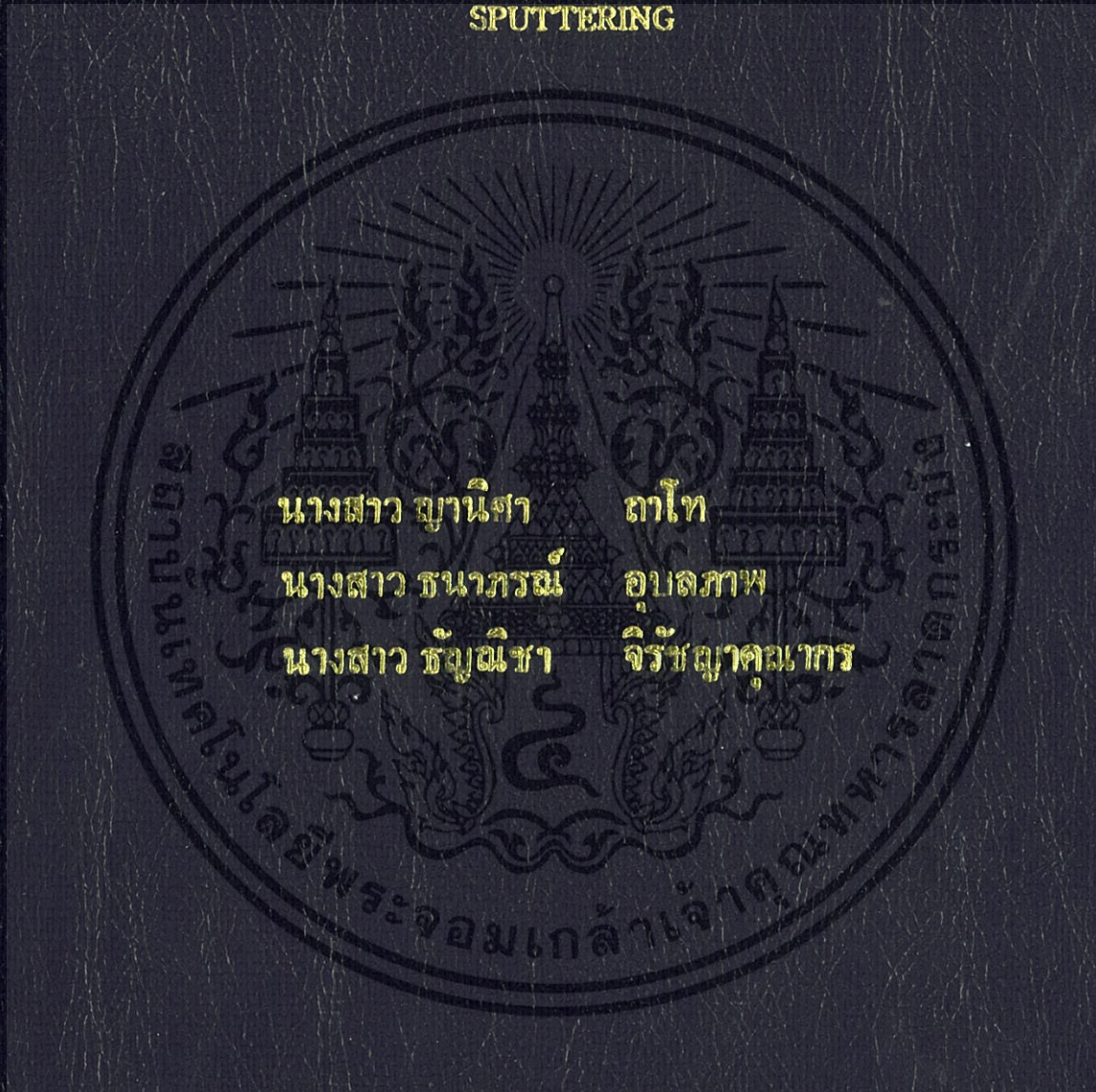


การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมในไตรดบนฐานรองพอลิเมอร์โดยวิธีแอกทีฟอาร์

เคฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

GROWTH OF ALUMINIUM NITRIDE THIN FILMS ON  
POLYMER SUBSTRATE (PET) BY REACTIVE RF MAGNETRON  
SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๘

การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนฐานรองพอลิเมอร์โดยวิธีรีแอกทีฟอาร์  
เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

GROWTH OF ALUMINIUM NITRIDE THIN FILMS ON  
POLYMER SUBSTRATE (PET) BY REACTIVE RF MAGNETRON  
SPUTTERING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

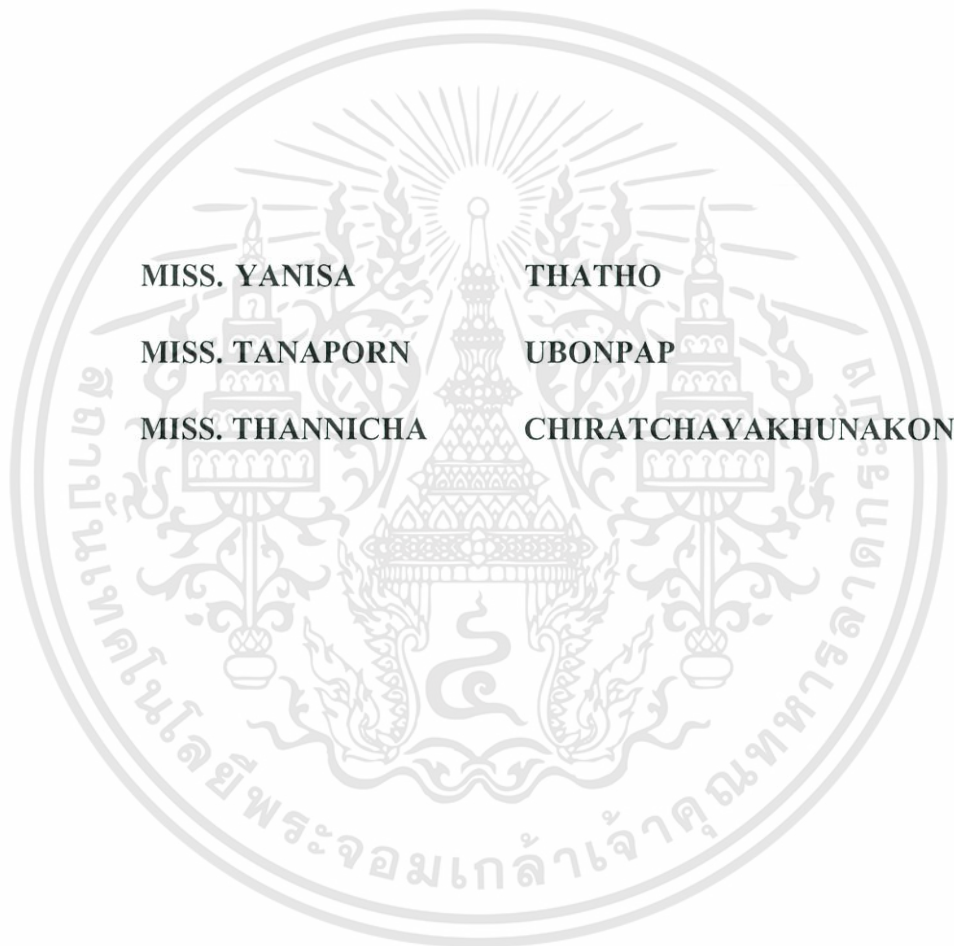
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**GROWTH OF ALUMINIUM NITRIDE THIN FILMS ON  
POLYMER SUBSTRATE (PET) BY REACTIVE RF MAGNETRON  
SPUTTERING**



**MISS. YANISA THATHO  
MISS. TANAPORN UBONPAP  
MISS. THANNICHA CHIRATCHAYAKHUNAKON**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนฐานรองพอลิเมอร์โดยวิธีรีแอทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

GROWTH OF ALUMINUM NITRIDE THIN FILMS ON POLYMER SUBSTRATE (PET) BY REACTIVE RF MAGNETRON SPUTTERING

ชื่อนักศึกษา

นางสาวณานิสสา ภาโท  
นางสาวชนาภรณ์ อุบลภาพ  
นางสาวรัชฎาธิชา จิรัชญาคุณากร

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2556

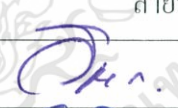
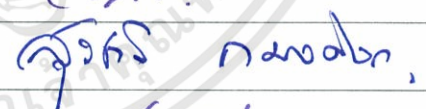
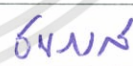
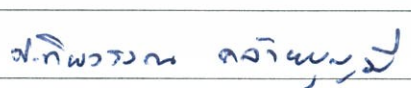
อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วราวุฒิ เถาคัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ เติชดิธีระ	
อาจารย์สุรชาติ กมลฉิลก	
อาจารย์ชนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาคัดดา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนฐานรองพอลิเมอร์ โดยวิธีรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง	
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ญานิสกา	ดาโท
	นางสาว ชนาภรณ์	อุบลภาพ
	นางสาว ธัญฉิษา	จิรัชญาคุณากร
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ	เถาวัลย์ดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ศ.ทิพวรรณ	คล้ายบุญมี

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้นำเสนอการปลูกฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในแนวแกนซี (c-axis) บนแผ่นฐานรองพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (PET) ซึ่งได้ทำการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นเป้าสารเคลือบสำหรับการสเปคเตอริง ในการทดลองได้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนและความบริสุทธิ์ของเป้าสารเคลือบต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ โดยใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนเป็น 20% 40% 60% 80% และ 100% โดยอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนต่อก๊าซอาร์กอนทั้งหมดจะมีอัตราการไหลรวมเป็น 20 sccm ซึ่งจะใช้เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% สามารถศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มบางได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และการวัดการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy จากการทดลองพบว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนเป็น 40% ใช้เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มีความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (002) สูงที่สุด มีค่า full width at half maximum (FWHM) น้อยที่สุด (เท่ากับ 0.327°) มีขนาดของเกรนใหญ่ที่สุด (26.68 นาโนเมตร) และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงที่สุด (73.4%)

**คำสำคัญ :** ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์, รีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง, วิธีสเวนนิโพล, ฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	GROWTH OF ALUMINUM NITRIDE THIN FILMS ON POLYMER SUBSTRATE (PET) BY REACTIVE RF MAGNETRON SPUTTERING
<b>Students</b>	Miss Yanisa Thatho Miss Tanaporn Ubonpap Miss Thannicha Chiratchayakhunakon
<b>Degree</b>	Bachelors of Science
<b>Major Program</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
<b>Co-advisor</b>	Dr. S. Tipawan Khlayboonme

### ABSTRACT

This special project proposes to grow the aluminum nitride (AlN) piezoelectric thin films with c-axis crystal orientation on polyethylene terephthalate (PET) plastic substrates. The AlN thin films are grown by the laboratory-made reactive RF magnetron sputtering system using an Al target. In this study, we investigate the effects of nitrogen concentration and purity of the Al targets on the crystal structure of AlN thin films. The N<sub>2</sub> concentration of 20%, 40%, 60%, 80% and 100% are used for deposition and balanced with Ar to a total flow rate of 20 sccm. The purity of Al targets are 99.99% and 99.8%. The morphology and structure of the films are studied by SEM, X-ray diffraction, and UV-Vis transmission spectroscopy. Our experiments shows the optimal N<sub>2</sub> concentration is 40% with the purity of Al target 99.99%. The optimal (002) oriented AlN film have the strongest XRD intensity, the smallest full width at half maximum value (0.327°), the largest grain size (26.68 nm) and the highest percentage of transmission (73.4% ).

