนวโน้มของสภาพยืดหยุ่นของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น โดยที่ศักย์แอโนด 0 V มีค่าสูงที่สุดเป็น 27.72 ± 4.805 GPa โดยมีช่วงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กว้าง บ่งบอกได้ถึงความน่าเชื่อถือจากผลที่ได้ต่ำ และจากผลของความแข็งที่ได้มีความสอดคล้องกับ ผลของภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มที่มีลักษณะที่ไม่ก่อตัวกัน เป็นฟิล์มหรือเป็นผลึกเช่นเดียวกันกับผลการทดลองจากรูปที่ 4.5

สำหรับผลการทดลองสุดท้ายจะเป็นการแสดงผลของพลังงานไอออนที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดพลังงานไอออน โดยในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลจากการปรับศักย์แอโนดไบอัสทั้งหมด 11 เจือไนซ์ ได้แก่ floating potential 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 V ตามลำดับ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้า 150 W อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm และความดันแก๊สขณะทดสอบ 3 mTorr แสดงผลดังรูปที่ 4.9



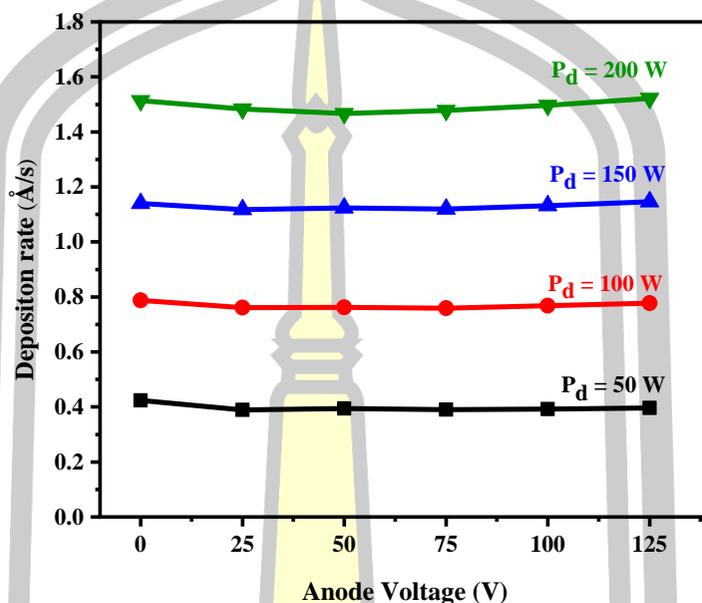
รูปที่ 4. 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานไอออนที่ตำแหน่งสูงสุดของพีก เทียบกับศักย์แอโนดไบอัส

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่าที่ศักย์แอโนดไบอัส floating potential 0 และ +10 V มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 9.55 ถึง 10.2 V แสดงว่าศักย์แอโนดทั้ง 3 เงื่อนไขนี้มีสถานะเป็นศักย์ลอย แต่เมื่อเพิ่มศักย์แอโนดตั้งแต่ +30 ถึง +100 V ทำให้ค่าความสัมพันธ์ของพลังงานไอออนเพิ่มขึ้นจาก 17.69 ถึง 87.09 V แสดงว่าหากต้องการเพิ่มพลังงานของไอออนที่ไประดมชนบนพื้นผิวฟิล์ม ศักย์แอโนดต้องมีค่าตั้งแต่ +30 V ขึ้นไป ซึ่งจากการวัดพลังงานของไอออนนี้ยืนยันได้ว่า เทคนิคการไบอัสศักย์บวกที่ขั้วแอโนดสามารถเพิ่มพลังงานไอออนได้ แต่เนื่องจากผลที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ได้ยังไม่หนา และเกิดการหลุดลอกของฟิล์ม ทำให้การศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 นี้เป็นเพียงการทดสอบเพื่อให้สามารถศึกษาผลจากการไบอัสที่ขั้วแอโนดได้ จึงทำให้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ โดยมีชั้นรองพื้นที่เป็นไทเทเนียมเพื่อให้สามารถยึดติดกับชิ้นงานได้ดีขึ้น และยังสามารถเคลือบได้หนามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งระบบในการเคลือบฟิล์มจะแสดงไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.3

4.2 ผลการศึกษาอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์

เริ่มต้นด้วยการวัดอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ เพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดระยะเวลาในการเคลือบตามความหนาของฟิล์มที่ต้องการ ด้วยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวแมกนีตรอนเป็น 50 100 150 และ 200 W ตามลำดับ และศักย์แอโนดไบอัสเป็น 0 +25 +50 +75

+100 และ +125 V ตามลำดับ โดยทำการควบคุมระยะห่างระหว่างเป้ากับหัววัดเป็น 10 cm อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเป็น 10 sccm ตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อเปิดสุด ความดันแก๊สขณะทดลองประมาณ 2.14 mTorr โดยผลการวัดอัตราการตกสะสมแสดงดังรูปที่ 4.8

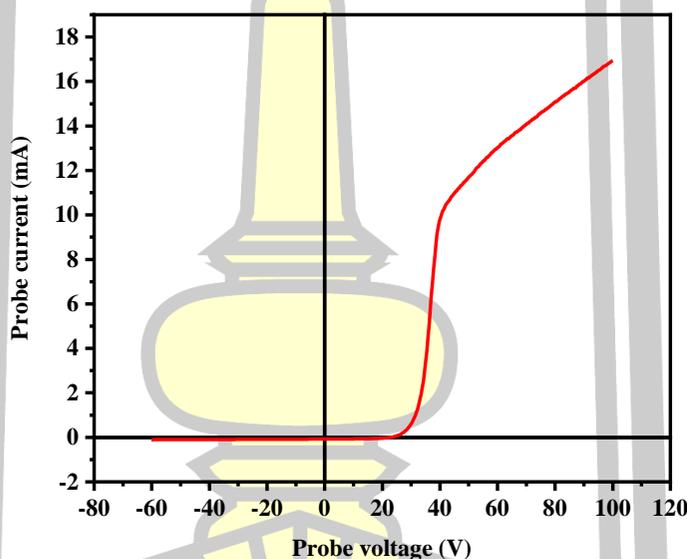


รูปที่ 4. 10 อัตราการตกสะสมของเป้า TiB_2 ที่กำลังไฟฟ้า และศักย์แอโนดต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 แสดงอัตราการตกสะสมของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากกำลังไฟฟ้า 50 ถึง 200 W ซึ่งมีอัตราการตกสะสมอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 1.54 Å/s โดยที่การเพิ่มศักย์แอโนดไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการตกสะสมอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถตีความได้ว่า ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าเดียวกัน ฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เคลือบ ณ ศักย์แอโนดต่ำ จะมีอัตราการตกสะสมที่ใกล้เคียงกับการเคลือบ ณ ศักย์แอโนดที่สูง และยังสามารถตีความได้อีกว่าถ้าเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นมากกว่า 200 W จะทำให้อัตราการตกสะสมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากข้อจำกัดของน้ำหล่อเย็นที่ไม่สามารถระบายความร้อนได้เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงกว่า 200 W เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ในหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์จริง ในงานวิจัยนี้จึงใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในการทดลองเคลือบฟิล์มทุกเงื่อนไขเป็น 200 W สำหรับผลการทดลองจากการวัดอัตราการตกสะสมนำมาใช้คำนวณเพื่อกำหนดความหนาของฟิล์มที่จะใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์การสะท้อนของรังสีเอกซ์ (X-ray reflection) จำเป็นที่ความหนาของฟิล์มที่เคลือบจะต้องไม่เกิน 200 nm

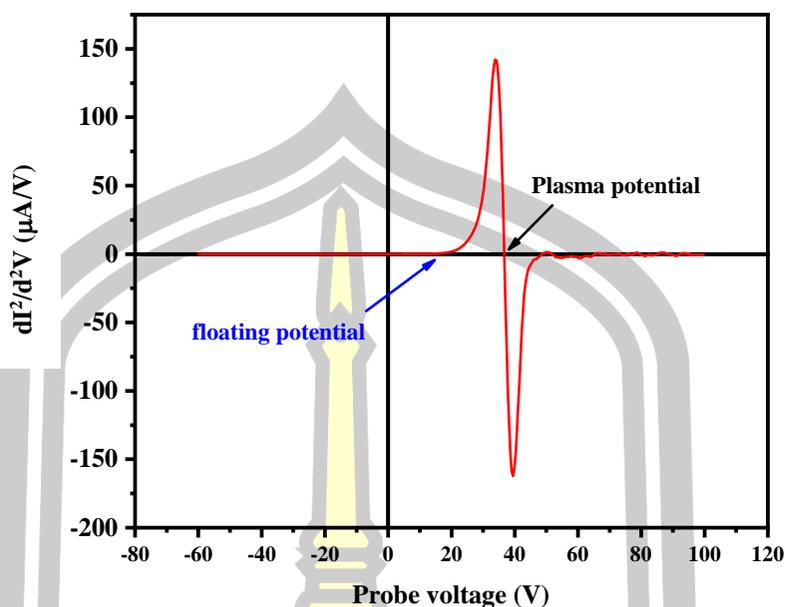
4.3 ผลการศึกษาสมบัติของพลาสมาของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์

จากผลการวัดพลังงานไอออนในหัวข้อที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าเทคนิคการไบอัสที่ชั่วแอนด์ทำให้พลังงานไอออนของแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้นได้ แต่ยังไม่ทราบถึงสาเหตุหรือปัจจัยในการเพิ่มขึ้นของพลังงานไอออนจำเป็นต้องใช้หัววัดแลงเมียร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของพลาสมา สำหรับเงื่อนไขที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ 1. การปรับค่าศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับชั่วแอนด์ตั้ง 0 ถึง +125 V โดยควบคุมกำลังไฟฟ้า 200 W ความดันแก๊สอาร์กอน 2.33 mTorr 2. การปรับกำลังไฟฟ้าที่หัวแมกนีตรอนตั้งแต่ 50 ถึง 250 W โดยควบคุมศักย์แอนด์ +50 V ความดันแก๊สอาร์กอน 5 mTorr 3. การปรับความดันแก๊สตั้งแต่ 2 ถึง 10 mTorr สำหรับข้อมูลที่บันทึกได้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของหัววัด แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

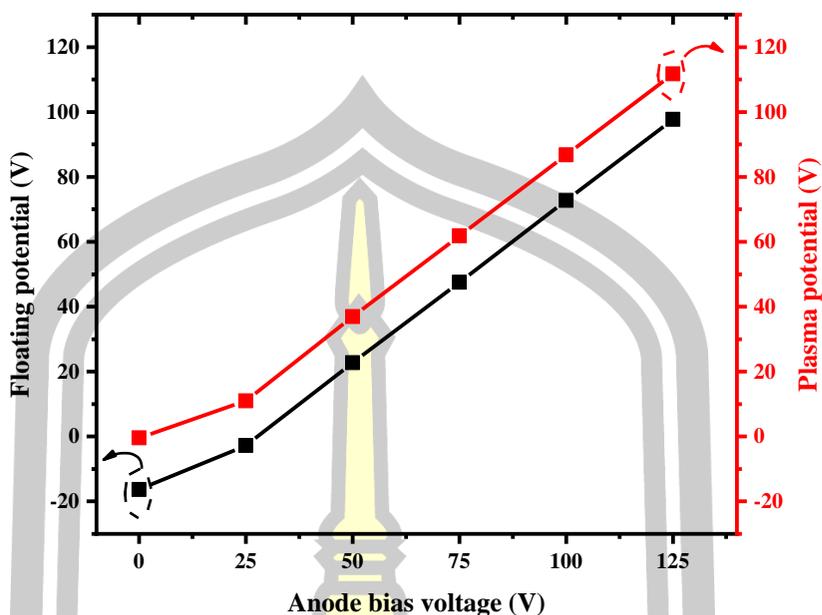
สำหรับข้อมูลกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการบันทึกข้อมูล ทั้ง 3 เงื่อนไข ซึ่งนำมาแสดงเป็นตัวอย่างเพียงกรณีเดียว ดังแสดงดังรูปที่ 4.9 สำหรับเงื่อนไขการปรับศักย์แอนด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง +125 V ลักษณะสัญญาณของเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้ามีการเลื่อนไปทางขวามากขึ้นตามการเพิ่มศักย์แอนด์ แต่ในทางกลับกันที่เงื่อนไขการปรับกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สขณะเคลือบ ลักษณะสัญญาณของเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าไม่มีการเลื่อนซ้ายหรือขวา แต่มีการเพิ่มขึ้นของระยะห่างของส่วนที่เป็นกระแสไอออนอิมพัลส์กับกระแสไอเล็กตรอนอิมพัลส์



รูปที่ 4. 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับสองของกระแสและศักย์ไฟฟ้าของหัววัดเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของหัววัด

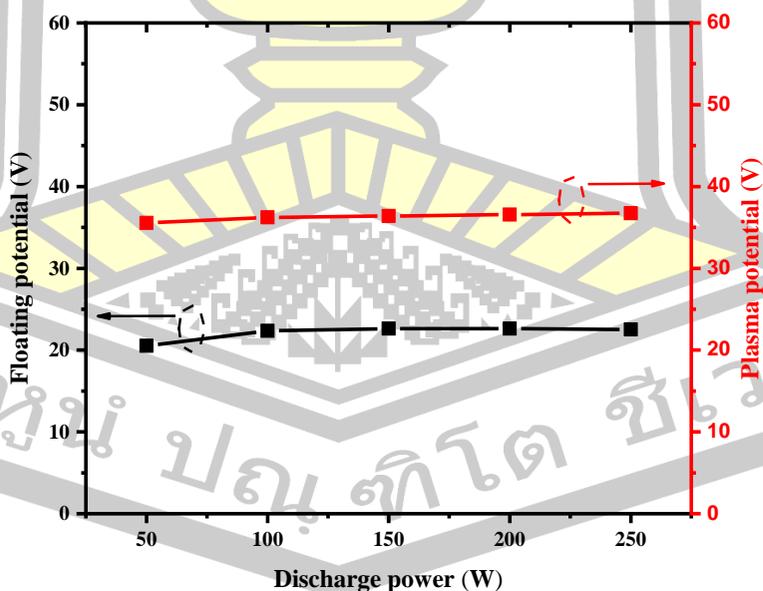
จากรูปที่ 4.12 เป็นการแสดงการหาค่าศักย์พลาสมา และศักย์ลอย ซึ่งได้อธิบายวิธีการในการคำนวณหาค่าศักย์พลาสมาและศักย์พลาสมาตามหัวข้อที่ 2.5 โดยที่เงื่อนไขการปรับค่าศักย์แอโนดสังเกตได้ชัดเจนว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับสองของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดมีการเลื่อนไปทางขวามือ เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น ส่วนที่เงื่อนไขการปรับค่ากำลังไฟฟ้าและความดันแก๊ส ลักษณะของ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับสองของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้ามีการทับกันและไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

สำหรับผลของศักย์ลอยและศักย์พลาสมาเทียบกับศักย์แอโนดที่ค่าต่างกัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.13 พบว่าการปรับค่าศักย์แอโนดที่เป็นการจ่ายศักย์บวกทำให้สามารถยกระดับของศักย์พลาสมา ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มศักย์พลาสมาให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกราวด์ ยังเป็นการเพิ่มศักย์ให้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วงของค่าศักย์ลอยกับศักย์แอโนดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากเทคนิคการเพิ่มพลังงานไอออนด้วยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบที่ฐานวางชิ้นงาน หรือที่ขั้วไฟฟ้าด้านบนของวัดวัดแลงเมียร์ที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งจะไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของศักย์พลาสมา แต่จะเป็นการลดระดับศักย์ไฟฟ้าที่ฐานวางชิ้นงานให้ต่ำลงทำให้ระยะห่างระหว่างศักย์พลาสมา กับศักย์ที่ฐานวางชิ้นงานต่างกันมาก