**Keywords:** Aluminum nitride thin films, Reactive RF magnetron sputtering, Swanepole method, Piezoelectric thin films

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ที่เนาะรวมทั้งตรวจ และเนาะนำการแก้ปัญหามาในโครงการพิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี พวกเรารู้สึกขอบคุณ และดีใจเป็นอย่างยิ่งที่ได้ทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และพื้นผิว ภายใต้การดูแลของอาจารย์

ขอขอบคุณ ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่เปรียบเสมือนคุณแม่ที่คอยสอนและประทับประคองให้พวกเราก้าวเดิน เป็นอาจารย์ที่คอยชี้แนะแนวทางและช่วยเหลือพวกเราเสมอมา เพราะคำแนะนำ การชี้แนะ และความช่วยเหลือของอาจารย์ โครงการพิเศษเล่มนี้จึงสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่อมร เทศสกุลวงศ์, พี่สมพบ แซ่เจ็ย, พี่อริษา สมพงษ์, และพี่สุพัตรา หมั่นสมบุรณ์พงษ์, สำหรับคำปรึกษา ความช่วยเหลือ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ รุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ได้ให้การช่วยเหลือให้กำลังใจ คำแนะนำ รอยยิ้มที่ทักทาย และการสนับสนุนจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จออกมาได้ โดยเฉพาะเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์และพื้นผิวที่ดูแลและให้กำลังใจกันตลอดมา

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวของพวกเราที่ได้ให้กำเนิดเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้การสนับสนุนพวกเราเสมอมา ขอขอบคุณทุกๆ ท่านที่เป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนพวกเรา และขอขอบคุณผู้ใหญ่ใจดีทุกท่านที่มีส่วนให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงมาได้  
อย่างดี

ญานิสสา    ธาโท  
ธนาภรณ์    อุดลภาพ  
ธัญนิษา    จิรัชญาคุณากร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 อลูมิเนียมไนไตรด์	4
2.1.1 สมบัติทางโครงสร้างของอลูมิเนียมไนไตรด์	4
2.1.2 สมบัติทั่วไปของอลูมิเนียมไนไตรด์	6
2.2 เทคนิคการปลูกฟิล์มบาง	6
2.2.1 กระบวนการเกิดการสปีดเตอร์	6
2.2.2 กระบวนการโกรว์ดิซซาร์จด้วยคลื่นวิทยุ	7
2.2.3 แมกนีตรอน	10
2.2.4 รีแอกทีฟสปีดเตอร์ริงด้วยคลื่นวิทยุ	11
2.3 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง	12
2.3.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectrometer, XRD)	13
2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)	14
2.3.3 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)	18
2.3.3.1 UV-Vis Spectrum	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.2 UV-Vis Spectroscopy	18
2.3.3.3 UV-Vis Spectrophotometer	20
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>22</b>
3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	22
3.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ	23
3.1.2 อุปกรณ์วัดและแสดงผลความดัน	24
3.1.3 แคมเบอร์สุญญากาศ	24
3.1.4 ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ	25
3.1.5 แหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุ	26
3.2 แผ่นฐานรองและเป่าสารเคลือบ	26
3.3 การเตรียมแผ่นฐานรอง	27
3.4 การเตรียมและติดตั้งระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง	27
3.4.1 ทำความสะอาดและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบสุญญากาศ	27
3.4.2 สร้างระบบควบคุมก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุ	30
3.5 การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	33
3.6 การวัดคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง	35
<b>บทที่ 4 ผลการอภิปรายและอธิบายผล</b>	<b>50</b>
4.1 การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ	50
4.1.1 ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	51
4.1.2 ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์	51
4.1.3 สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	52
4.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	55
4.2 การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เงื่อนไขของการใช้เป่าสารเคลือบที่ความบริสุทธิ์แตกต่างกัน	58
4.2.1 ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์	60
4.2.3 สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	61
4.2.4 ตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	62
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>65</b>
5.1 สรุปผลการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ในอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 20% 40% 60% 80% และ 100% ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน	65
5.2 สรุปผลการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ในอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 40% และ 60% ที่เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8%	65
5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	66
5.4 ข้อเสนอแนะ	67
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>68</b>
<b>ภาคผนวก</b>	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่สำคัญของอลูมิเนียมไนไตรด์	6
3.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ในโครงการพิเศษนี้	34
4.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ ที่เงื่อนไขเวลาในการปลูกฟิล์มเท่ากัน	50
4.2 ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสเวนนิโพล เมื่อปลูกด้วยเวลาที่เท่ากัน	51
4.3 ค่า $T_M$ , $T_m$ , $s$ , $n_1$ , $d_1$ , $m_0$ , $d_2$ และ $n_2$ ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ซึ่งปลูกด้วยอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 60%	54
4.4 ค่าคงที่ของเส้นแนวโน้มสำหรับความสัมพันธ์เคอร์ซี	54
4.5 แสดงค่า d-spacing กับ FWHM ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ	57
4.6 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ ที่เงื่อนไขของการใช้เป้าสารเคลือบที่ความบริสุทธิ์แตกต่างกัน	59
4.7 ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสเวนนิโพล เมื่อปลูกด้วยเวลาที่เท่ากัน	60
4.8 แสดงค่า d-spacing กับ FWHM ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน เท่ากับ 40% และ 60%	64

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแบบเวียร์ชไตซ์ของอลูมิเนียมไนไตรด์	5
2.2 โครงสร้างผลึกแบบร็อกซอลต์ (Rocksalt)	5
2.3 ขบวนการเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น	8
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดกับเวลาในระบบดิสชาร์จด้วยคลื่นวิทยุหลังจากเข้าสู่สถานะเสถียร โดยอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วกว่าจะถูกดึงเข้าหาเป้าสารเคลือบในช่วงครึ่งคลื่นที่เป็นบวก เกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าไบอัสขึ้นที่ขั้วของเป้าสารเคลือบอยู่ระดับหลายร้อยโวลต์	9
2.5 ระบบสปีดเตอริงด้วยคลื่นวิทยุ มีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในวงจรเพื่อรักษาระดับความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าในขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยมีแผ่นฐานรองและผนังแชมเบอร์ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ส่วนแผ่นเป้าสารเคลือบทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด	9
2.6 หลักการทำงานของแมกนีตรอนสปีดเตอริงและวงโคจรของอิเล็กตรอนภายในระบบ	11
2.7 กระบวนการเกิดรีแอกทีฟสปีดเตอริงของการปลูกฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ โดยอลูมิเนียมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเกิดเป็นอลูมิเนียมไนไตรด์	12
2.8 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์ที่ระนาบของผลึกและให้ผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ $2d \sin\theta$	13
2.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอลูมิเนียมไนไตรด์	14
2.10 ส่วนประกอบภายในที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.11 แถบสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	18
2.12 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม	19
2.13 ตัวอย่างสเปคตรัมการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการวัดตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	19
2.14 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง Single Beam UV-Vis Spectrophotometer	20
2.15 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง Double Beam UV-Vis Spectrophotometer	21
3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง	22
3.2 ปัมป์ไอฟุ้งกระจายรุ่น Diffstak 160/700 ของบริษัท Edwards	23
3.3 ปัมป์โรตารี Edward RV12	24
3.4 (a) หัววัดความดันชนิดเพนนิ่งและชนิดพิรานี	
(b) ตัวแสดงผล Active Gauge Controller ของบริษัท Edward	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงส่วนประกอบภายในห้องสุญญากาศ	25
3.6 ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ รุ่น MFC: SIERRA 810C	25
3.7 เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุขนาดกำลังสูงสุด 650 วัตต์และอุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์อัตโนมัติ	26
3.8 เป้าสารเคลือบอลูมิเนียม Kurt J. Lesker ความบริสุทธิ์ 99.99% และแผ่นฐานรองพลาสติก PET	26
3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดและเตรียมระบบสุญญากาศ	28
3.10 (a) หัวแมกนีตรอน (b) Ground Shield (c) แผ่นจับยึดแผ่นฐานรอง (d) ชัตเตอร์ (อุปกรณ์เปิด - ปิดเป้าสารเคลือบ)	28
3.11 เซมเบอร์สุญญากาศที่ติดอลูมิเนียมฟอยล์	29
3.12 อุปกรณ์ที่ห่อฟอยล์อลูมิเนียม และติดตั้งในห้องสุญญากาศเรียบร้อยแล้ว	29
3.13 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องสุญญากาศ	30
3.14 กล่องควบคุม และเปิดปิดการจ่ายก๊าซและกำลังคลื่นอาร์เอฟ	30
3.15 รายละเอียดการเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุของบริษัทบราวน์เลย์	31
3.16 V27D-T1 Digital LED Voltmeter	32
3.17 รายละเอียดการเชื่อมต่อของคอนเนกเตอร์แบบดีบี 15 ของหัวควบคุมอัตราการไหล รุ่น Sierra 810	32
3.18 อุปกรณ์ภายในกล่องควบคุมและเปิดปิดการจ่ายก๊าซ และกำลังคลื่นอาร์เอฟ	33
3.19 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EAZY168 STAMP ของบริษัท อีทีที จำกัด	33
3.20 ระบบการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000	35
3.21 ระดับการดูดกลืนแสงพิจารณาจากสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ เส้นกราฟที่ได้จากค่าสูงสุดและต่ำสุดของรีเวิร์กแทรกสอด และสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง	36
3.22 การนำข้อมูลเข้ามาเก็บไว้ใน Workspace	38
3.23 การกำหนดตัวแปรในโปรแกรม MATLAB	39
3.24 การใช้คำสั่งเขียนกราฟในโปรแกรม MATLAB	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 การสร้างตัดแกนและสร้างกราฟความยาวคลื่นแสง และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉพาะช่วงที่มีรีวิวการแทรกสอด	40
3.26 ขั้นตอนการ smooth graph ของกราฟ BvsA	40
3.27 การหาจุดต่ำสุดของรีวิวการแทรกสอด	41
3.28 หน้าต่างที่แสดงตัวแปร Table ใน Workspace	42
3.29 การสร้างตัวแปร X และ Tmin ใน Workspace	42
3.30 การหาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่จุดต่ำสุด จากกราฟจุดต่ำสุดของ รีวิวการแทรกสอดกับความยาวคลื่น	43
3.31 สร้างตัวแปร Wavelength และ T100 ในโปรแกรม MATLAB	44
3.32 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเปอร์เซ็นต์ การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรองกับความยาวคลื่น	45
3.33 การ Fitting กราฟเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรองกับความยาวคลื่น	45
3.34 การ Evaluate ข้อมูลเพื่อหา $T_s$ ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ	46
3.35 การคำนวณดัชนีหักเหแผ่นฐานรองใน โปรแกรม Microsoft Excel	47
3.36 ค่า $X_i$ และ $f(X_i)$ ที่ได้ Analyze ข้อมูลแล้ว ของ $T_M$ และ $T_m$	47
3.37 ข้อมูลค่าความยาวคลื่น $T_{max}$ และความยาวคลื่น $T_{min}$	48
3.38 ตารางการคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง	48
3.39 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง	49
3.40 ตารางการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม	49
4.1 ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน เท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100%	51
4.2 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงย่านตามมองเห็นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ	52
4.3 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงย่านตามมองเห็นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ซึ่งปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของฟิล์มกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน เท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100%	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	56
4.6	57
4.7	58
4.8	59
4.9	60
4.10	61
4.11	62
4.12	63
4.13	63
4.14	64

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

จากการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์มบางในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการทดลอง และศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์เกิดขึ้นมากมาย จากการศึกษา สมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ พบว่า ฟิล์มบางมีแถบพลังงานต้องห้าม (Band Gap) ที่กว้าง และมีการเรียงตัวของผลึกในแนวแกนซี (c-axis) ด้วย ซึ่งมีผลทำให้ฟิล์มบางมีคุณสมบัติ เพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น ซึ่งเหมาะต่อการนำไปพัฒนา และประยุกต์ใช้กับงานสร้างอุปกรณ์ ตรวจวัดความดัน (Pressure Sensor) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electroacoustic Device) ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) และอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) เป็นต้น

การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิครีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Reactive RF Magnetron Sputtering) เป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายน้อย และค่อนข้างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยระนาบของฟิล์มบางที่ได้ นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ขณะทำการเตรียมฟิล์ม ซึ่งการเกิดระนาบของฟิล์มขึ้นอยู่กับ 3 พารามิเตอร์ หลักคือ กำลังของแหล่งกำเนิดอาร์เอฟ (RF Power), อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซ อาร์กอน ( $N_2/N_2+Ar$ ) และเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม จากงานวิจัยหลายฉบับ พบว่า การปลูกฟิล์ม บางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ ซึ่งมีความยืดหยุ่นค่อนข้างสูง และด้วย คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ เมื่อนำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความ ดัน จะมีความสามารถในการตรวจวัดได้ดีขึ้น ความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์มากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนฐานรองพอลิเมอร์โดยวิธีรีแอคทีฟ อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่น ฐานรองได้หลายชนิด สามารถทำการปลูกได้ทั้งความดันต่ำและอุณหภูมิไม่สูงมาก อีกทั้งเหมาะสม กับกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ระบบ สูญญากาศ หัวแมกนีตรอน ระบบควบคุมการไหลของก๊าซและชุดจับยึดแผ่นฐานรอง โดย ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนไนโตรเจนที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสง เพื่อหา เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาระบบและกระบวนการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคอีพอกซีฟอว์เอพแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง ลักษณะพื้นผิว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนขณะทำการปลูกฟิล์ม
- 3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ระหว่างฟิล์มบางที่ใช้เป้าสารเคลือบที่มีความบริสุทธิ์ไม่เท่ากัน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ด้วยเทคนิคอีพอกซีฟอว์เอพแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 2) ศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีอีพอกซีฟอว์เอพแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 3) ศึกษากระบวนการตรวจวัดสมบัติของฟิล์มบาง
  - X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)
  - Scanning Electron Microscope (SEM)
  - UV visible spectroscopy
- 4) ปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคอีพอกซีฟอว์เอพแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบาง และเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์แตกต่างกัน
- 5) ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางที่ได้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ดำเนินการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็น และเกี่ยวข้องกับระบบการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีอีพอกซีฟอว์เอพแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 2) คิดตั้งและเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบปลูกฟิล์มบาง
- 3) ปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคอีพอกซีฟอว์เอพแมกนีตรอนสปีดเตอริงบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ และศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงแสง และสมบัติเชิงเคมีของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้
- 5) ทำการวัดการส่องผ่านของแสง
- 6) คำนวณหาค่าความหนา ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์จากสเปกตรัมการส่องผ่าน
- 7) ตรวจสอบวัดลักษณะเชิงพื้นผิว และเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์
- 8) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้และเข้าใจเทคนิคการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีเอกทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง
- 2) สามารถปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์โดยวิธีเอกทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง
- 3) มีความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

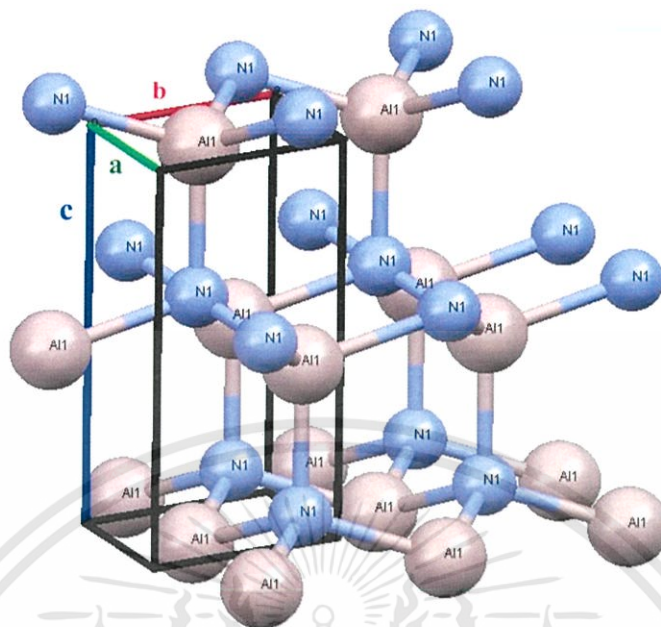
### 2.1 อลูมิเนียมไนไตรด์

อลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V ซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ จึงเป็นที่ดึงดูดความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก โดยอาศัยสมบัติที่เป็นวัสดุที่มีแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง (6.2 eV) อีกทั้งเมื่อทำการเจือด้วยสารเจืออื่นก็สามารถทำเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) ที่เปล่งแสงออกมาในย่านยูวีได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่โดดเด่นอื่นๆ อีก เช่น ความแข็ง (Hardness) โปร่งแสงในย่านตามองเห็น และย่านยูวีมีจุดหลอมเหลวมากกว่า 2275 เคลวิน มีสภาพความต้านทานสูง (Resistivity,  $\rho \geq 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ) มีสภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ดีเยี่ยม และทนต่อการกัดกร่อนของสาร (Resistance To Chemical) จึงทำให้อลูมิเนียมไนไตรด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Packaging) ทำเป็นชั้นฉนวน (Insulator) ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์เซอเฟซอะคูสติก (Surface Acoustic Devices) ได้ด้วย เนื่องจากอลูมิเนียมไนไตรด์เป็นวัสดุที่มีความเร็วของคลื่นเสียงที่พื้นผิว (Surface Acoustic Wave) มีค่าสูง (Rayleigh  $V_R = 6-6.2 \text{ km/s}$ , Longitudinal  $V_L = 11-12 \text{ km/s}$ ) เหมาะสำหรับทุกวัสดุ และมีค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างเชิงไฟฟ้ากับเชิงกล (Electromechanical Coupling Coefficient) ที่สูง แต่อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ นั้นจำเป็นต้องใช้อลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งมีการสังเคราะห์ค่อนข้างยาก จึงมีการศึกษาและพัฒนาการรวมถึงวิธีการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้อลูมิเนียมไนไตรด์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

#### 2.1.1 สมบัติทางโครงสร้างของอลูมิเนียมไนไตรด์

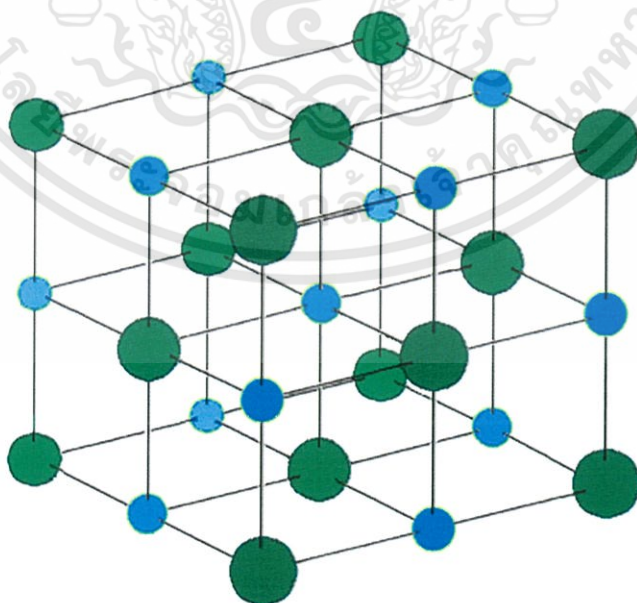
อลูมิเนียมไนไตรด์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลเวียร์ทไซต์ (Hexagonal - Wurtzite) แต่ในบางครั้งก็สามารถมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิกโรคซอลต์ (Cubic Rocksalt) ได้เมื่ออยู่ภายใต้แรงดันสูง และเนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่าง  $c/a = 1.60$  และพันธะแบบโคลสแพ็คโควาเลนต์ (Close - Packed Covalent) จึงทำให้มีความแข็งแรงสูงและนำความร้อนได้ดี

- โครงสร้างผลึกแบบเวียร์ทไซต์ เกิดจากการนำโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal Close - Packed: hcp) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันมาซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบเวอริชไซด์ของอลูมิเนียมไนไตรด์

- โครงสร้างผลึกแบบร็อกซอลต์ (Rocksalt) มีบราวส์แลตทิซ (Bravais Lattice) แบบลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ แต่ละอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมต่างชนิดกันอีก 6 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบร็อกซอลต์ (Rocksalt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 สมบัติทั่วไปของอลูมิเนียมไนไตรด์

สำหรับสมบัติต่างๆ ที่สำคัญของอลูมิเนียมไนไตรด์แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอลูมิเนียมไนไตรด์