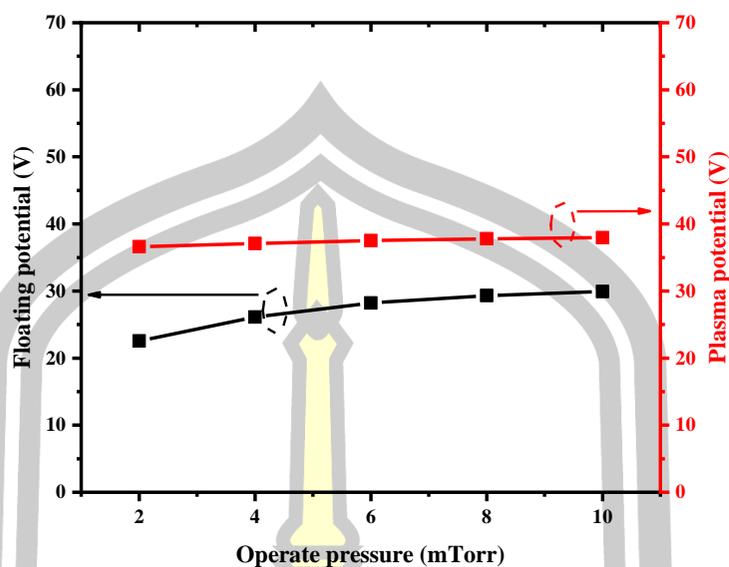


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ลอยและศักย์พลาสมาเทียบกับศักย์แอโนดที่ต่างกัน

จากผลการผลการวัดศักย์พลาสมาตามรูปที่ 4.13 ทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่าการเพิ่มขึ้นของศักย์พลาสมา จากการเพิ่มศักย์แอโนดสามารถที่จะเพิ่มความเร็วหรือแรงให้อนุภาคที่อยู่ในสถานะไอออนให้เคลื่อนที่ออกจากพลาสมาไปยังชิ้นงานหรือฐานวางชิ้นงานได้พลังงานที่มีความใกล้เคียงกับศักย์ไฟฟ้าบวกที่จ่ายให้กับขั้วแอโนด



รูปที่ 4. 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ลอยและศักย์พลาสมาเทียบกับกำลังไฟฟ้าต่างกัน



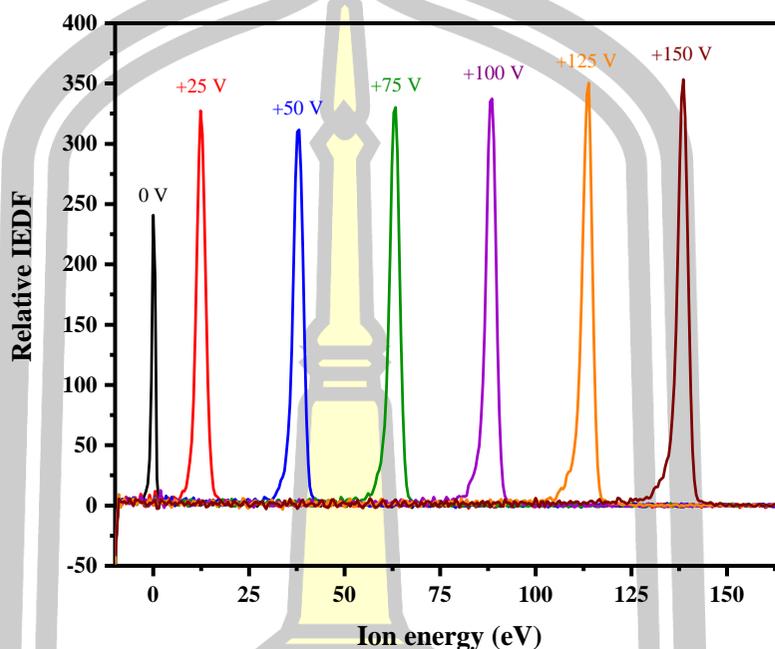
รูปที่ 4. 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ลอยและศักย์พลาสมา
ความดันแก๊สต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 และ และ รูปที่ 4.15 เป็นการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อศึกษาว่ากำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สขณะเคลือบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของศักย์ลอยและศักย์พลาสมามากน้อยเพียงใด พบว่าเมื่อทำการเพิ่มทั้งกำลังไฟฟ้า และความดันแก๊ส ศักย์พลาสมา และศักย์ลอยที่วัดได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ สันนิษฐานได้ว่าว่าพลังงานของไอออนจะไม่มีการเพิ่มขึ้นจากการปรับค่ากำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สขณะเคลือบ

4.4 ผลการศึกษาพลังงานไอออนของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์

จากผลการวัดสมบัติของพลาสมาจากเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ ทำให้ทราบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดมากขึ้นจะทำให้ศักย์พลาสมามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งได้นำเสนอผลของพลังงานไอออนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งเป็นการทดลองวัดพลังงานสำหรับระบบแมกนีตรอนแบบหัวเดียว เพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบแมกนีตรอนแบบสองหัวนี้สามารถเพิ่มพลังงานได้เช่นเดียวกัน จึงได้ทดลองวัดพลังงานไอออน โดยเลือกศึกษาพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ 1.การปรับค่าศักย์แอโนดตั้งแต่ 0 ถึง 150 V โดยควบคุมกำลังไฟฟ้า 200 W ความดันแก๊สขณะทดลอง 5 mTorr 2.การปรับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 ถึง 250 W โดยควบคุมศักย์แอโนด +50 V ความดันแก๊สขณะทดลอง 5 มิลลิทอร์ 3.การปรับความดันแก๊สขณะทดลองตั้งแต่ 3 ถึง 12 mTorr โดยควบคุมโดยควบคุมกำลังไฟฟ้า 200 W และศักย์แอโนด +50 V สำหรับข้อมูลที่น่ามาศึกษาคือสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัด

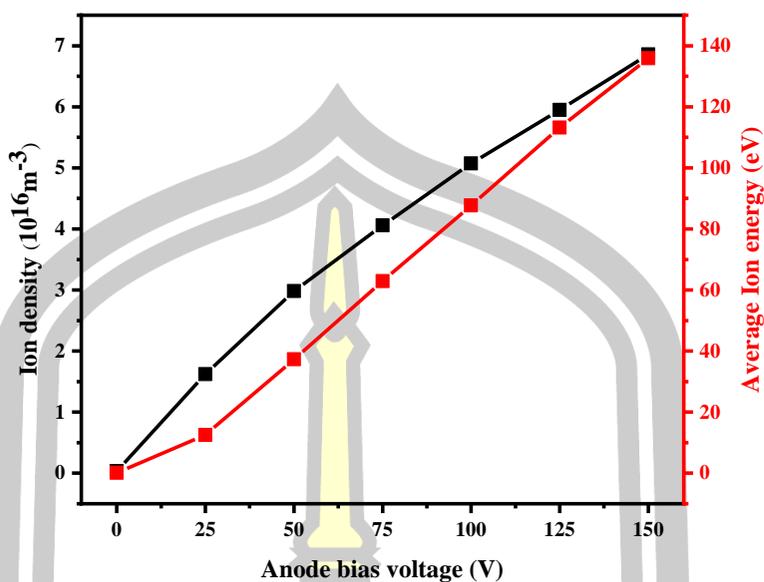
ได้กับศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดโดยมีลักษณะกราฟเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของพลังงานไอออนได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้างแสดงตามรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานไอออนที่ศักย์แอโนดต่างกัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่ากราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของพลังงานไอออนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบมีนัยสำคัญตามการเพิ่มขึ้นของศักย์แอโนด ซึ่งกราฟนี้เป็นส่วนหนึ่งในใช้เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ย และพลังงานไอออนเฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน และสำหรับรูปที่ 4.16 ยังสามารถบ่งบอกถึงพลังงานของประชากรไอออนส่วนใหญ่ได้จากตำแหน่งที่สูงที่สุดของพีคแต่ละเงื่อนไข ซึ่งที่ศักย์แอโนด +150 V มีพลังงานของไอออนส่วนใหญ่ที่มากที่สุดมีค่าเป็น 127.5 eV

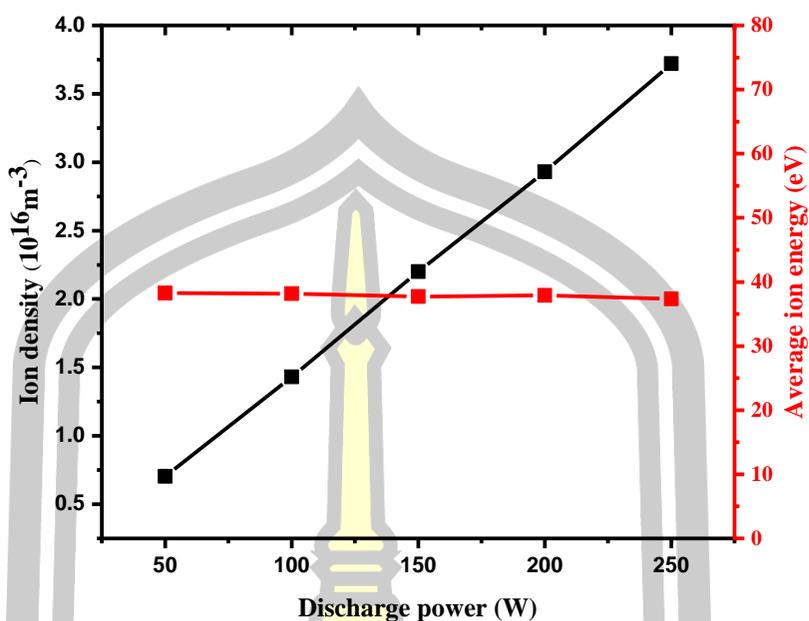
พหุ ประทีป ชีวะ



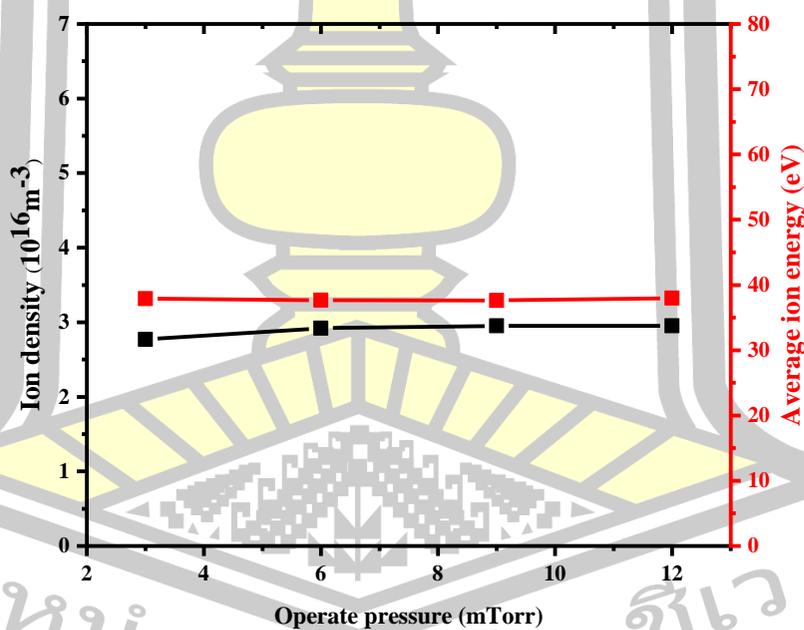
รูปที่ 4. 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนกับพลังงานของไอออน เทียบกับศักย์แอโนดที่ค่าต่างกัน

สำหรับผลที่ได้จากการคำนวณความหนาแน่นเฉลี่ยของไอออน และพลังงานเฉลี่ยของไอออนที่เงื่อนไขการปรับค่าศักย์แอโนดตั้งแต่ 0 ถึง +150 V แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าแนวโน้มจากการเพิ่มค่าศักย์แอโนดส่งผลทำให้ทั้งความหนาแน่นเฉลี่ยและพลังงานเฉลี่ยไอออนของแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้นตามด้วย ซึ่งค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของไอออนอยู่ในช่วง 3.31×10^{14} ถึง $6.86 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ และพลังงานเฉลี่ยของไอออนอยู่ในช่วง 0.16 ถึง 135.89 eV ทำให้สามารถยืนยันจากผลการวัดศักย์พลาสมาตามหัวข้อที่ 4.3 สำหรับเงื่อนไขการปรับค่าศักย์พลาสมา ที่กล่าวได้ว่าการเพิ่มค่าศักย์แอโนด ส่งผลทำให้ศักย์พลาสมาเพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของศักย์พลาสมาเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพลังงานไอออน

พหุบัน ปณุ กิจโต ชีเว



รูปที่ 4. 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนกับพลังงานของไอออนเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าต่างกัน



รูปที่ 4. 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนกับพลังงานของไอออนเทียบกับความดันแก๊สขณะเคลือบ

จากรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 เป็นการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นของไอออน และพลังงานไอออนจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ที่เป็นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวแมกนีต

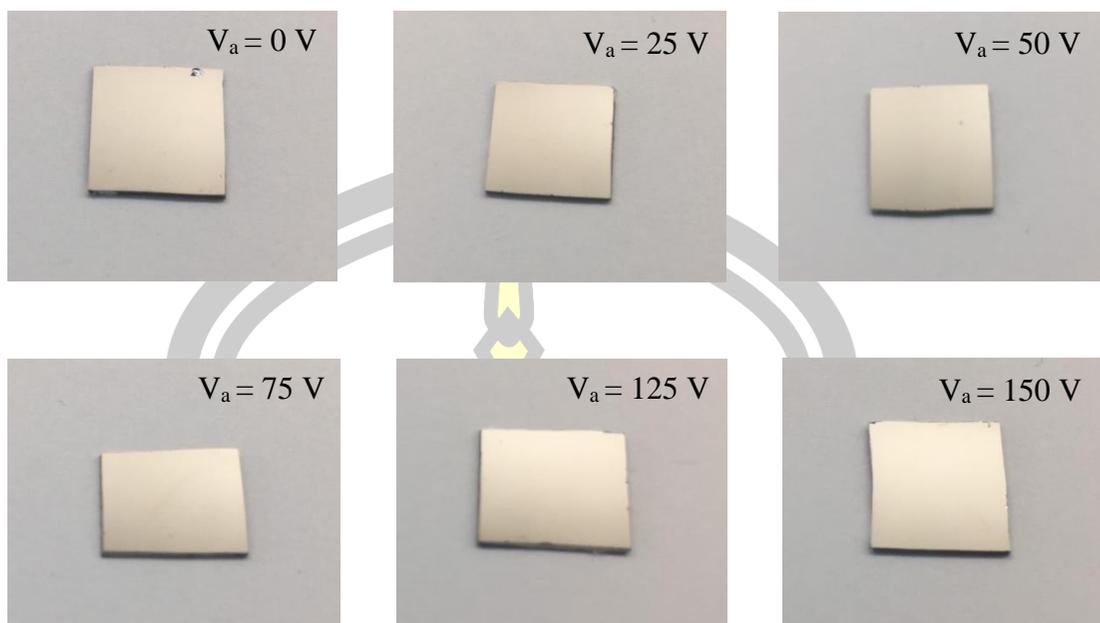
รอน และความดันแก๊สขณะทำการทดลอง ซึ่งที่กราฟจากรูปที่ 4.18 พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าส่งผลทำให้ความหนาแน่นของไอออนมีการเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 7.03×10^{15} ถึง $3.72 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ แต่ในทางกลับกันพลังงานเฉลี่ยของไอออนไม่มีการเปลี่ยน สำหรับกราฟจากรูปที่ 4.19 แสดงผลจากการปรับค่าความดันแก๊สขณะทดลอง ซึ่งแนวโน้มของความหนาแน่นของไอออน และพลังงานไอออนมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มความดันแก๊ส โดยค่าของความหนาแน่นของไอออน และพลังงานไอออนมีค่าเป็น $2.95 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ และ 37.6 eV ตามลำดับ จึงสามารถกล่าวได้ว่าการวัดทั้งสมบัติพลาสมาด้วยหัววัดแลงเมียร์ และการวัดพลังงานไอออนด้วยหัววัด RFA ด้วยเงื่อนไขการปรับค่ากำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพลังงานไอออน มีเพียงเงื่อนไขการปรับค่าศักย์แอโนดที่ทำให้พลังงานไอออนแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้น