สมบัติ	ค่า
แถบพลังงานต้องห้าม (Band Gap)	6.2 eV
ความหนาแน่น (Density)	3.3g/cm <sup>3</sup>
การนำความร้อนทางทฤษฎี (Theoretical Thermal Conductivity)	320 W/m-k
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (Thermal Expansion Coefficient)	$4.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
สนามไฟฟ้าวิกฤต (Critical Field Strength, E <sub>c</sub> )	6-15 MeV /cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant $\epsilon_r$ )	8.5
ดัชนีหักเห (Refractive Index, n)	2.15
การนำไฟฟ้า (Thermal Conductivity)	2.0 W/cmK
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	>2000 °C
ค่าคงที่แลตทิซ a (Lattice Constant, a)	3.112 Å
ค่าคงที่แลตทิซ c (Lattice Constant, c)	4.982 Å

## 2.2 เทคนิคการปลูกฟิล์มบาง

สำหรับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้ทำการปลูกในโครงการพิเศษนี้ เป็นการปลูกโดยใช้เทคนิครีเอกทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอรริง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 กระบวนการเกิดการสเปคเตอรริง

กระบวนการสเปคเตอรริงนี้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ 100 ปีที่ผ่านมา โดย Grove กระบวนการสเปคเตอรริง คือ กระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอม ที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นในกระบวนการสเป็คเตอรืงก็คือ

1) เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

2) อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้ามีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสเป็คเตอรืงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยม คือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่าย และสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงาน และ โมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการสเป็คเตอรืงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงาน และ โมเมนตัมที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้น เมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงต้องเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งทำให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3) การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสเป็คเตอรืงนี้จะต้องผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ลำอนุภาคจากป็นไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือเกิดจากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ์ เนื่องจากป็นไอออนมีราคาค่อนข้างสูง และให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสเป็คเตอรืงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ์ในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง

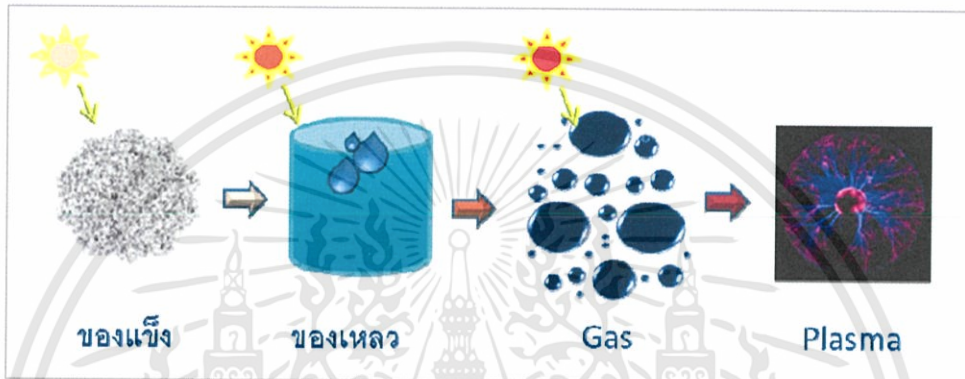
### 2.2.2 กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ์ด้วยคลื่นวิทยุ

โกลว์ดีสชาร์จ์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการทำฟิล์มบางต่างๆ เช่น ระบบสเป็คเตอรืงพลาสมาเอตซิง ไอออนอิมเพลนเตชัน เป็นต้น กระบวนการทั้งหมดวางอยู่บนพื้นฐานในการสร้างและสมบัติของพลาสมา ในกระบวนการทำฟิล์มบางประกอบด้วยก๊าซที่ถูกทำไอออนในซ้บางส่วนที่ระดับความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศเป็นอย่างมาก เพื่อความเข้าใจต่อไปจะกล่าวถึงสมบัติของพลาสมา และ โกลว์ดีสชาร์จ์บางประการรวมทั้งวิธีการสร้างและการคงสถานะดังกล่าวไว้

พลาสมา คือ ก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอมที่เป็นกลางภายในมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ ซึ่งประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ประจุบวก กลุ่มของประจุบวกตลอดจนอะตอมที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า โมเลกุล และส่วนประกอบของโมเลกุล และถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร (เป็นสถานะที่ 4 ของสสาร) เริ่มจากสสารที่อยู่ในสถานะต่างๆ เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ตามลำดับ ซึ่งสถานะพลาสมาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นกัน กล่าวคือ เมื่อก๊าซที่เป็นกลางได้รับพลังงานที่มากพอ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ทำให้เกิดไอออน กลุ่มอนุภาค และเกิดกระบวนการเกิดอิเล็กตรอนและไอออน กระบวนการเกิดอะตอมและกลุ่มอะตอม และกระบวนการปลดปล่อยโฟตอน ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานภายในพลาสมา ซึ่งกระบวนการดังกล่าว เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขบวนการเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น

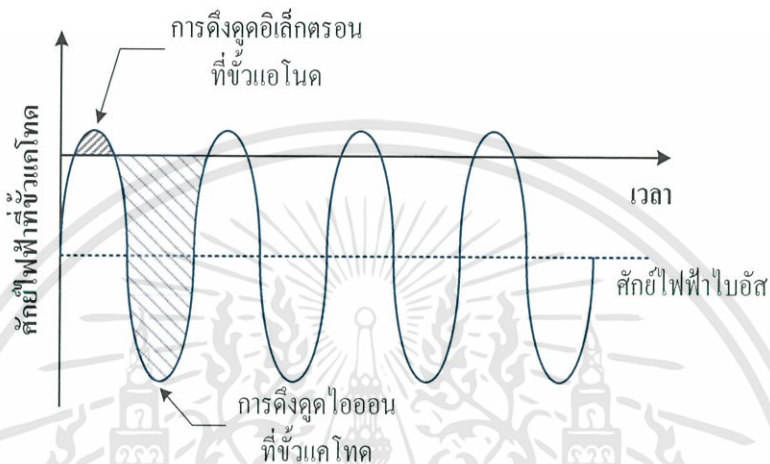
พลาสมาที่เกิดจากคลื่นวิทยุ (Radio Frequency, RF) เป็นการดีสชาร์จเนื่องจากไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่ 13.56 MHz และมีศักย์ไฟฟ้าจากขั้วคลื่นถึงขั้วคลื่นอยู่ในระดับกิโลโวลต์ ส่วนกลไกการเกิดพลาสมานั้นก็จะเกิดจากการชนของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง และทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากอิเล็กตรอนมีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่สูงกว่าไอออน เพราะน้ำหนักที่เบากว่าเมื่อเทียบกับไอออน จึงส่งผลให้ในหนึ่งรอบความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้านั้น จะเกิดการก่อตัวขึ้นของศักย์ไฟฟ้าลบขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าเมื่อเทียบกับพลาสมา โดยศักย์ไฟฟ้างกล่าวว่ามีค่าอยู่ในระดับหลายร้อยโวลต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าทั้งสองจึงเกิดศักย์ไฟฟ้าลบขึ้นและดึงดูดไอออนให้วิ่งเข้าชนได้ แต่ในกรณีของศักย์ไฟฟ้าดีซีที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับฟังก์ชันเชิงซ้อนของความหนาแน่นกระแสที่ขั้วไฟฟ้า ถ้าพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าไม่เท่ากัน จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้ว จะถูกกำหนดด้วยสมการที่ (2.1)

$$\frac{V_{RF}}{V_G} = \left( \frac{A_G}{A_{RF}} \right)^4 \tag{2.1}$$

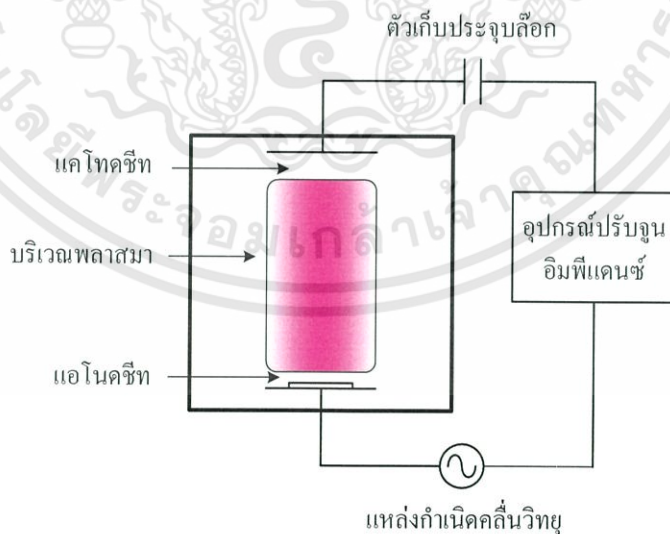
- เมื่อ  $V_{RF}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก
- $V_G$  คือ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าขนาดใหญ่
- $A_{RF}$  คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก (เป้าสารเคลือบ)
- $A_G$  คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าขนาดใหญ่ (ผนังแชมเบอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแฮมเบอร์เป็นกรวด  $A_G$  พื้นที่ผิวของเป้าสารเคลือบจะทำให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้างดงกล่าวมีขนาดเพียงเล็กน้อยตามความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.1) ส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เป้าสารเคลือบจะมีค่ามากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงการเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วทั้งสอง ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุลือกอนุกรมกับขั้วแคโทด และยงต้องมีอุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์ระหว่างพลาสมาทกับแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดกับเวลาในระบบศิขารัจด้วยคลื่นวิทยุ หลังจากเข้าสู่สถานะเสถียร โดยอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วกว่าจะถูกดึงดูดเข้าหาเป้าสารเคลือบในช่วงครึ่งคลื่นที่เป็นบวก เกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าไบอัสขึ้นที่ขั้วของเป้าสารเคลือบอยู่ระดับหลายร้อยโวลต์



รูปที่ 2.5 ระบบสปีดเตอริงด้วยคลื่นวิทยุ มีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมในวงจรเพื่อรักษาระดับความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าในขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยมีแผ่นฐานรองและผนังแฮมเบอร์ทำหน้าที่เป็นขั้วแอนอด ส่วนแผ่นเป้าสารเคลือบทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ปรากฏว่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดมีค่าสูงกว่าการดิสชาร์จแบบดีซี จึงทำให้การดิสชาร์จด้วยคลื่นวิทยุจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า และส่งผลให้เกิดการชนของไอออนกับเป้าสารเคลือบเพื่อทำให้เกิดกระบวนการสเปคโตริงได้มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับพลาสมาความหนาแน่นต่ำจะมีลำดับการแตกตัวเป็นไอออน (Degree Of Ionization) น้อยมาก ประมาณอนุภาคที่มีประจุหนึ่งตัวต่ออะตอมที่เป็นกลางหรือโมเลกุลสลับตัว เพื่อรักษาสภาพการเกิดพลาสมาให้คงอยู่กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน และกระบวนการรวมตัว (Recombination) จะต้องมีความสมดุลกัน ดังนั้นจึงต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกมาช่วยกระตุ้นทำให้เกิดพลาสมาขึ้น ในทางปฏิบัติจะใช้สนามไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานซึ่งสามารถทำให้อนุภาคที่มีประจุเท่านั้นเกิดการเคลื่อนที่ได้

### 2.2.3 แมกนีตรอน

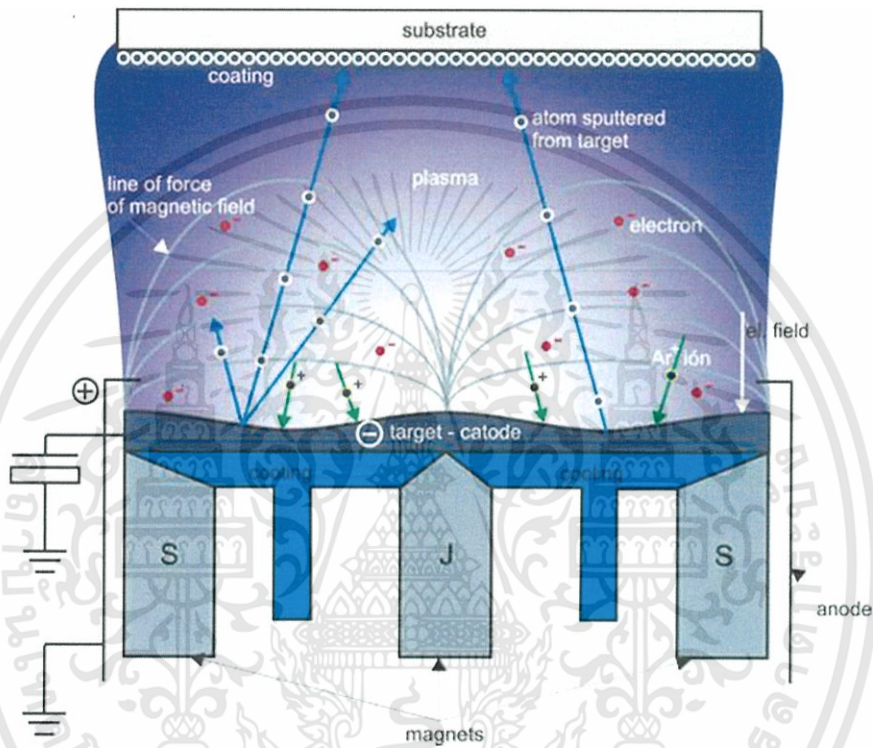
ในปี ค.ศ. 1936 เพนนิ่ง (Penning) ได้แนะนำการเพิ่มเส้นทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยการสร้างสนามแม่เหล็กบนหน้าเป้าสเปคโตริง และถูกเรียกว่า ระบบแมกนีตรอนสเปคโตริง (Magnetron Sputtering System) ในปี ค.ศ. 1967 ต้นแบบของระบบแมกนีตรอนสเปคโตริงแบบระนาบสร้างขึ้นโดย วาซา (Wasa) และเชปอิน (Chapin) ได้ปรับปรุงระบบนี้อีกครั้ง สนามแม่เหล็กได้จากการเสริมคอยล์แม่เหล็กหรือแม่เหล็กถาวรเข้าไป เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขนานกับหน้าเป่า การมีสนามแม่เหล็กทำให้เพิ่มการโคจรดิสชาร์จ สาเหตุเพราะทำให้อิเล็กตรอนมีเส้นทางเคลื่อนที่มากขึ้น และเป็นการเคลื่อนที่แบบเป็นเกลียว เนื่องจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน  
 $\vec{v}$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน  
 $\vec{B}$  คือ สนามแม่เหล็ก  
 $\vec{F}$  คือ แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอน

และศูนย์กลางของการลอยเลื่อนแบบวงโคจรอยู่ในทิศ  $E \times B$  โดยมีความเร็วลอยเลื่อน  $E/B$  เมื่อ  $E$  และ  $B$  แสดงสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวางที่เพิ่มเข้ามาในการดิสชาร์จตามลำดับ สนามแม่เหล็กจัดตัวในลักษณะทำให้เส้นทางลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนเหล่านี้เป็นวงปิด ผลของการดักจับอิเล็กตรอนไว้เช่นนี้ไปเพิ่มอัตราการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลของแก๊สสเปคโตริง ในระบบแมกนีตรอนสเปคโตริง สนามแม่เหล็กทำให้เพิ่มความหนาแน่นพลาสมา ซึ่งทำให้เพิ่ม

ความหนาแน่นกระแสที่เป้าแคโทด และผลลัพท์คือ ได้อัตราการสเปตเตอริงสูงขึ้นเนื่องจากความดันปฏิบัติการต่ำกว่า ทำให้อุณหภูมิแคโทดเดินทางข้ามปริภูมิอิสระจางปราศจากการชน ซึ่งผลลัพท์คือส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวเป็นไอออน และทำให้ได้พลาสมาที่ความหนาแน่นสูงขึ้นไปด้วย ส่งผลให้กระแสไอออนในพลาสมาที่มีค่าเพิ่มขึ้นและลดศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการไอออไนซ์ต่ำลงให้อยู่ในระดับหลายร้อยโวลต์

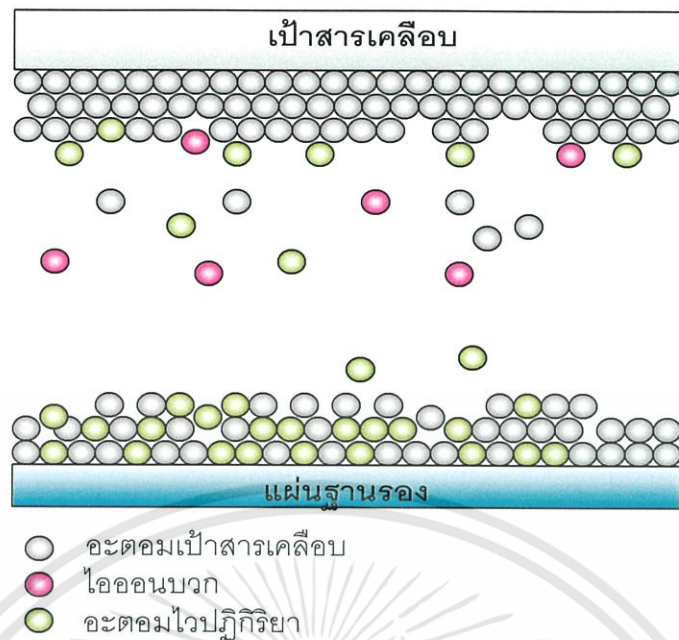


รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของแมกนีตรอนสเปตเตอริง และวงโคจรของอิเล็กตรอนภายในระบบ

#### 2.2.4 รีแอคทีฟสเปตเตอริงด้วยคลื่นวิทยุ

รีแอคทีฟสเปตเตอริง เป็นวิธีการปลูกฟิล์มที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างจากเป้าสารเคลือบ โดยการใช้ก๊าซไปทำปฏิกิริยากับวัสดุที่เป็นเป้าสารเคลือบ โดยกระบวนการเกิดขึ้นเมื่อเป้าสารเคลือบที่เป็นโลหะถูกชนด้วยอะตอมที่มีพลังงานแล้วหลุดออกมาในบรรยากาศที่ไวปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงให้เห็นการสเปตเตอริงอลูมิเนียมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจน เพื่อทำการปลูกฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ ในขณะที่อะตอมที่ถูกสเปตเตอริงแล้วเคลือบบนแผ่นฐานรอง อะตอมเหล่านั้นจะทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของก๊าซไวปฏิกิริยา ซึ่งในกรณีนี้คือก๊าซไนโตรเจน เกิดเป็นอลูมิเนียมไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กระบวนการเกิดรีแอคทีฟสปีดเตอริงของการปลูกฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ โดยอลูมิเนียมที่หลุดออกจากเป่าสารเคลือบทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเกิดเป็นอลูมิเนียมไนไตรด์

รีแอคทีฟสปีดเตอริงมีประโยชน์ที่สำคัญหลายประการเมื่อเทียบกับการสปีดเตอริง โดยใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นสารประกอบ ได้แก่

- 1) เป่าสารเคลือบที่เป็นโลหะสามารถค้ำขึ้นรูปได้ง่ายและมีราคาถูกกว่า
- 2) เป่าสารเคลือบโลหะมีสภาพนำความร้อนที่สูงกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดีกว่า ส่งผลให้สามารถจ่ายกำลังได้สูงกว่า โดยไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับการหลอมเหลวของเป่าสารเคลือบ
- 3) เมื่อปรับปรุงวิธีการสำหรับการปลูกฟิล์มให้เหมาะสมแล้ว จะได้อัตราการเกิดฟิล์มที่สูง นอกจากนี้ยังสามารถปลูกฟิล์มที่เป็นโลหะได้ด้วย
- 4) เป่าสารเคลือบโลหะชนิดเดียวสามารถปลูกฟิล์มที่เป็นสารประกอบได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับบรรยากาศและเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการปลูกฟิล์ม

### 2.3 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการของเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้ ประกอบด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer, XRD)

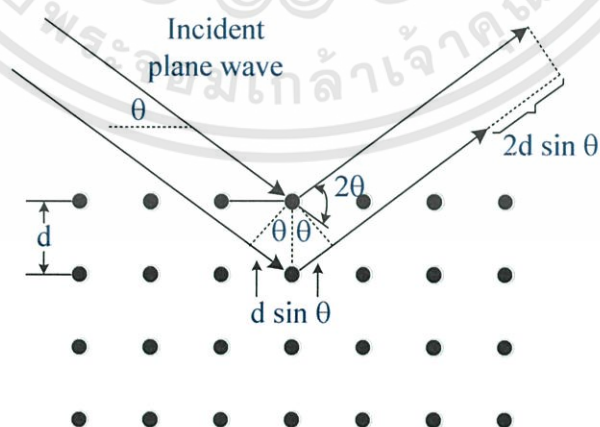
เมื่อปี ค.ศ. 1895 W.C. Rontgen ได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์ (X-rays) ซึ่งเป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่าน โครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน

วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path Different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.3)

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

(2.3)

- เมื่อ
- $n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
  - $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
  - $\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