4.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์

ผลของลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง TiB_2 ได้ถูกแสดงไว้ 2 ส่วน คือลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง TiB_2 ที่ถูกถ่ายด้วยกล้องดิจิตอล และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง TiB_2 ที่ถูกถ่ายด้วยกล้องดิจิตอล แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 จากภาพทั้งหมด 6 เงื่อนไขมีลักษณะที่เหมือนกัน ซึ่งสีของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์จะมีลักษณะเป็นสีเทาเหมือนสีของโลหะมีความเงาและทึบแสง ซึ่งในทุกบริเวณของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ และไม่เกิดการหลุดลอกของฟิล์มเหมือนเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่ไม่มีไทเทเนียมเป็นชั้นรองพื้น ส่วนฟิล์มบาง TiB_2 ที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 V บริเวณด้านบนของชิ้นงานเกิดการแตกของแผ่นซิลิกอนหลังจากการเคลือบฟิล์ม แต่ฟิล์ม TiB_2 ไม่เกิดการหลุดลอกจากแผ่นซิลิกอนแสดงว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีความสามารถในการยึดติดที่ดี

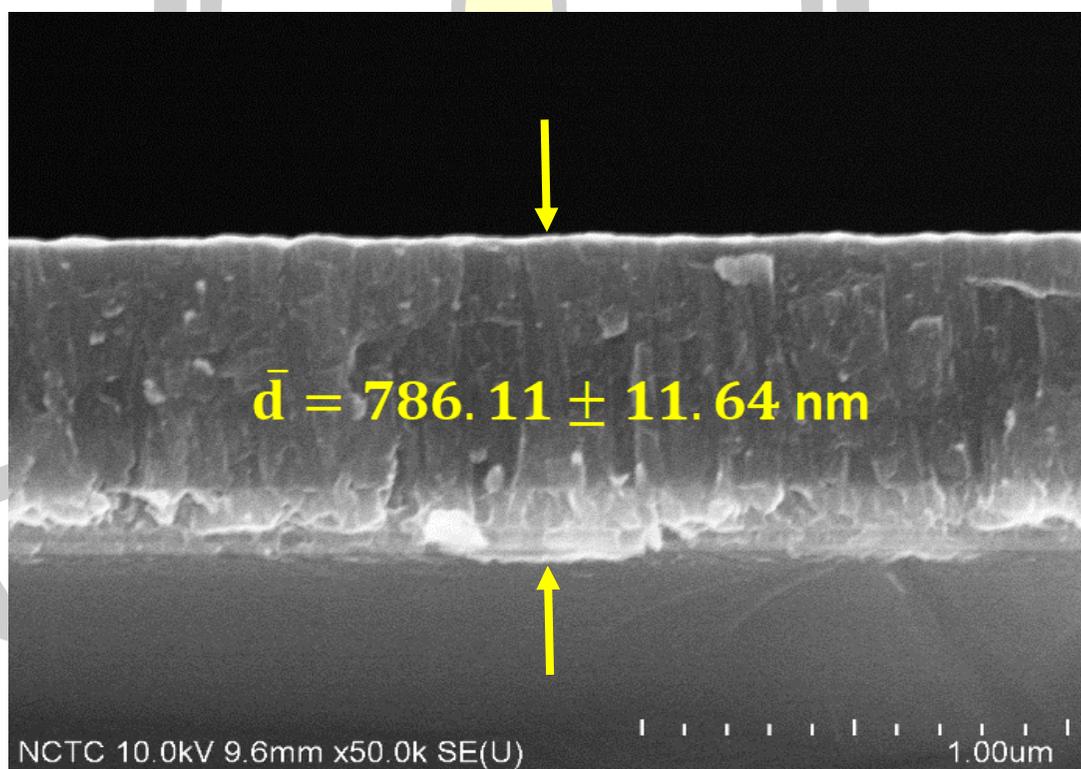
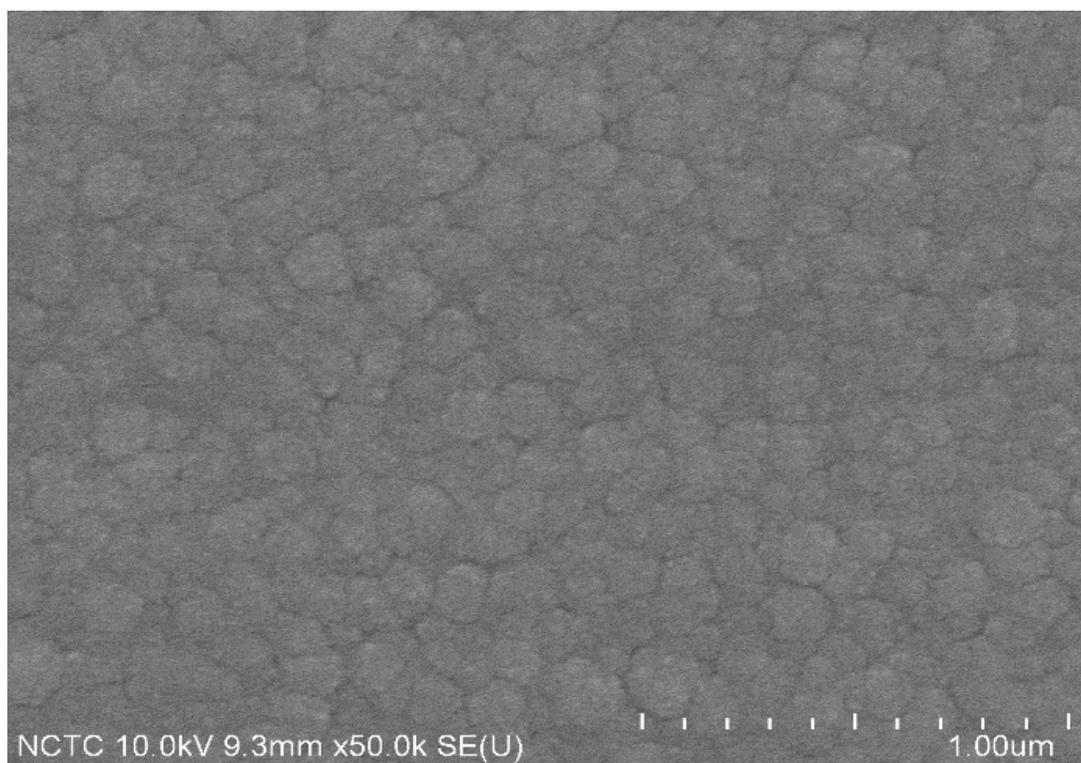
พหุ ประ โท ชีวะ



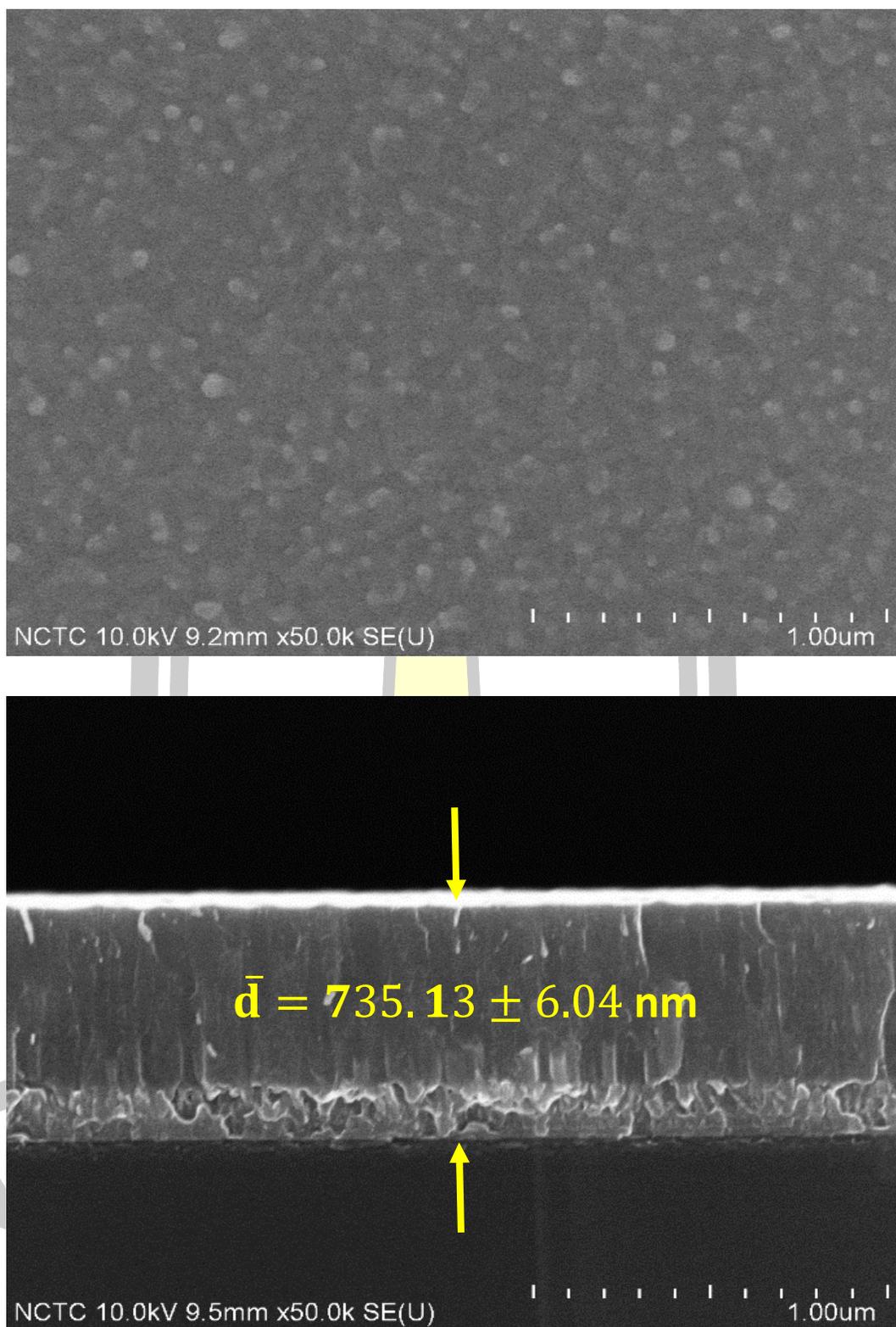
รูปที่ 4. 20 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางบนแผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการปรับค่าศักย์แอโนด

สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ซึ่งได้ทำการเลือกชิ้นงาน 3 เงื่อนไข ได้แก่ TiB0 TiB75 และ TiB150 เพื่อเปรียบเทียบผลจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด สำหรับรูปที่ 4.21 (a) ที่พื้นผิวของฟิล์มจะปรากฏลักษณะของเกรนอย่างชัดเจน ต่างจากภาพถ่ายพื้นผิวตามรูปที่ 4.22 (a) และ 4.23 (a) ที่ดูเหมือนว่าลักษณะของเกรนจะมีขนาดที่เล็กลงเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการถ่ายภาพภาคตัดขวางทั้ง 3 เงื่อนไขจะพบว่าที่รูป 4.22 (b) และ 4.23 (b) จะมีชั้นสีขาวบางๆ บนพื้นผิวของฟิล์ม TiB_2 ซึ่งภาพที่ถ่ายได้อาจไม่ใช่พื้นผิวของฟิล์ม และภาพถ่ายภาคตัดขวางยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างชั้น Ti ที่เป็นชั้นรองพื้น ซึ่งจะปรากฏช่องว่าง และรูพรุนภายในฟิล์มอย่างชัดเจน ส่วนชั้นฟิล์ม TiB_2 จะมีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่น และค่าความหนาของฟิล์มแสดงดังตารางที่ 4.1

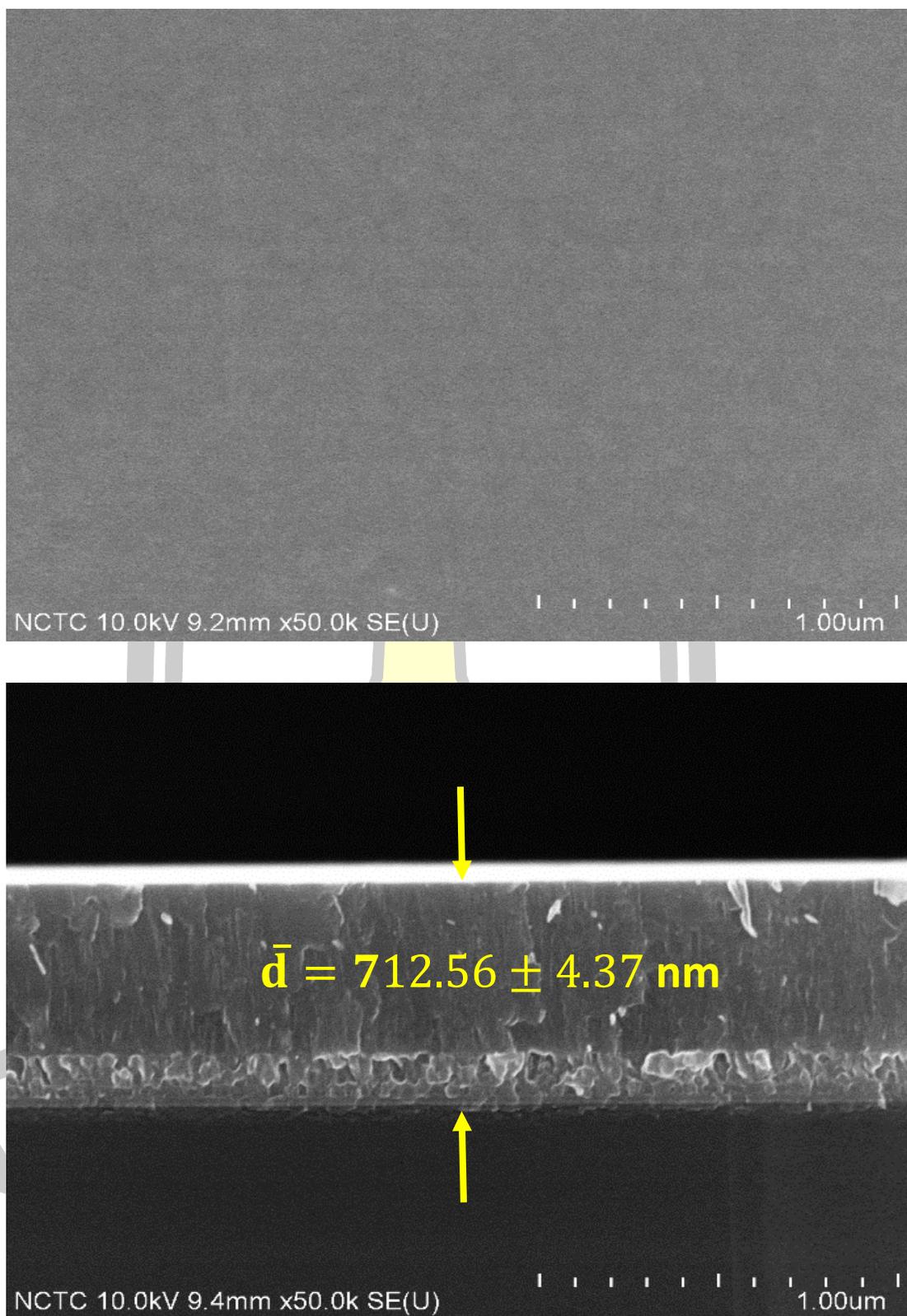
พหุ ประถม โท ชีวะ



รูปที่ 4. 21 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดง (a) พื้นผิว (b) ภาควัดขวางและความหนาของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 V บนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100)



รูปที่ 4. 22 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดง (a) พื้นผิว (b) ภาควัดขวางและความหนาของฟิล์มบางที่เจือไนซัลไฟด์แอนโนด 75 V บนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100)

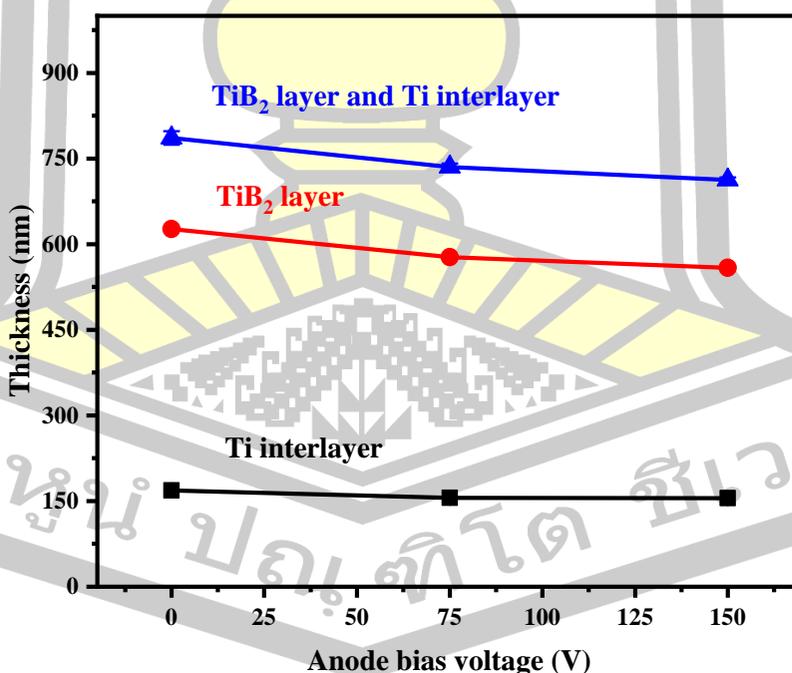


รูปที่ 4. 23 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50 เท่า แสดง (a) พื้นผิว (b) ภาคตัดขวางและความหนาของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 150 V บนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100)

ในส่วนความหนาของฟิล์มได้ใช้โปรแกรม ImageJ หาความหนาโดยเฉลี่ยของฟิล์มซึ่งใช้ทั้งหมด 20 จุด และแบ่งการวัดความหนาเป็น 3 ส่วนได้แก่ 1. ชั้นรองพื้นไทเทเนียม 2. ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ 3. ความหนาของชั้นชั้นรองพื้นไทเทเนียมและชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ ที่แสดงตามรูปที่ 4.24 พบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์มีแนวโน้มที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของศักย์แอโนดไบอัส ส่วนชั้นรองพื้นไทเทเนียมไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากที่ชั้นนี้ไม่ได้ทำการไบอัสระหว่างการเคลือบ

ตาราง 4. 1 ความหนาของฟิล์มที่ศักย์แอโนดต่างกัน

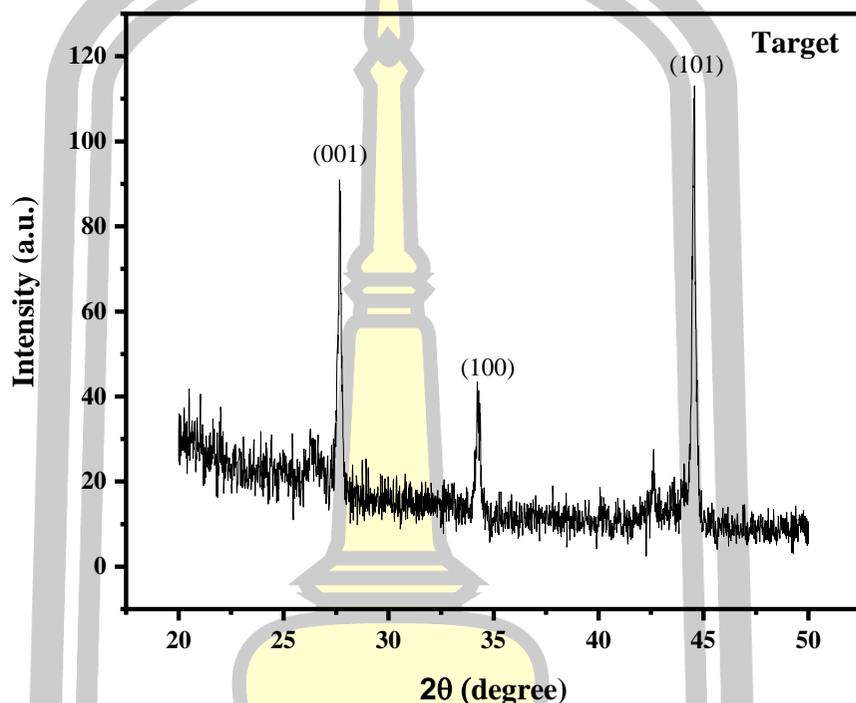
Sample code	Ti Thickness (nm)	SD	TiB ₂ Thickness (nm)	SD	Total Thickness (nm)	SD
TiB0	168.8	11.49	626.48	5.25	786.11	11.64
TiB75	155.77	4.54	576.97	6.33	735.13	6.04
TiB150	154.94	4.66	558.54	4.86	712.56	4.73



รูปที่ 4. 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มชั้น Ti interlayer, TiB₂ layer และผลรวมความหนาของทั้ง 2 ชั้น ที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0, 75 และ 150 V

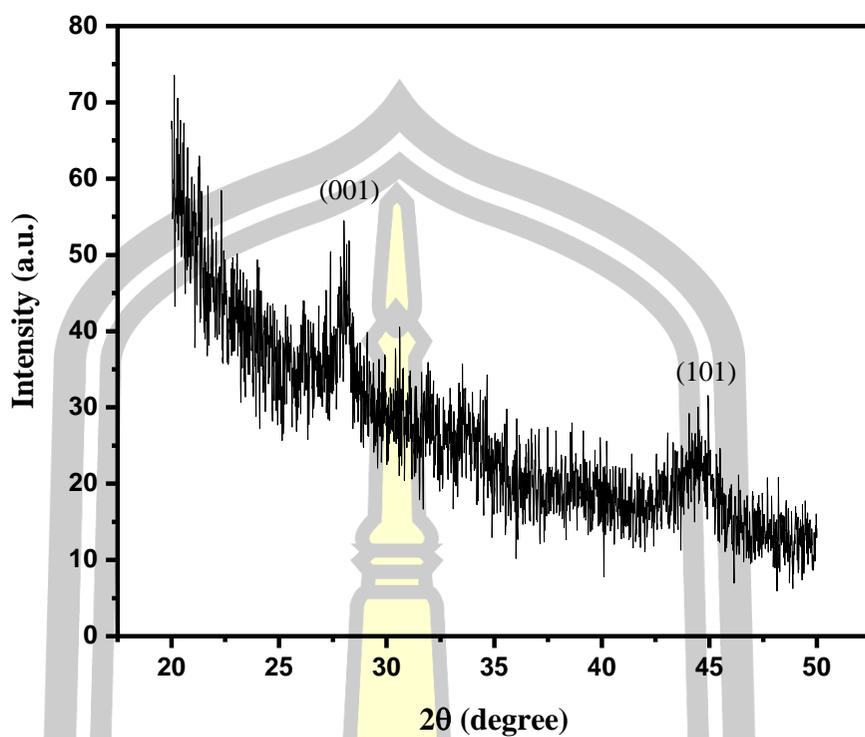
4.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง TiB_2

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเชิงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางหลักการเคลือบที่แสดงเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งมุม 2θ ต่างๆ โดยได้นำเข้าไทเทเนียมโบไรด์ทดสอบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม TiB_2 ที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.31

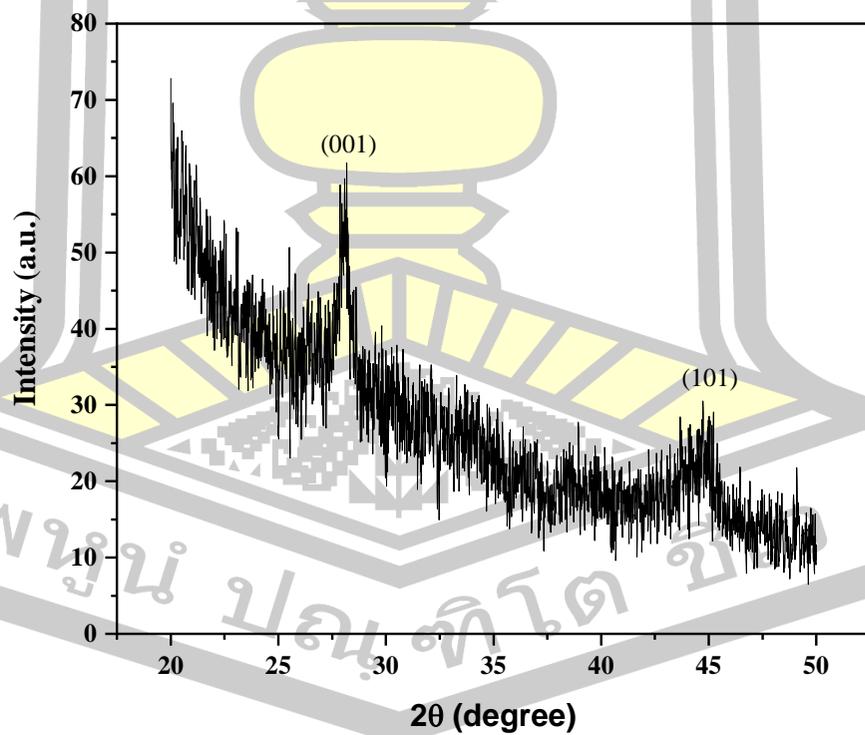


รูปที่ 4. 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเป้าวัสดุไทเทเนียมโบไรด์

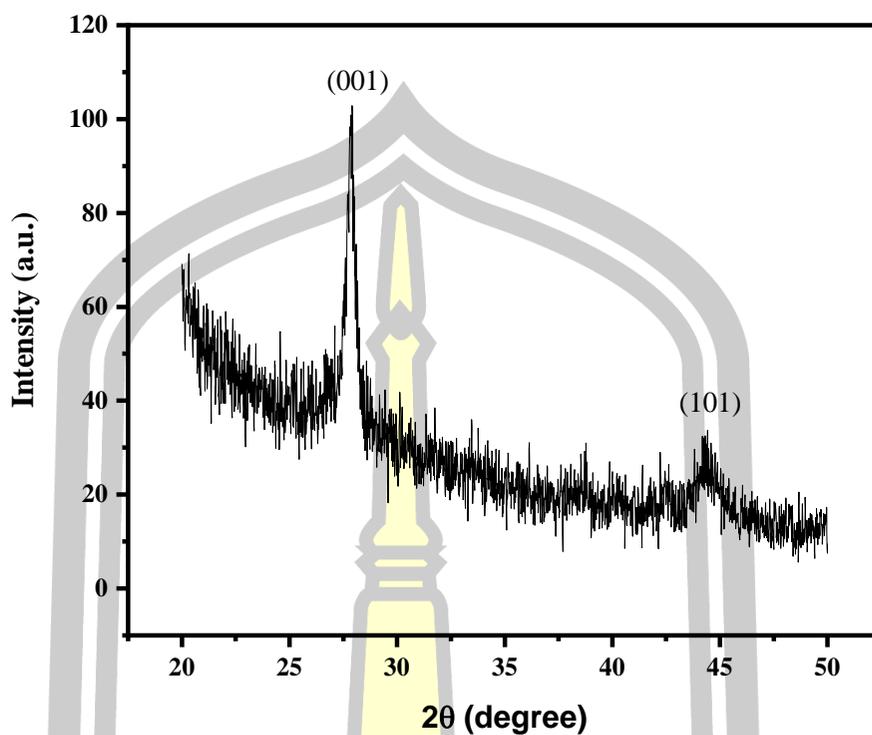
จากผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเป้าวัสดุ ดังแสดงตามรูปที่ 4.25 ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของ TiB_2 ทั้งหมด 3 พีค ได้แก่ ที่มุม 2θ 27.69 34.26 และ 44.54 ของระนาบ 001 100 และ 101 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของพีคแต่ละพีคมีฐานที่แคบบ่งบอกได้ถึงความเป็นผลึกของฟิล์มที่สูง โดยจะใช้พีคการเลี้ยวเบนของเป้า TiB_2 เป็นฐานข้อมูลในการเปรียบเทียบกับพีคการเลี้ยวเบนของฟิล์ม TiB_2 จากการปรับค่าศักย์แอโนด ซึ่งจากเงื่อนไขศักย์แอโนด 0 ถึง 150 V จะปรากฏเพียง 2 พีคเท่านั้นคือ พีคที่ระนาบ 001 และ 101 โดยเมื่อศักย์แอโนดมีค่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พีคที่ระนาบ 001 มีค่าที่สูงขึ้น ส่วนที่ระนาบ 101 จะมีลักษณะระฆังคว่ำฐานกว้างกว่าและมีค่าที่ต่ำลงเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น สำหรับที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 150 V จะปรากฏเพียงหนึ่งพีคเท่านั้นคือที่ระนาบ 001 ซึ่งจะมีพีคที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเงื่อนไข



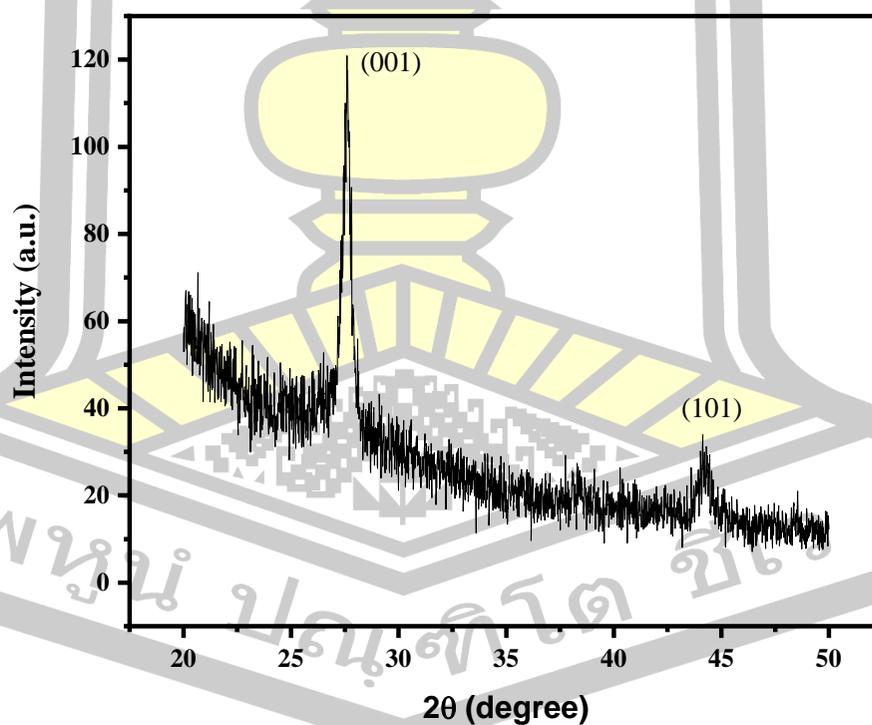
รูปที่ 4. 26 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 V