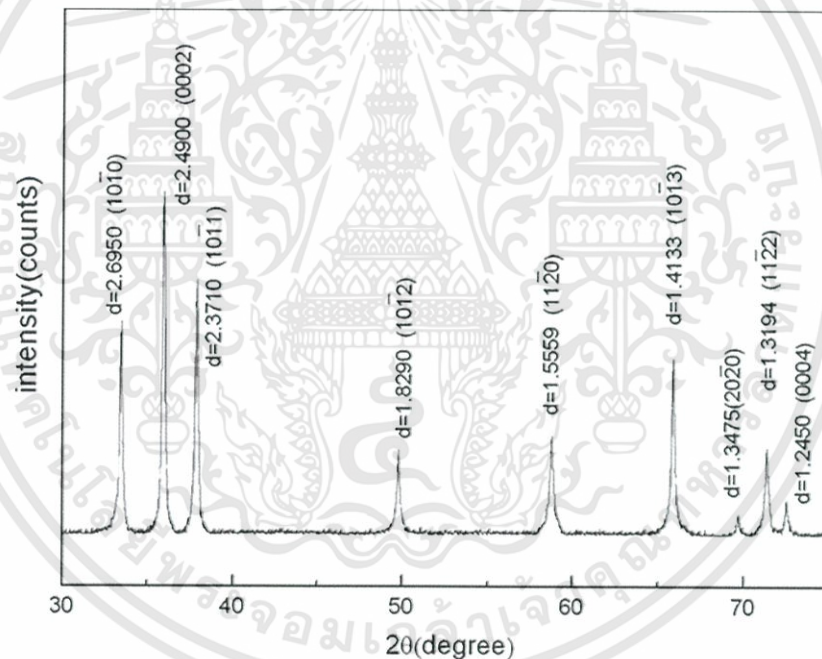


รูปที่ 2.8 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์ที่ระนาบของผลึก และให้ผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ  $2d \sin \theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg Plane) แสดงดังรูปที่ 2.8 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction Angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray Diffract Meter นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) แสดงในรูป 2.9 ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้จากพิกในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ สำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพลิอิมิดไนไตรด์

### 2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope: EM) เครื่องแรกสร้างขึ้นในปีค.ศ.1930 โดย Manfred Von Ardenne ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบโดยทั่วไประหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) มีความคล้ายคลึงกันแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีความซับซ้อนกว่ามาก และตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาต้องมีการเตรียมแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือ ตัวอย่างต้องแห้งและนำไฟฟ้า เนื่องจากระบบเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำงานในระบบสุญญากาศ และใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการกำเนิดภาพ ดังนั้นถ้าผิวของตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนตกค้างอยู่บนผิวของตัวอย่างทำให้เกิด Charging Effects ถ้าอิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนไปจากบริเวณดังกล่าวทำให้ไม่สามารถควบคุมความสว่างและไม่สามารถโฟกัสภาพได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กรอบตัวในแนวตั้งฉากในขณะกำลังเคลื่อนที่ ทำให้สามารถบังคับลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้โดยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง จากลักษณะการนำอิเล็กตรอนที่ผ่านระบบเลนส์มาใช้งาน ทำให้แบ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ 2 แบบ คือ

2.3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) ใช้ในการส่องดูภาคตัดขวางของตัวอย่าง ซึ่งผ่านการเตรียมเป็นแผ่นบางให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปตกกระทบฉากเรืองแสง (Fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสามารถบันทึกรูปถ่ายไมโครกราฟ (Micrograph) ได้โดยตรง

2.3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 - 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง โดยมีหลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron: SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) ซึ่ง SEM มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. Electron Gun เป็นส่วนที่ใช้เป็นแหล่งผลิตอิเล็กตรอน การหลุดของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่เป็นการหลุดจากความร้อน (Thermionic Emission) อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะวิ่งผ่านบริเวณศักย์ไฟฟ้าประมาณ  $10^2-10^3$  V

2. Condenser Lens เป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมความเข้มของลำอิเล็กตรอน Condenser Lens ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 2 เลนส์ เพื่อทำให้ลำอิเล็กตรอนลู่ไปสู่ชิ้นงาน

3. Objective Lens เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของกล้องจุลทรรศน์ เพราะจะทำให้เกิดภาพของชิ้นงาน Objective lens จะเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสสั้นๆ เพื่อให้วางใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดจึงจะได้รายละเอียดของชิ้นงานมากๆ

การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 1-40 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอน โดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron Lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) และเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning Coils) บนระนาบ x-y สิ่งสำคัญการทำงานของก้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่าง และกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron: SE) มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron: PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อย เพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

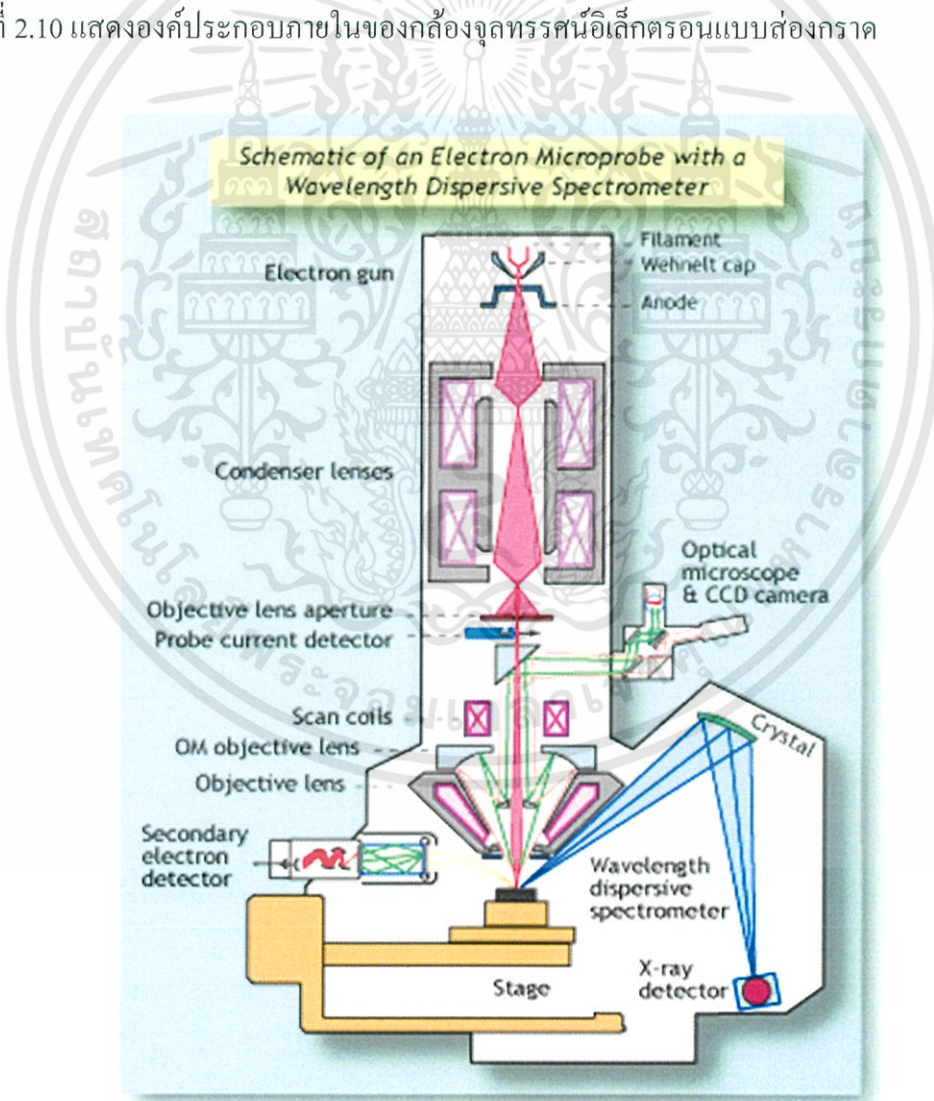
สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ Scintillator ซึ่งทำมาจาก  $\text{CaF}_2$  และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น Collector ไบแอสศักดาไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าสู่ Scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม Light Guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด Scanning Coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

ชุดของ Scanning Coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราดจากรูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



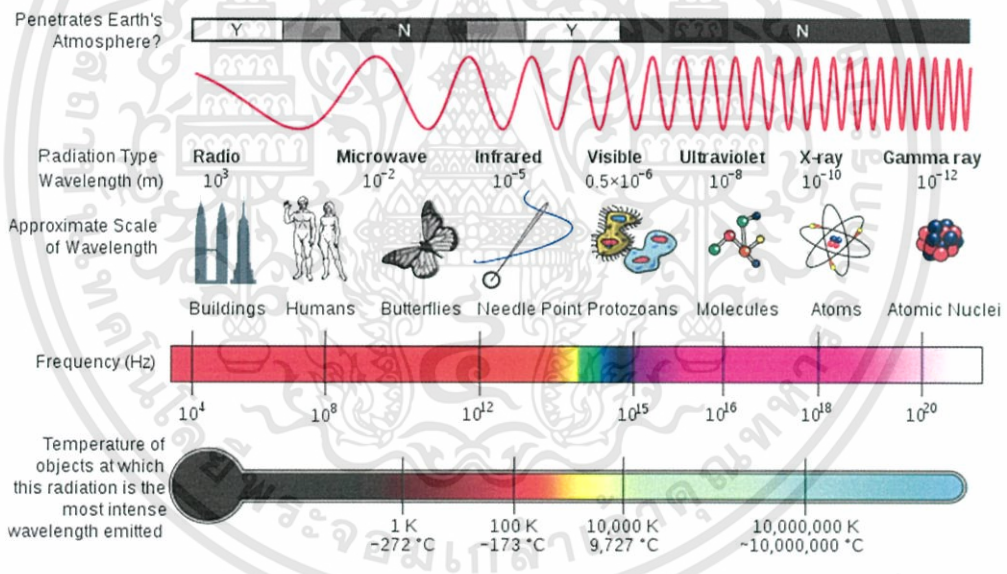
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบภายในที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง ในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

#### 2.3.3.1 UV-Vis Spectrum

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแถบสเปกตรัม ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นสั้น (รวมทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์) ไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นยาว (รวมถึงไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ) รังสียูวีและแสงขาว เป็นเพียงส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร