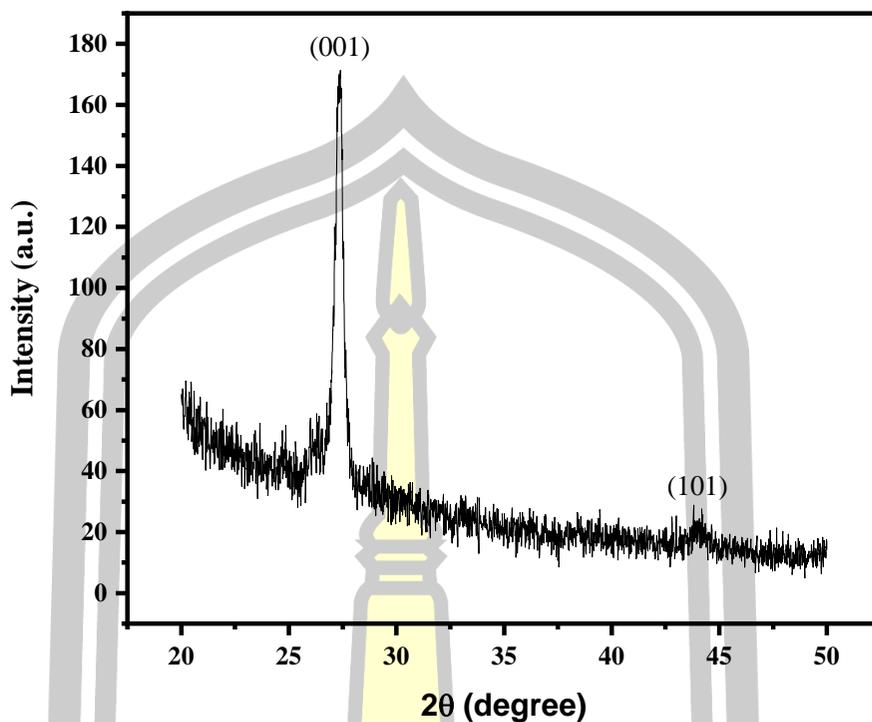
รูปที่ 4. 27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 25 V



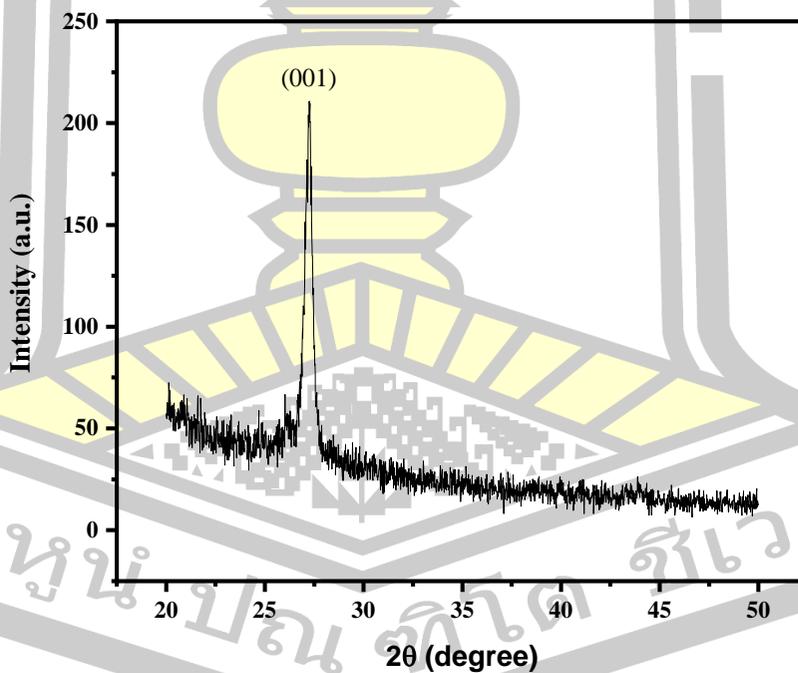
รูปที่ 4. 28 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 50 V



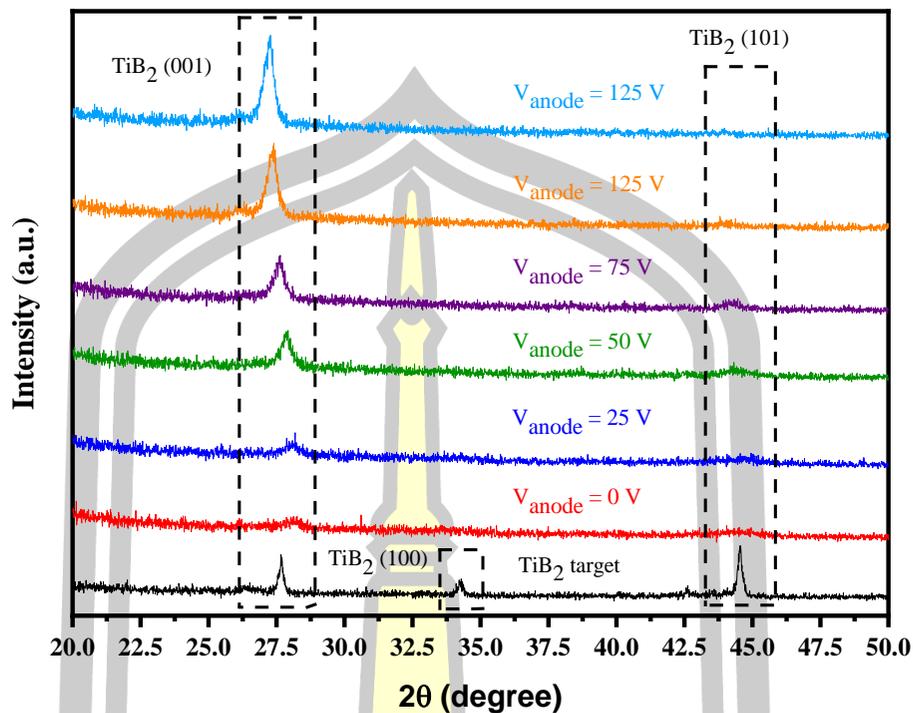
รูปที่ 4. 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V



รูปที่ 4. 30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 125 V



รูปที่ 4. 31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 150 V



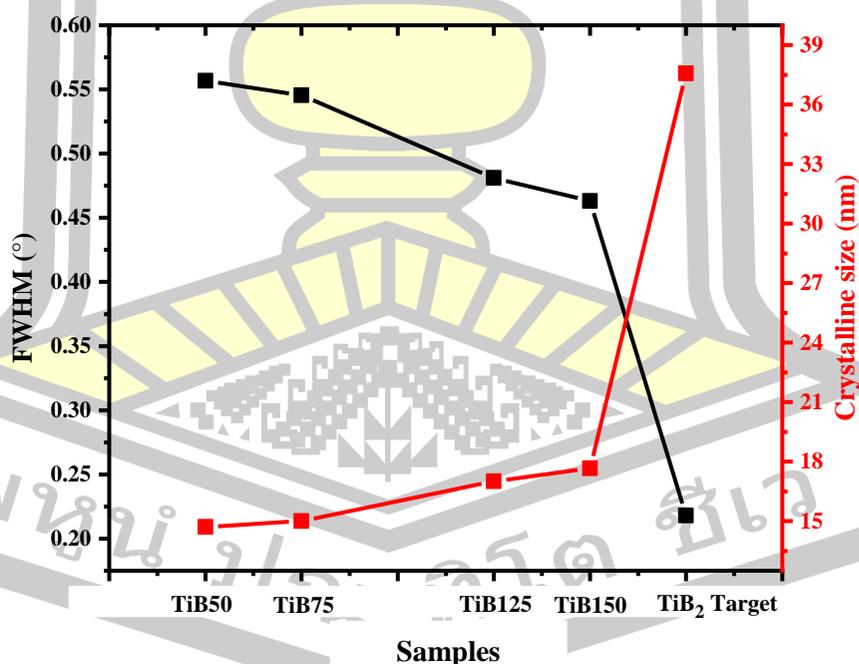
รูปที่ 4. 32 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเป้า TiB_2 และฟิล์มบางที่เงื่อนไขศักย์แอโนดต่างๆ

จากรูปที่ 4.32 เป็นการแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของทุกเงื่อนไขนำมาเพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าตำแหน่งของการเลี้ยวเบนที่ระนาบ 001 มีการเลื่อนไปทางซ้ายมือเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเทียบกับพีคการเลี้ยวเบนของเป้า TiB_2 จะพบว่าที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 ถึง 50 V จะมีตำแหน่งของพีคที่ตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจะอยู่ในตำแหน่งของพีคการเลี้ยวเบนที่สูงกว่า แต่ที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V จะมีตำแหน่งศูนย์กลางของพีคที่ใกล้เคียงกับพีคการเลี้ยวเบนของเป้าวัสดุ และสำหรับที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 0 และ 25 V จะปรากฏพีคที่ระนาบ 001 ต่ำที่สุดซึ่งบ่งบอกได้ว่าฟิล์ม TiB_2 ที่เตรียมด้วย 2 เงื่อนไขนี้ จะได้ฟิล์มที่มีความเป็นผลึกที่ต่ำ จึงไม่สามารถนำมาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นได้ ซึ่งข้อมูลของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้ สามารถนำมาคำนวณหาขนาดของผลึกได้ตามหัวข้อที่ 2.6 และผลของเลือนของตำแหน่งของพีคที่ระนาบ 001 ของ TiB_2 อธิบายได้จากการลดลงของระยะ Lattice constant c ซึ่งโดยปกติมีค่าเป็น ($c = 3.228 \text{ \AA}$) [38] ซึ่งสามารถแสดงผลจากการคำนวณได้ตามรูปที่ 4.33 โดยจะแสดงค่าความกว้างพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดพีค และขนาดของผลึก เทียบกับค่าศักย์แอโนดที่ค่าต่างกัน จะพบว่าที่เป้าวัสดุจะมีขนาดของผลึกที่ใหญ่ที่สุด ส่วนที่เงื่อนไขศักย์แอโนดตั้งแต่ 50 ถึง 150 V จะมีขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.33 จะพบว่าค่าของความกว้างพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดพีคจะส่วนทางกับค่าขนาด

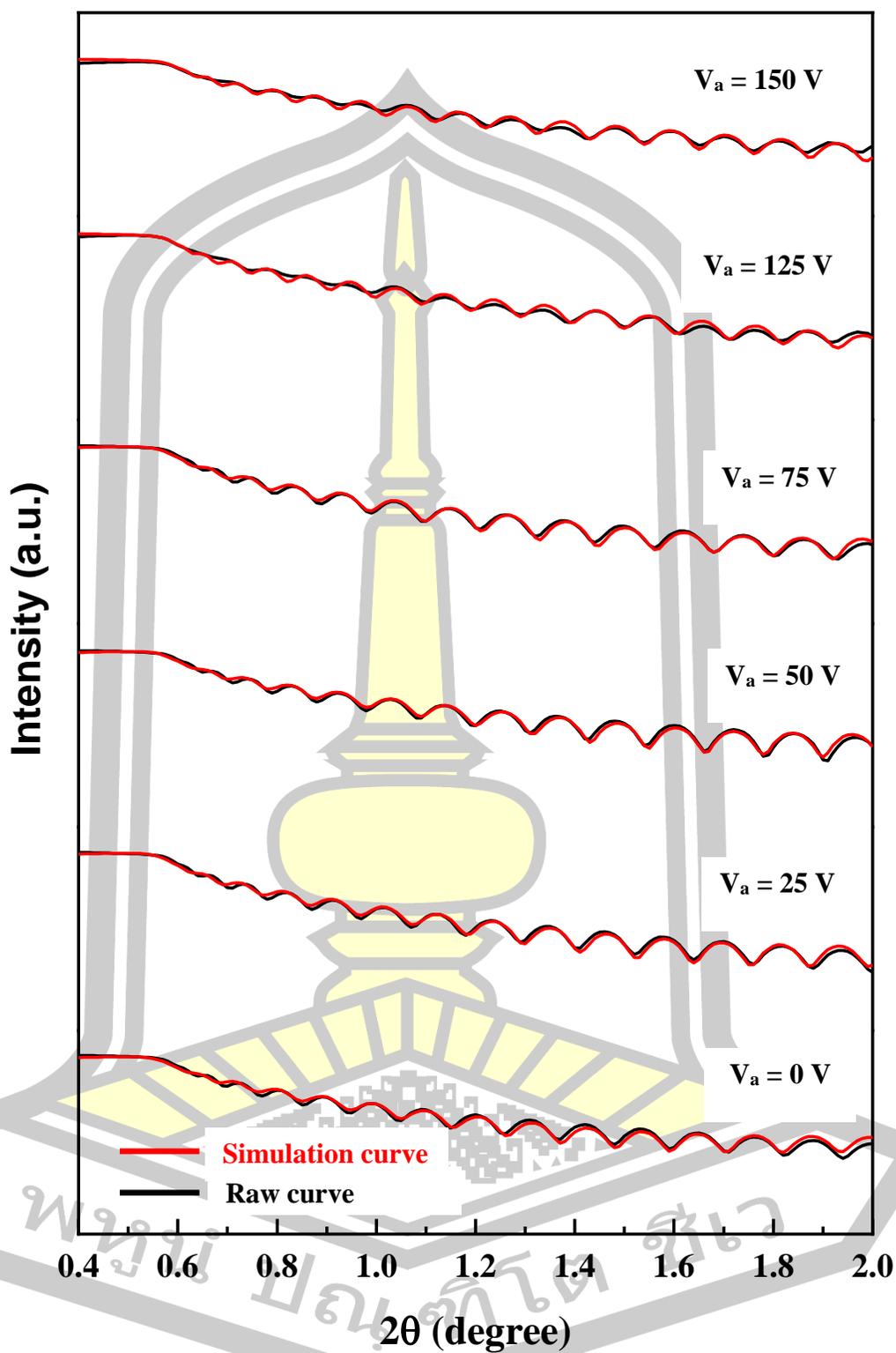
ของผลึก แสดงว่าระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์มที่มีการปรับค่าศักย์แอโนดไบอัส สามารถปรับปรุงโครงสร้างภายในฟิล์มได้ ทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบเกิดการรวมตัวกันเป็นผลึกภายในฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ตาราง 4. 2 แสดงตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และขนาดของผลึก

Sample code	2 θ (degree)			FWHM (001) ($^{\circ}$)	Crystalline size (nm)
	(001)	(100)	(101)		
Target	27.69	34.26	44.54	0.21	37.57
TiB0	28.21	-	44.55	-	-
TiB25	28.04	-	44.55	-	-
TiB50	27.83	-	44.36	0.55	14.7
TiB75	27.58	-	44.20	0.54	15
TiB125	27.33	-	43.97	0.48	17
TiB150	27.22	-	-	0.46	17.66



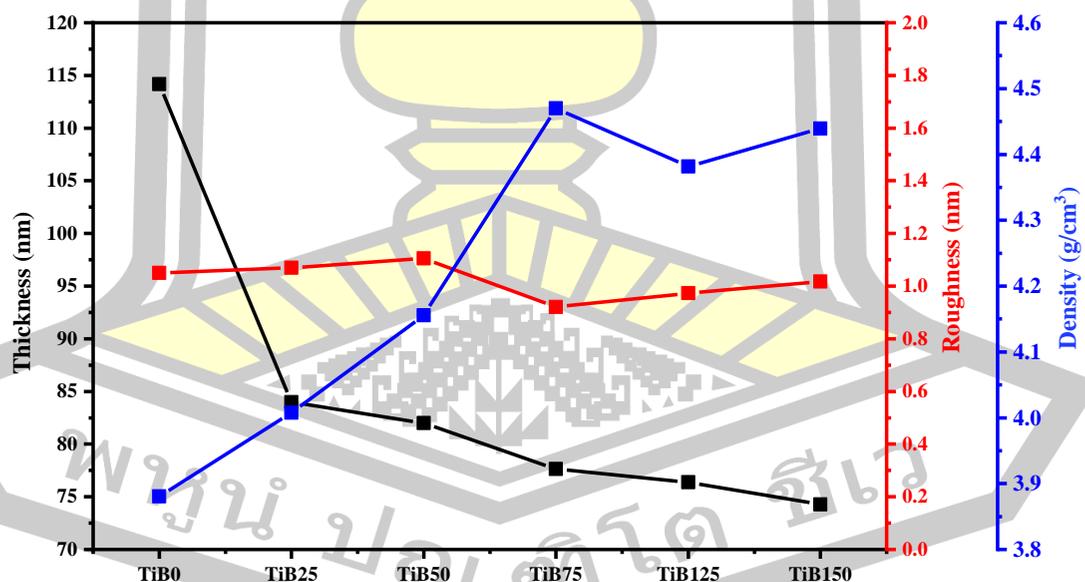
รูปที่ 4. 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดพีคที่ระนาบ 001 และขนาดของผลึกเทียบกับศักย์แอโนดที่ต่างกัน



รูปที่ 4. 34 รูปแบบเส้นโค้งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ และเส้นโค้งที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Leptos 7

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง TiB_2 ยังมีอีกหนึ่งเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบาง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งโหมดการทำงานของเครื่อง XRD ที่เรียกว่า โหมดการสะท้อนของรังสีเอกซ์ สำหรับรูปที่ 4.34 เป็นการแสดงผลการปรับค่าเส้นโค้งที่เงื่อนไข TiB_0 ถึง TiB_{150} ซึ่งช่วงของมุม 2θ ในการวิเคราะห์อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 2.0 จะผลการปรับเส้นโค้งจะพบว่า เส้นโค้งที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงกับเส้นโค้งที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลที่ดึงออกมาในรูปของความหนาของฟิล์ม ความขรุขระ และความหนาแน่นมีความใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมได้

จากรูปที่ 3.15 แสดงค่าความหนาเส้นสีดำ ค่าความขรุขระเส้นสีแดง และค่าความหนาแน่นของฟิล์มเส้นสีน้ำเงิน จะพบว่าค่าความขรุขระของฟิล์มไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อศักย์แอโนดไบอัสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.06 ถึง 0.92 nm ความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลงโดยที่เงื่อนไข TiB_0 มีความหนามากสุดเป็น 114.17 nm ส่วนที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 150 V มีความหนาที่น้อยที่สุดเป็น 74.28 nm ซึ่งผลของความหนานี้มีความสอดคล้องกับผลการวัดความหนาจากภาพถ่ายภาคตัดขวางตามหัวข้อที่ 4.5 ที่ความหนาของฟิล์มจะมีค่าที่ลดลงเมื่อศักย์แอโนดไบอัสเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นของฟิล์มจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น และสูงที่สุดที่เงื่อนไขศักย์แอโนดไบอัส 75 V



รูปที่ 4. 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์เทียบกับศักย์แอโนดที่ค่าต่างกัน

4.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง TiB₂

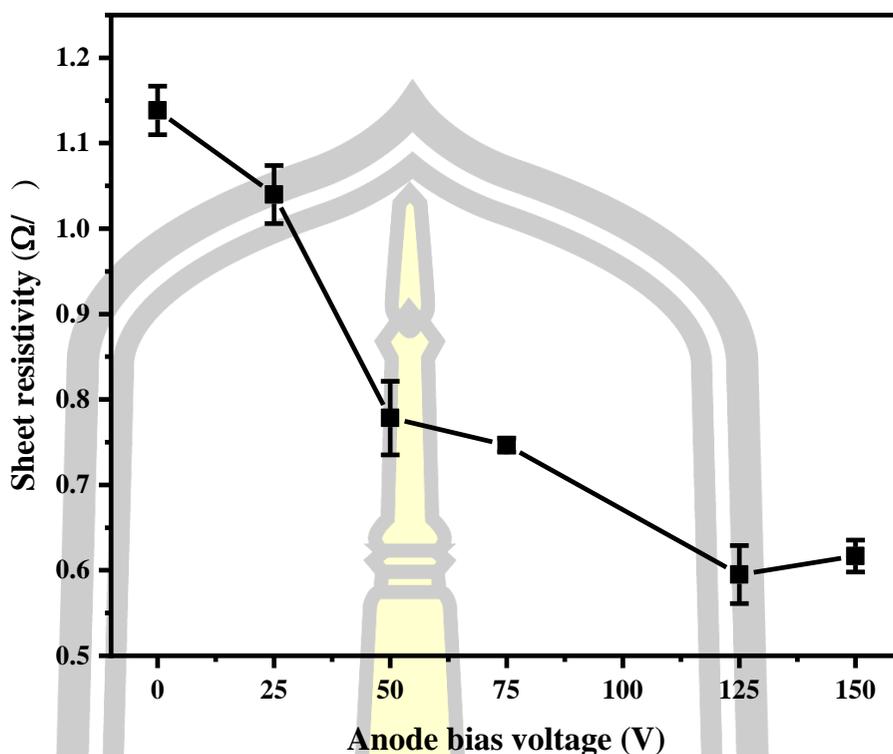
จากผลของภาพถ่าย SEM ที่เป็นภาคตัดขวางของฟิล์มบาง TiB₂ ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 1000 nm ซึ่งระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าอยู่ในช่วงมิลลิเมตร จึงเข้าเงื่อนไขที่ $t \ll S$ ซึ่งค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มสามารถแสดงค่าได้จากเครื่อง Source Meter Unit (SMU) สำหรับหัววัด 4 จุด แบบเชิงเส้นที่ใช้ในการวัดในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องที่ประดิษฐ์จากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ซึ่งได้ทำการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางทั้งหมด 6 ตำแหน่ง เนื่องจากขนาดของชิ้นงานในการเคลือบฟิล์มถูกจำกัดไว้เพียง 1 cm x 1 cm สำหรับข้อมูลที่ได้จากการวัดทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.3

ตาราง 4. 3 ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มที่ศักย์แอโนดต่างกัน

Sample	Sheet resistance (Ω/\square)	Standard deviation
TiB0	1.14	0.03
TiB25	1.04	0.03
TiB50	0.78	0.04
TiB75	0.75	0.01
TiB125	0.59	0.03
TiB150	0.62	0.02

จากรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง TiB₂ มีค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของศักย์แอโนดไบอัส ซึ่งโดยปกติแล้วสมบัติของไทเทเนียมไดโบไรด์จะมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งความต้านทานเชิงแผ่นจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.59 ถึง 1.13 Ω/\square และที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 75 V แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอมากที่สุดเนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแคบที่สุด ส่วนที่เงื่อนไขศักย์แอโนด 125 V ถึงแม้ว่าจะมีค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่น้อยที่สุด แต่ช่วงของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยังกว้างอยู่

ซึ่งจากผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นนี้ สามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ตามตารางที่ 4.4 ซึ่งจำเป็นต้องทราบความหนาของฟิล์ม สำหรับเงื่อนไขศักย์แอโนดที่ทราบความหนาของฟิล์มได้แก่ 0, 75 และ 150 สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ได้จากสมการที่ 2.25

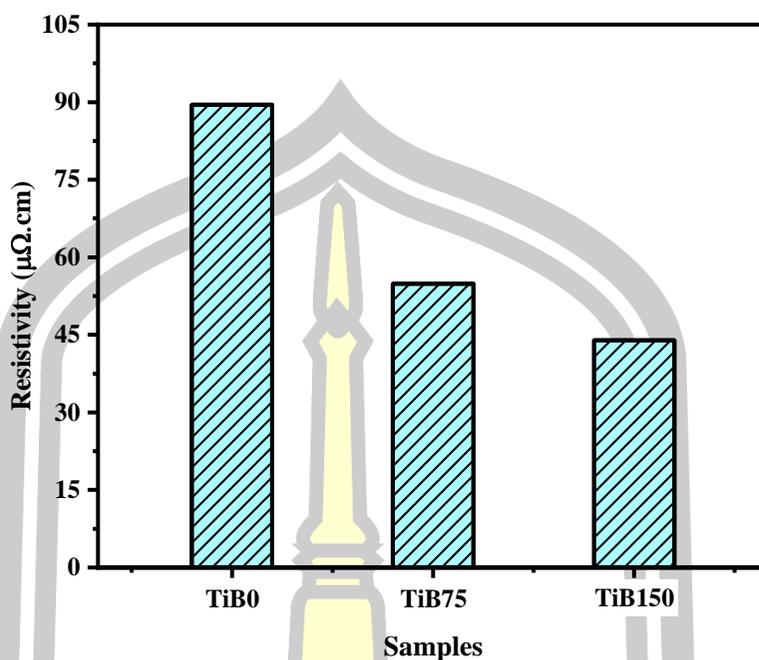


รูปที่ 4. 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบาง เทียบกับค่าศักย์แอโนดที่ต่างกัน

ตาราง 4. 4 แสดงค่าความหนาของฟิล์ม ค่าความต้านทานเชิงแผ่น และสภาพต้านทานไฟฟ้า

Sample	Thickness (nm)	Sheet resistance (Ω/□)	Resistivity (μΩ.cm)
TiB0	786.11	1.138	89.48
TiB75	735.13	0.746	54.88
TiB150	712.56	0.616	43.94

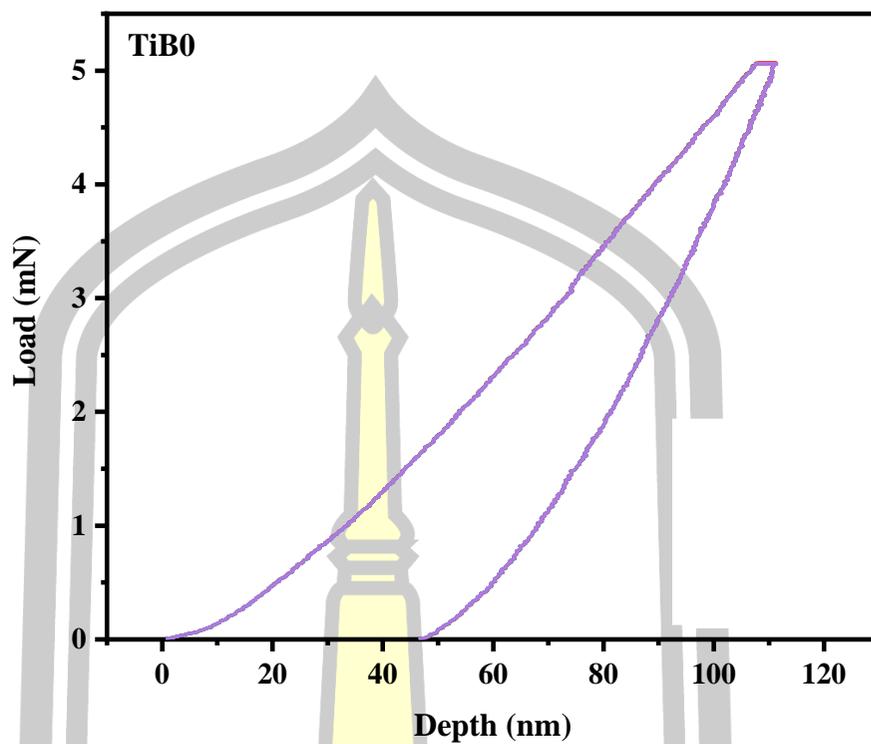
จากรูปที่ 4.33 จะพบว่าค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง TiB_2 มีแนวโน้มที่ลดลงตาม ศักย์แอโนดไปอัส โดยมีค่าอยู่ในช่วง 89.48 ถึง 43.94 $\mu\Omega.cm$ ซึ่งค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่มาก บ่งบอกได้ถึง การนำไฟฟ้าที่น้อย สำหรับที่เงื่อนไข TiB150 มีค่าการนำไฟฟ้าได้ดีอธิบายได้ว่าฟิล์มมี ความเป็นผลึกที่สูงและมีขนาดของเกรนใหญ่ทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเกรนมีระยะทางในการ เคลื่อนที่ หรือคล่องตัวกว่าเกรนที่มีขนาดเล็กและมีความไม่เป็นผลึกยกตัวอย่างเช่นที่เงื่อนไข TiB0



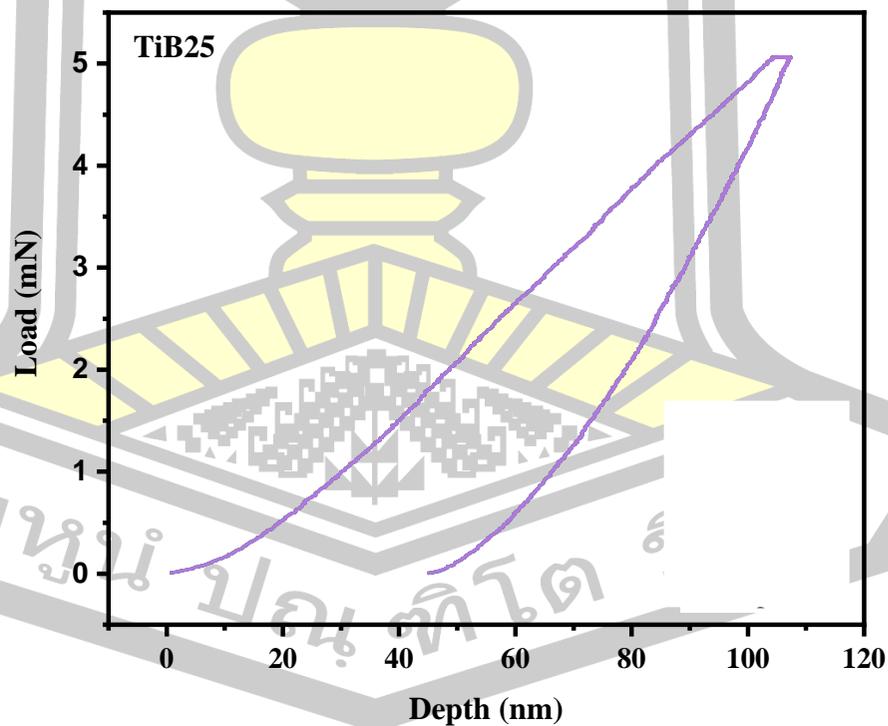
รูปที่ 4. 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง เทียบกับเงื่อนไขฟิล์มบาง TiB0 TiB75 และ TiB150