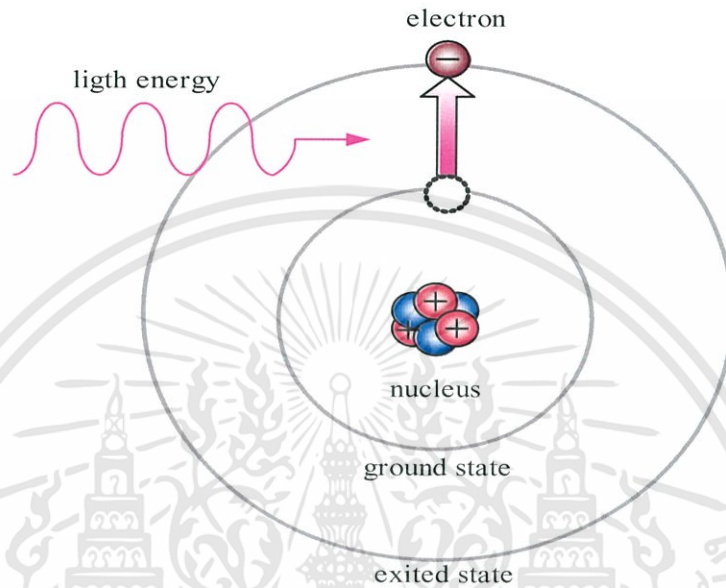


รูปที่ 2.11 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

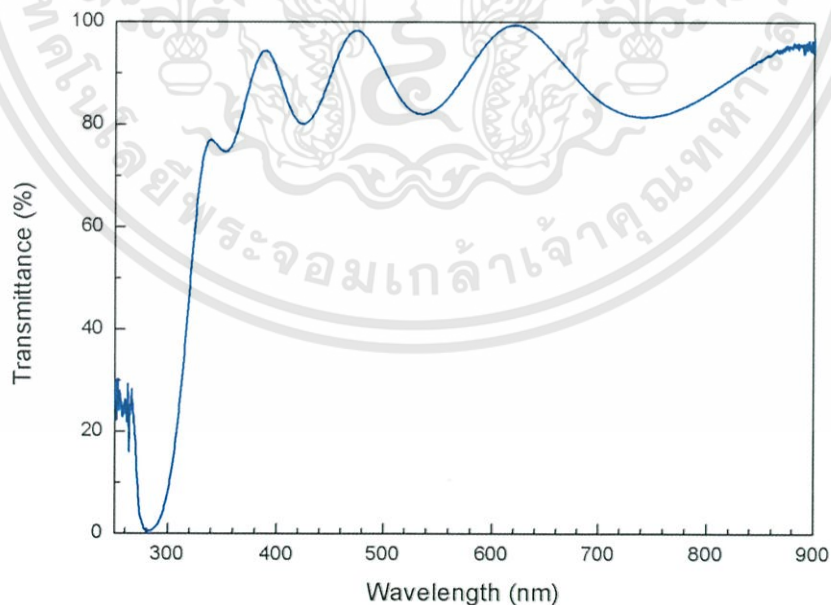
#### 2.3.3.2 UV-Vis Spectroscopy

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ได้ถูกนำไปใช้งานต่างๆ อย่างมากมาย แม้ว่าทุกวันนี้เครื่องมือที่นำเทคนิคนี้ไปใช้ จะมีความแตกต่างจากเครื่องมือตัวแรกที่มีการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก แต่เครื่องมือเหล่านี้ก็ทำงานบนหลักการพื้นฐานเดียวกัน คือ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อ โมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสง ในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer - Lambert ค่าการดูดกลืนแสงหรือค่า Absorbance ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

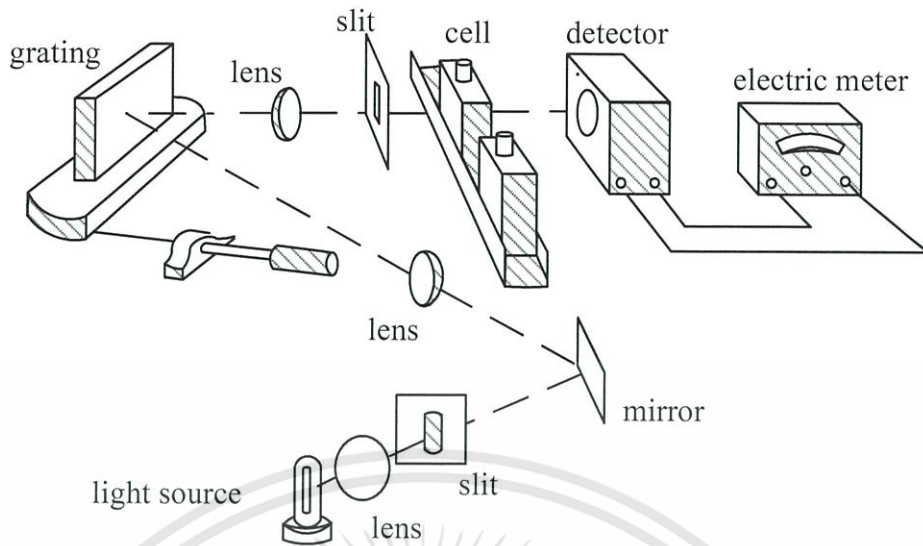


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสเปกตรัมการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการวัดตรวจสอบสารด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง Single Beam UV-Vis Spectrophotometer

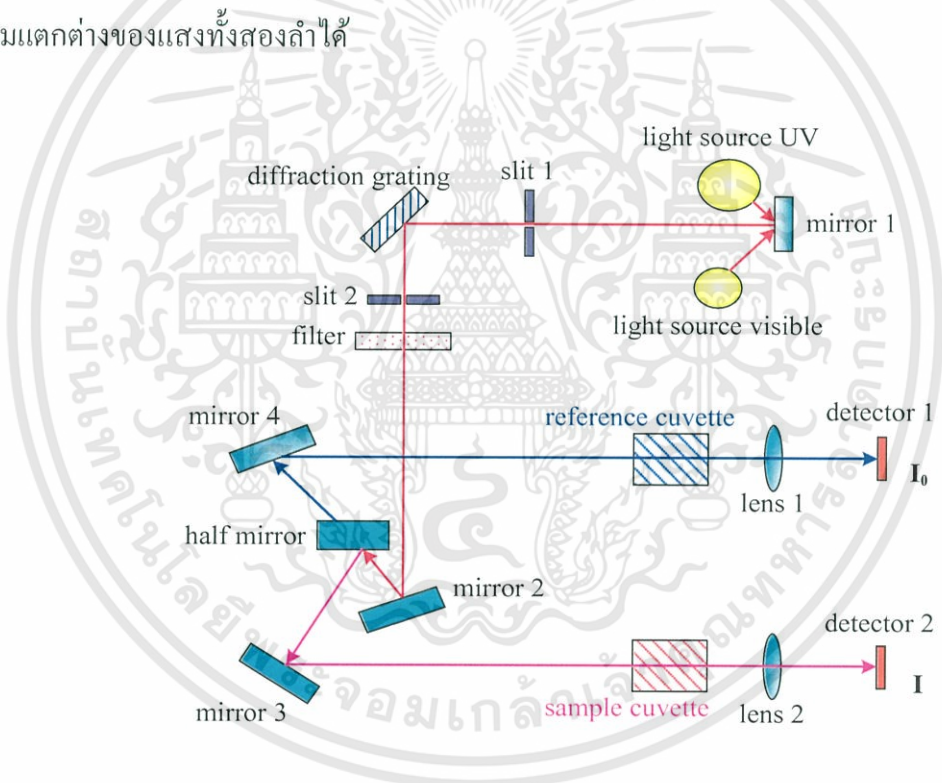
### 2.3.3.3 UV-Vis Spectrophotometer

เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่าน หรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบหลักๆที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุ สารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้คือ หลอดทังสเตนฮาโลเจน ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดคิวทีเรียม ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 นาโนเมตร แต่แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีความยาวคลื่นต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้ โมโนโครเมเตอร์เป็นตัวกระจายแสงออก เพื่อให้แสงที่จะผ่านไปยังตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแสงความยาวคลื่นค่าเดียวจะผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ (Cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายในกว้าง 1 เซนติเมตร (ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างตามกฎของ Beer - Lambert) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer บางรุ่นสามารถใช้หลอดทดลองเป็น Cuvettes ได้ แต่ Cuvettes ที่ดีที่สุดนั้นทำมาจากควอตซ์ที่มีคุณภาพสูง สำหรับ Cuvettes ที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงแสงขาวเท่านั้น เพราะแก้วและพลาสติกดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี แสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเดินทางผ่านตัวอย่างมาถึงเครื่องตรวจวัด สำหรับเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ได้แก่ PMT (Photomultiplier Tube), Diode Arrays และ CCDs (Charge Coupled Devices) เครื่องจะทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ผลของสเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟระหว่างค่า Absorbance และค่าความยาวคลื่น เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ สำหรับเครื่องแบบลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดี่ยวจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายสะดวกและมีราคาไม่แพงมากนัก

สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่ นั้นแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำก่อนที่จะไปตกลงบนตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิง ขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัว เพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสงที่มาจากตัวอย่างได้พร้อมกัน แต่ในบางรุ่น จะมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัว Beam Chopper ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้



รูปที่ 2.15 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง Double Beam UV-Vis Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ และขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพลาสติกพีอีที รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบาง โดยจะแบ่งเป็น 6 ส่วน คือ ระบบอาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง เป้าสารเคลือบและแผ่นฐานรอง การเตรียมและติดตั้งระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ และการวัดคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง

#### 3.1 ระบบอาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง

##### (RF MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM)

ส่วนประกอบของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง แบ่งเป็น 5 ส่วนคือ

- ระบบปั๊มสุญญากาศ
- อุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ
- แคมเบอร์สุญญากาศ
- ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ
- แหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

การเลือกใช้งานระบบปั๊มสุญญากาศในการสร้างระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง จะต้องมีความเหมาะสมกับขนาดของแชมเบอร์สุญญากาศ โดยต้องพิจารณาถึงอัตราการปั๊มของระบบว่าจะต้องมีค่าสูงพอที่จะรักษาระดับความดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการหรือเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป โดยในระบบสำหรับโครงการพิเศษนี้ ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศสองชนิด คือ ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion pump) และปั๊มโรตารี (Rotary pump)

ปั๊มไอฟุ้งกระจายที่ใช้สำหรับโครงการพิเศษนี้ คือรุ่นดิฟสแต็ก 160/700 (Diffstack 160/700) ของบริษัทเอ็ดวาร์ด (Edwards) มีความเร็วในการปั๊มที่ปากของปั๊ม 700 ลิตรต่อวินาที โดยสามารถทำความดันสุญญากาศได้ต่ำกว่าระดับ  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ จนถึงระดับความดันขณะทำการปลูกฟิล์ม ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยปั๊มโรตารีเป็นปั๊มสนับสนุนขณะทำการปั๊ม สำหรับปั๊มชนิดนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายก๊าซด้วยการฟุ้งของไอน้ำมันที่ถูกต้มจนเดือดกลายเป็นไอด้วยความร้อนสูง จากขดลวดความร้อนให้ฟุ้งออกจากช่องเจ็ท ที่อยู่ภายในตัวปั๊มเข้าชนกับผนังภายในปั๊มที่มีระบบน้ำหล่อเย็นอยู่รอบนอกของตัวปั๊ม ทำให้โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซภายในแชมเบอร์สุญญากาศเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง และรวมกันอยู่บริเวณด้านล่างของปั๊มและถูกดูดออกไปด้วยปั๊มโรตารีในที่สุด