4.8 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มบาง TiB_2

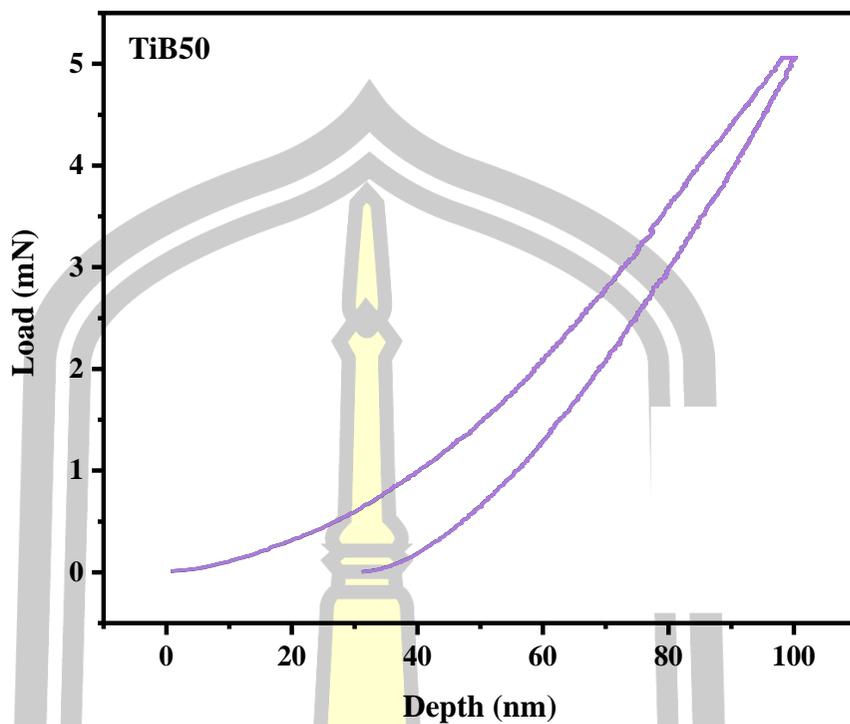
สำหรับผลการทดสอบความแข็งของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ คือการปรับค่าศักย์แอโนดไบอัส ซึ่งมีทั้งหมด 6 เงื่อนไข ได้แก่ TiB0 TiB25 TiB50 TiB75 TiB125 และ TiB150 ซึ่งงานทุกเงื่อนไขจะทำการวัดทั้งหมด 5 จุดในลักษณะที่เป็นเส้นตรง แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงกดกับความลึกที่กดได้ดังรูปที่ 4.34 ถึง 4.39 จะพบว่าตั้งแต่เพิ่มแรงในการกดที่ผิดของชิ้นงาน ระยะความลึกที่กดลงไปจะมีค่าที่ลดลงแบบเชิงเส้น และเมื่อออกแรงกดไปถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ 5 mN เป็นเวลา 5 วินาที และจะทำการค้างหัวกดที่แรงกดสูงสุดเป็นเวลา 2 วินาที จากนั้นคลายแรงกดจนไม่มีแรงกด โดยจะพบว่าทั้ง 5 ตำแหน่งที่ทำการวัดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความลึกเฉลี่ยของหัวกดอยู่ในช่วง 53.52 ถึง 75.62 nm ซึ่งที่เงื่อนไข TiB0 หัวกดจะกดลงไปได้ลึกที่สุด และลักษณะของเส้นโค้งของแรงกดกับเส้นคลายแรงกดที่กว้าง แสดงว่าฟิล์มที่เงื่อนไขนี้มีความแข็งที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไข TiB75 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีความลึกที่น้อยที่สุด และลักษณะของเส้นโค้งของแรงกดกับเส้นคลายแรงกดที่แคบ



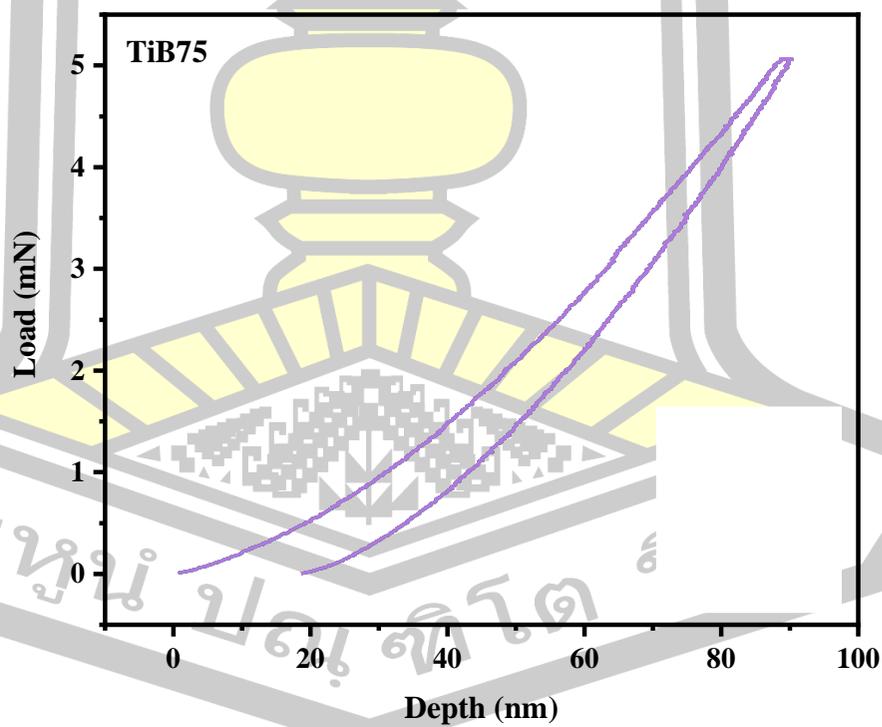
รูปที่ 4. 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบาง TiB0



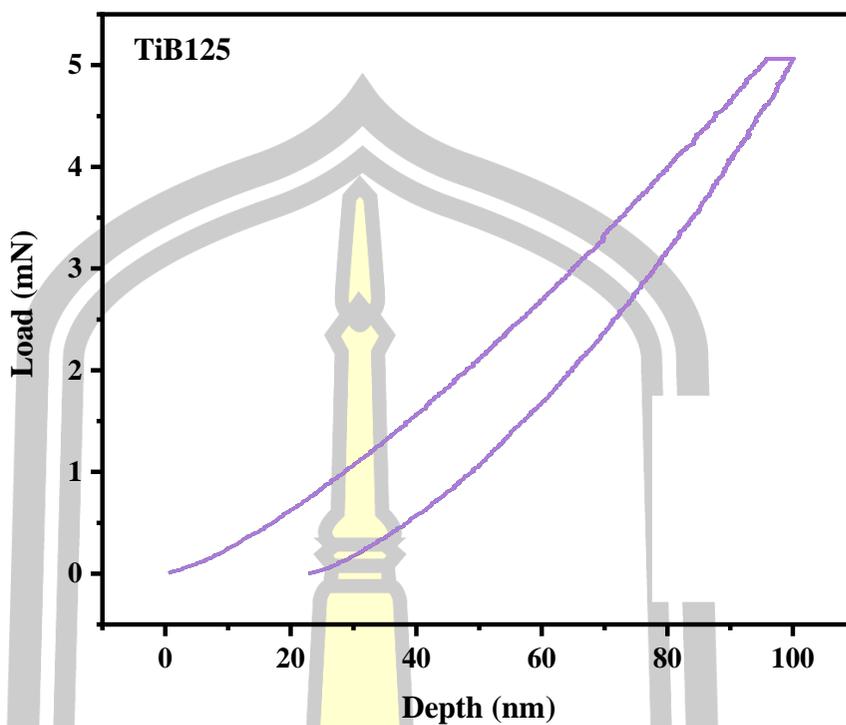
รูปที่ 4. 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบาง TiB25



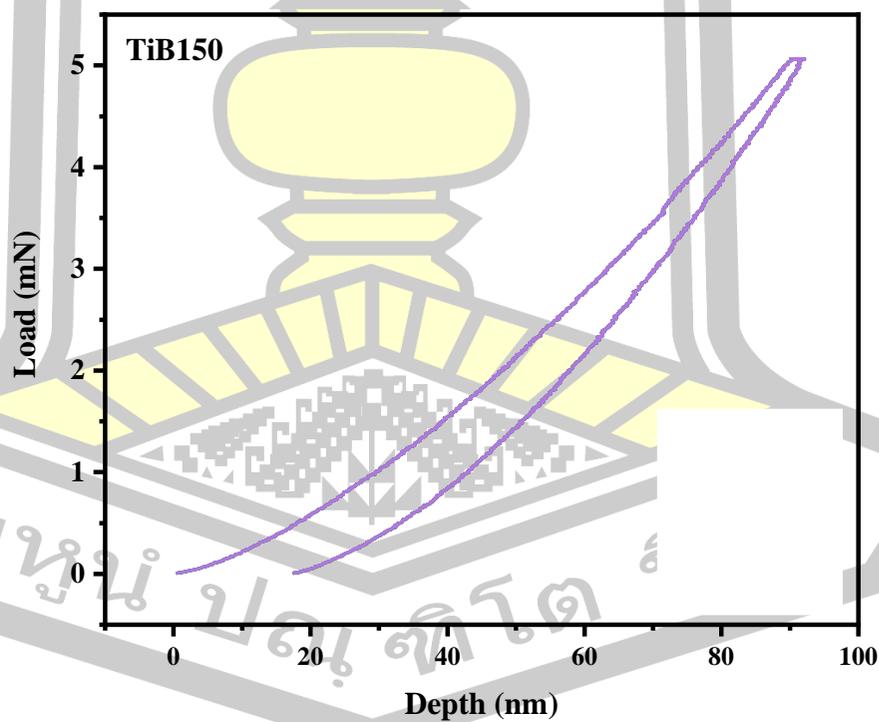
รูปที่ 4. 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบาง TiB50



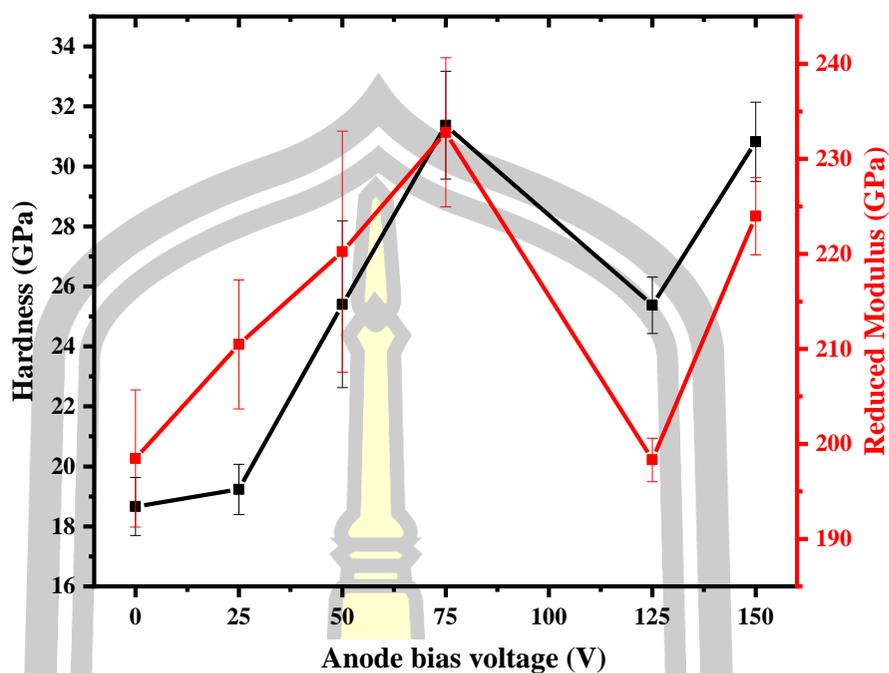
รูปที่ 4. 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบาง TiB75



รูปที่ 4. 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบาง TiB125



รูปที่ 4. 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความลึกของหัวกดของฟิล์มบาง TiB150



รูปที่ 4. 44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และสภาพยืดหยุ่นของแข็ง เทียบกับศักย์แอโนดไบอัสที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.40 พบว่าการเพิ่มศักย์แอโนดทำให้แนวโน้มของความแข็งของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงตั้งแต่เงื่อนไข TiB0 ถึง TiB75 โดยมีความแข็งอยู่ในช่วง 18.66 ถึง 31.37 GPa และมีความแปรปรวนที่เงื่อนไข TiB125 และ TiB150 ซึ่งมีค่าความแข็งเป็น 25.37 และ 30.82 ตามลำดับ ในส่วนของค่าสภาพยืดหยุ่นของฟิล์มก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับความแข็ง ซึ่งบ่งบอกได้ว่าที่เงื่อนไข TiB75 มีค่าความแข็งที่สูงที่สุด และมีค่าสภาพความยืดหยุ่นที่สูงที่สุดเช่นกัน แสดงว่าถึงแม้ที่เงื่อนไขนี้จะเคลือบฟิล์มที่มีความแข็งที่มาก แต่ได้ฟิล์มที่มีความเปราะที่สุด ต่างจากที่เงื่อนไข TiB150 ที่มีความแข็งต่ำลง มาแต่ได้ฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเงื่อนไข TiB75 และถ้าเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไข TiB50 กับ TiB125 ที่มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันเป็น 25.4 และ 25.37 GPa ตามลำดับ จะพบว่ามีค่าสภาพความยืดหยุ่นที่แตกต่างกันมาก โดยที่เงื่อนไข TiB125 ค่าสภาพความยืดหยุ่นที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น และค่าความแข็งเริ่มคงที่ที่ศักย์แอโนดไบอัส +75 V

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

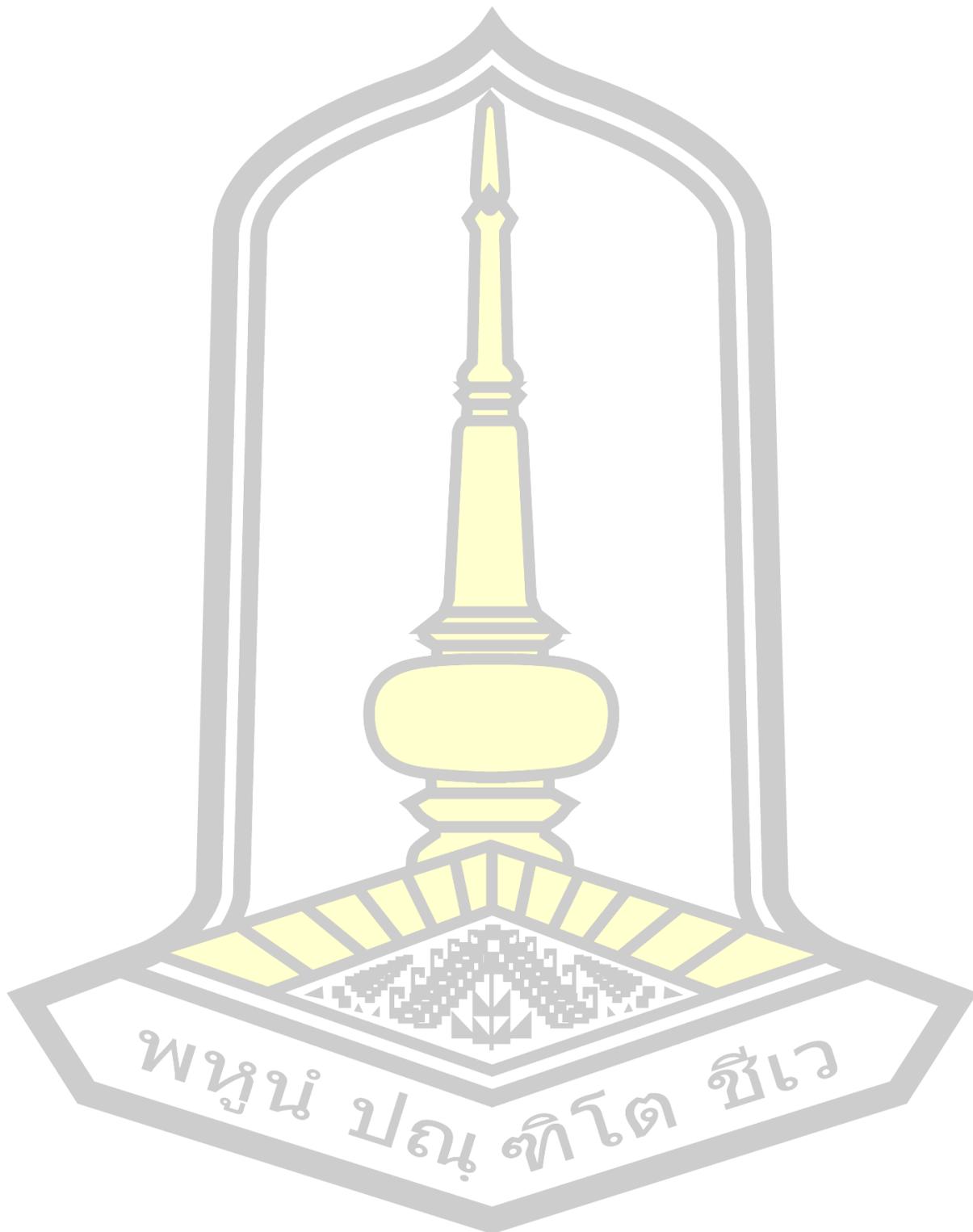
5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง TiB_2 บนแผ่นผลึกซิลิกอน โดยใช้เทคนิคซีอีแมกนีตรอน สเป็คเตอริงภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการไบอัสศักย์แอโนด ต่อสมบัติของพลาสมาที่ทำการวัดด้วยหัววัดแลงเมียร์ ทำให้ทราบว่าการเพิ่มศักย์แอโนดทำให้ศักย์พลาสมาเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง -0.41 ถึง 111.76 V แต่การปรับค่ากำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สขณะเคลื่อนไปไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์พลาสมา ซึ่งการเพิ่มขึ้นของศักย์พลาสมาเป็นปัจจัยที่ทำให้พลังงานของไอออนแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.22 ถึง 138.41 eV และโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของศักย์แอโนดไบอัสตั้งแต่ 0 +25 +50 +75 +125 และ +150 V ทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกและขนาดของผลึกมีขนาดใหญ่อขึ้น ส่วนผลจากวัดด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ พบว่าแนวโน้มความหนาฟิล์มลดลงจาก 114.17 ถึง 74.28 nm ตรงกันข้ามกับความหนาแน่นของฟิล์มที่มีค่ามากขึ้นจาก 3.88 ถึง 4.47 g/cm³ ซึ่งค่าความหนาที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากภาพถ่ายภาคตัดขวางที่เงื่อนไข TiB0 TiB75 และ TiB150 ที่ความหนาของชั้น TiB_2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความต้านทานเชิงแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และฟิล์มที่มีความแข็งสูงสุดคือเงื่อนไข TiB75 มีค่าความแข็งเป็น 31.37 GPa ที่มีค่าใกล้เคียงกับความแข็งของเป่าวัสดุ ซึ่งการใช้ศักย์แอโนดไบอัสในค่าที่มีความเหมาะสม จะทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เตรียมได้มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่ดี ส่งผลโดยตรงถึงความหนาแน่นของฟิล์มที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความขรุขระที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเคลือบฟิล์มบางด้วยการไบอัสศักย์บวกที่ขั้วแอโนด สามารถเพิ่มพลังงานของไอออนระหว่างการเคลือบฟิล์มได้เช่นเดียวกับการไบอัสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการเคลือบฟิล์มเทคนิคการไบอัสศักย์บวกที่ขั้วแอโนดที่บริเวณฝาภาชนะสุญญากาศ ยังมีความไม่ปลอดภัยเนื่องจากไม่มีฉนวนมาหุ้มที่ฝาภาชนะสุญญากาศซึ่งอาจเกิดอันตรายขณะที่การทดลองได้

บรรณานุกรม



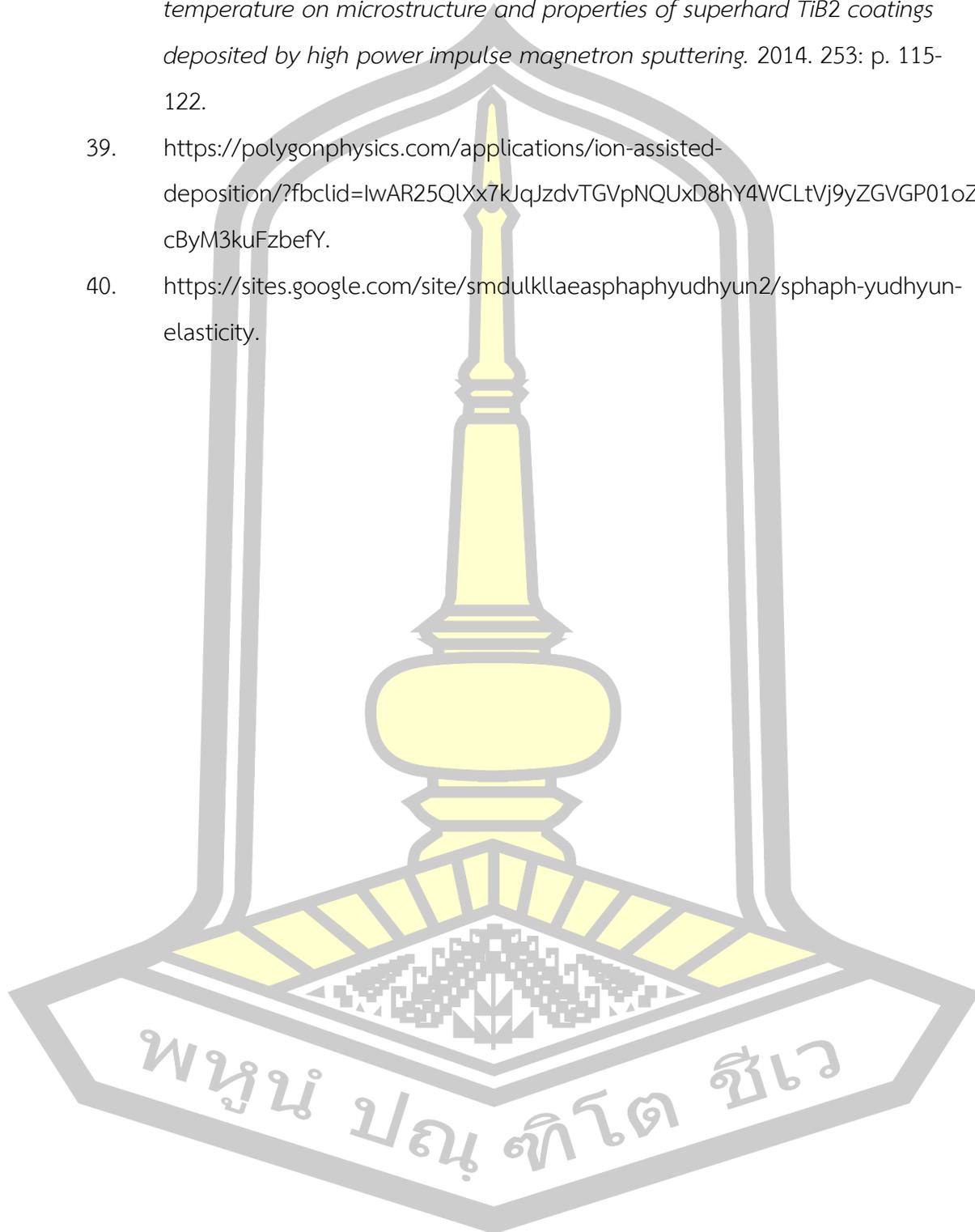
พหุมนุ ปณุ ทิโต ชีเว

1. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=TitaniumProperties&LN=TH>.
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Boron>.
3. <http://www.tcmetal2549.com/index.php?mo=10&art=415338>.
4. Munro, R.G.J.J.o.R.o.t.N.i.o.s. and Technology, *Material properties of titanium diboride*. 2000. 105(5): p. 709.
5. Wiedemann, R., et al., *Structure of deposited and annealed TiB₂ layers*. 1997. 97(1-3): p. 313-321.
6. Xia, M.-j., et al., *Improvement of adhesion properties of TiB₂ films on 316L stainless steel by Ti interlayer films*. 2013. 23(10): p. 2957-2961.
7. Berger, M., et al., *Low stress TiB₂ coatings with improved tribological properties*. 2001. 401(1-2): p. 179-186.
8. Park, B., et al., *Adhesion properties of TiB₂ coatings on nitrated AISI H13 steel*. 2005. 200(1-4): p. 726-729.
9. Zhao, Y., et al., *Ti/TiN multilayer thin films deposited by pulse biased arc ion plating*. 2011. 257(7): p. 2683-2688.
10. Anders, A.J.T.S.F., *A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching*. 2010. 518(15): p. 4087-4090.
11. Anders, A., et al., *Plasma biasing to control the growth conditions of diamond-like carbon*. 2007. 201(8): p. 4628-4632.
12. Sundgren, J.E., et al., *A review of the present state of art in hard coatings grown from the vapor phase*. 1986. 4(5): p. 2259-2279.
13. Mikula, M., et al., *Mechanical properties of superhard TiB₂ coatings prepared by DC magnetron sputtering*. 2007. 82(2): p. 278-281.
14. Ding, J.C., et al., *Effect of Cu addition on the microstructure and properties of TiB₂ films deposited by a hybrid system combining high power impulse magnetron sputtering and pulsed dc magnetron sputtering*. 2018. 344: p. 441-448.
15. Dieter, G.E.J.N.Y., *Mechanical Metallurgy McGraw Hill Book Company*. 1961.
16. Panich, N., et al., *Structural and Mechanical Characterisation of Superhard Nanostructured Ti/TiB₂ Coatings: the Multilayer Coatings*.
17. <https://en.wikipedia.org/wiki/Biasing>.

18. Ikehata, T., et al., *Positive-plasma-bias method for plasma-based ion implantation and deposition*. 2010. 204(18-19): p. 2881-2891.
19. Ikehata, T., et al., *Positive pulse bias method in plasma-based ion implantation*. 2003. 206: p. 782-786.
20. <http://www.semicore.com/reference/sputtering-yields-reference>.
21. Penning, F.M.J.p., *Die Glimmentladung bei niedrigem Druck zwischen koaxialen Zylindern in einem axialen Magnetfeld*. 1936. 3(9): p. 873-894.
22. Francis, G., *The glow discharge at low pressure*. Vol. 4. 1956.
23. Thornton, J.A.J.J.o.V.S. and Technology, *Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings*. 1974. 11(4): p. 666-670.
24. https://www.google.co.th/search?q=https://www.researchgate.net/figure/Thornton-structure-zone-model-Adapted-from-Thornton-1977_fig4_282656267.+&hl=th&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=WgUfC4UmGkXbbM%252CJDK26jW83DB6VM%252C_&vet=1&usg=AI4_-kS1NDkHj3LmbsShlbcMcy1MtL5bsQ&sa=X&ved=2ahUKEwiOxq-OvJjwAhUVjeYKHV8yAmQQ9QF6BAgNEAE&biw=1396&bih=605#imgrc=VSgX3wobEmRbiM&imgdii=HU00QjJncsZSrM
25. Conde, L.J.M.D.F.E.A.n.A.U.P.d.M., *An introduction to Langmuir probe diagnostics of plasmas*. 2011: p. 1-28.
26. Sigurjonsson, P. and J. Gudmundsson. *Plasma parameters in a planar dc magnetron sputtering discharge of argon and krypton*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. IOP Publishing.
27. Hayden, C., et al., *Ion energy distributions at a capacitively and directly coupled electrode immersed in a plasma generated by a remote source*. 2009. 18(2): p. 025018.
28. Matyi, R.J., et al., *The international VAMAS project on X-ray reflectivity measurements for evaluation of thin films and multilayers—Preliminary results from the second round-robin*. 2008. 516(22): p. 7962-7966.
29. [https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_incidence_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_incidence_(optics)).

30. https://physic512.blogspot.com/2014/10/total-internal-reflection.html?fbclid=IwAR3KqpbzB_UvXLiB4DEBfL53TupPCgLR2trtgtxo6ekK82mpiBKf4SnQzkVQ.
31. Yasaka, M.J.T.R.J., *X-ray thin-film measurement techniques*. 2010. 26(2): p. 1-9.
32. <https://www.quora.com/In-a-four-point-probe-method-why-current-is-supplied-to-the-outer-terminals-only-and-not-on-the-inner-two-terminals>.
33. ., h.s.g.c.s.t.k.k.-k.-h.
34. Oliver, W.C. and G.M.J.J.o.m.r. Pharr, *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology*. 2004. 19(1): p. 3-20.
35. https://en.wikipedia.org/wiki/Quartz_crystal_microbalance.
36. https://www.modutek.com/wet-processing-applications/wafer-cleaning-process/?_cf_chl_captcha_tk__=e8bcc723d97732cd89b7fff8409ca33bd697e47e-1619328092-0-AffPov1zYxvKrevllu-GK2Fh3LkdE_H9QVc1yWoo7zZM1amMWr-hACR8RKfjNlBP6PQGN3qVE4IButE--5KogfXsYAhQmzsP3_nmxSvUWk7Klenf00XdqLpP8uj788Fu-q0RE4KZSddmYcGigkSxuH2IFPYvuM9r7id4YR4VWXTZ5NY1zM5PZLA_t7EUL40i9uNSAdK1UVN4Ov7idpwKb6gnRhysAUpPS7d-YxnmUgFP6fkn455Ik7bYtDdhurpZE5EBKVwd0LR4YOhEIBJgInpg6Tdb_mZ3rY3y1n-cHtySoczDM3vm4LV0nUuPlFWZa-TRQZnFABpl8xqbk8ZbLJyf2hrWxu63ysyrFhRbatB6CdP4bpMKzUb0gMI9S6XFCwRW6_XjfWJTapyzDG-Bi833LqAGTTWjMICZeJOf2Wfe5k0mwFGaxAKzFqB06mUbLTLF3MSBoqd-poxuAjQiaLBhVgQ-V4O5d3C-WpU3VAQ1q5umXXHpqqhZEAB29WbE49jZ-YbFQYtOxw3F_LAJIfhrpZD-yG_gGWJ2b_VsxqpiFXJ0_4GvTFIchkAs2e1a0EKdpmVgJlgASkTx8GwWIGLn0Kc1fedDQgR8zIL8RWb-6Z1UYShJ5lJs-C4YR-tkOUHGM9IW2fuu4SCVOWQH368s8_8Vam36h_ZU8O0CVZ.
37. <https://www.inf.uci.edu/wordpress/wp-content/uploads/sop-wet-silicon-solvent-clean.pdf>.

38. Zhang, T.F., et al., *Influence of negative bias voltage and deposition temperature on microstructure and properties of superhard TiB₂ coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering*. 2014. 253: p. 115-122.
39. <https://polygonphysics.com/applications/ion-assisted-deposition/?fbclid=IwAR25QlXx7KJqJzdVTGVpNQUXD8hY4WCLtVj9yZGVGP01oZcByM3kuFzbefY>.
40. <https://sites.google.com/site/smdulklaeasphaphyudhyun2/sphaph-yudhyun-elasticity>.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	อรรถพล ชื่นประโคน
วันเกิด	26 สิงหาคม พ.ศ. 2539
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองยโสธร จังหวัดยโสธร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	2/3 หมู่ 7 บ้านคำเกิด ตำบลกระจาย อำเภอป่าดิว จังหวัดยโสธร 35150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2564 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2558 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยโสธรพิทยาคม อำเภอ เมือง จังหวัดยโสธร พ.ศ. 2555 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนยโสธรพิทยาคม อำเภอ เมือง จังหวัดยโสธร พ.ศ. 2552 ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลยโสธร ตำบลเชียงคำ จังหวัดยโสธร

พหุจน์ ปณฺ ภิโต ชีเว