รูปที่ 3.2 ปั๊มไอฟุ้งกระจายรุ่น Diffstack 160/700 ของบริษัท Edwards

ปั๊มโรตารี ในโครงการพิเศษนี้ระบบที่สร้างขึ้นได้เลือกใช้ปั๊มโรตารีของเอ็ดวาร์ดรุ่น อาร์วี 12 (Edward RV12) ทำหน้าที่สร้างสุญญากาศขั้นต้นให้กับแชมเบอร์สุญญากาศ โดยปั๊มชนิดนี้มีความสามารถในการสร้างสุญญากาศได้ตั้งแต่ระดับความดันบรรยากาศลงไปถึงความดันระดับ  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ และเป็นปั๊มซึ่งอาศัยหลักการอย่างง่ายโดยการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ซึ่งอยู่ภายในปั๊ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกลไกหลักในการขับอากาศออกจากแชมเบอร์สุญญากาศ ซึ่งบางครั้งจะเรียกปั๊มชนิดนี้ตามลักษณะการทำงานว่า ปั๊มกล



รูปที่ 3.3 ปั๊มโรตารี Edward RV12

### 3.1.2 อุปกรณ์วัดและแสดงผลความดัน

ในการแสดงความดันของระบบสุญญากาศ จะใช้หัววัดความดันของบริษัทเอดวาร์ด 2 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีย่านการวัดที่แตกต่างกัน คือ หัววัดพิรานี (Pirani gauge) สำหรับวัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศจนถึงไม่ต่ำกว่า  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ และหัววัดชนิดเพนนิ่ง (Penning gauge) สำหรับวัดความดันในช่วง  $10^{-3}$ - $10^{-7}$  มิลลิบาร์ โดยในระบบสุญญากาศที่ได้สร้างขึ้นนี้ จะใช้หัววัดพิรานี 2 ตัว และ หัววัดเพนนิ่ง 1 ตัว และต่อเข้ากับตัวแสดงผล Active gauge controller ของบริษัทเอดวาร์ด



รูปที่ 3.4 (a) หัววัดความดันชนิดเพนนิ่งและชนิดพิรานี

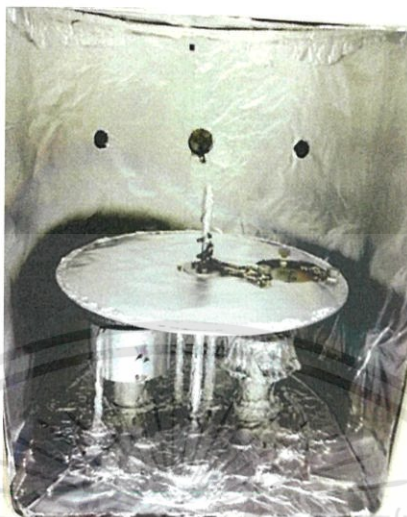
(b) ตัวแสดงผล Active gauge controller ของบริษัท Edward

### 3.1.3 แชมเบอร์สุญญากาศ

ทำมาจากเหล็กกล้ากันสนิม (Stainless steel) สามารถทนความดันได้ต่ำกว่า  $10^{-6}$  มิลลิบาร์ ภายในทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ปลุกฟิล์มบาง ซึ่งประกอบด้วย หัวแมกนีตรอนสเป็คเตอรिंग

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Magnetron sputtering head) สำหรับวางเป้าสารเคลือบขนาด 3 นิ้ว อุปกรณ์จับยึดแผ่นฐานรอง (Substrate holder) อุปกรณ์เปิด-ปิดเป้าสารเคลือบ (Shutter) และท่อส่งก๊าซเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบภายในแชมเบอร์สุญญากาศ

### 3.1.4 ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ

ในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง การควบคุมปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าสู่ระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมความดันภายในระบบ และกำหนดเงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางในแต่ละครั้ง ในโครงการพิเศษนี้ใช้ก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) ควบคุมการไหลของก๊าซด้วย Mass flow controller รุ่น SIERRA 810C ของบริษัท Sierra instrument



### 3.1.5 แหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุ

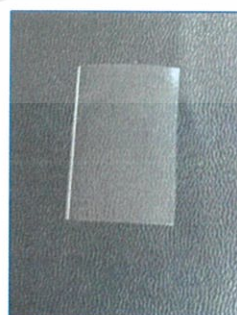


รูปที่ 3.7 เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุขนาดกำลังสูงสุด 650 วัตต์และอุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์อัตโนมัติ

แหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้กับระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงของโรงงานพิเศษนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ BROULEY: รุ่น BE-1113 ซึ่งกำเนิดคลื่นความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ตต์ กำลังสูงสุด 650 วัตต์ และอุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์อัตโนมัติรุ่น TRAZAR: AMUSC-1

### 3.2 แผ่นฐานรองและเป้าสารเคลือบ

ในโครงการพิเศษการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์โดยวิธีแอททีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงใช้แผ่นฐานรองเป็นพลาสติกพีอีที (Polyethylene Terephthalate) เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% (Kurt J. Lesker) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา ¼ นิ้ว



รูปที่ 3.8 เป้าสารเคลือบอลูมิเนียม Kurt J. Lesker ความบริสุทธิ์ 99.99% และ แผ่นฐานรองพลาสติก PET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมแผ่นฐานรอง

ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นฐานรองพลาสติกพีอีที จำเป็นจะต้องทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นฐานรองก่อน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นฐานรองโดยมีกระบวนการดังนี้

#### กระบวนการทำความสะอาดแผ่นพลาสติกพีอีที

- 1) ทำการล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดกราบไชนัน
- 2) ล้างด้วยน้ำกลั่นในอ่างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 20 นาที
- 3) ล้างด้วยเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 20 นาที
- 4) ล้างด้วยไอโซโพรพานอลในอ่างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 20 นาที
- 5) เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง
- 6) อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ประมาณ 30 นาที

### 3.4 การเตรียมและติดตั้งระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง

ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ ในโครงการพิเศษนี้ เป็นระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาใช้เองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการทำความสะอาด ซ่อมแซมและบำรุงรักษาก่อนทำการเปิดระบบใช้งาน ซึ่งมีขั้นตอนและกระบวนการดังนี้

#### 3.4.1 ทำความสะอาดและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบสุญญากาศ

เริ่มต้นกระบวนการเตรียมระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงโดยการนำชิ้นส่วนต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศออกมาขัดทำความสะอาดกราบฟิล์มที่ติดอยู่ในระบบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนและความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มบางที่จะทำการปลูก โดยเริ่มจากการถอดอุปกรณ์ต่างๆ ออกจากแชมเบอร์สุญญากาศ มีอุปกรณ์และกระบวนการทำความสะอาดของอุปกรณ์แต่ละชิ้นมีดังนี้

- 1) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้
  - ไชควง, ประแจเบอร์ 14 -17 และ Hex Keys ขนาดต่างๆ
  - ถุงมือยางและผ้าไร้ฝุ่นที่ใช้กับระบบสุญญากาศ ( ถุงมือยาง MAPA™ Solo Ultra 997™ และผ้าไร้ฝุ่น MULTICLEAN CLEANROOM WIPER HANSONG)

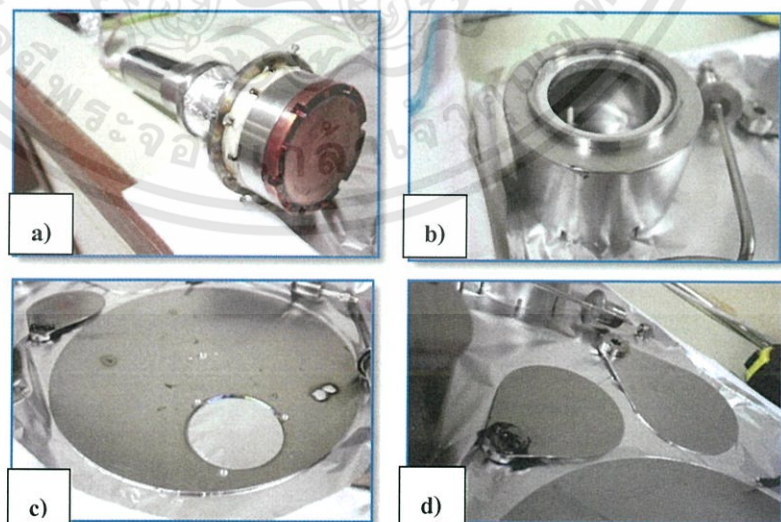
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อลูมิเนียมฟอยล์ TOPS ALUMINUM FOIL
- กรรไกร คัตเตอร์ คีมคีบ และคีมตัด
- หัวแร้ง เครื่องเป่าลมร้อน ตะกั่วและน้ำยาประสานสำหรับบัดกรี (Flux )
- น้ำยาล้างทำความสะอาด โซดาไฟ (SODIUM HYDROXIDE)และกระดาษทราย
- ไขกรองและน้ำมันปั๊มโรตารี (Edwards Filter Oil Element EMF10 A22304198 and Edwards Ultra Grade 19Vacuum Pump Oil)
- น้ำมันปั๊มไอฟุ้งกระจาย( DOW CORNING® 704 diffusion pump)
- Acetone, Methanol, Deionized water และ Isopropanol



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำทำความสะอาดและเตรียมระบบสุญญากาศ

2) ถอดอุปกรณ์ในแชมเบอร์สุญญากาศออก เพื่อเตรียมทำความสะอาด



รูปที่ 3.10 (a) หัวแมกนีตรอน (b) Ground Shield (c) แผ่นจับยึดแผ่นฐานรอง (d) ชัตเตอร์ (อุปกรณ์เปิด-ปิดเป่าสารเคลือบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) จัดกราบฟิล์มที่ติดบน Ground Shieldหัวแมกนีตรอน ชัตเตอร์ อุปกรณ์จับยึดฐานรอง และท่อส่งก๊าซ ด้วยกระดาษทรายหรือแซนโฆเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อขจัดกราบฟิล์มออก
- 4) ล้างน็อด และสกรูด้วยอะซีโตนในอ่างอัลตราโซนิก 20 นาที แล้วล้างด้วยเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิกอีก 20 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์
- 5) ล้างเป่าสารเคลือบด้วยน้ำยาขจัดกราบไขมัน, Deionization water, อะซีโตน และเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิก อย่างละ 30 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์
- 6) เช็ดทำความสะอาดแชมเบอร์สุญญากาศด้วยผ้าไร้ฝุ่นชุบอะซีโตน และเช็ดด้วยเมทานอลอีกครั้ง เพื่อขจัดกราบไขมันที่อาจติดอยู่ตามผนังแชมเบอร์



รูปที่ 3.11 แชมเบอร์สุญญากาศที่ติดอลูมิเนียมฟอยล์

- 7) ติดอลูมิเนียมฟอยล์ในแชมเบอร์สุญญากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มไปติดที่ผนังแชมเบอร์โดยตรง
- 8) ห่ออุปกรณ์ทุกชิ้นที่อยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในแชมเบอร์สุญญากาศให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ห่อฟอยล์อลูมิเนียมและติดตั้งในแชมเบอร์สุญญากาศเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ภายในแอมเบอร์สุญญากาศ

#### 3.4.2 สร้างระบบควบคุมก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุ

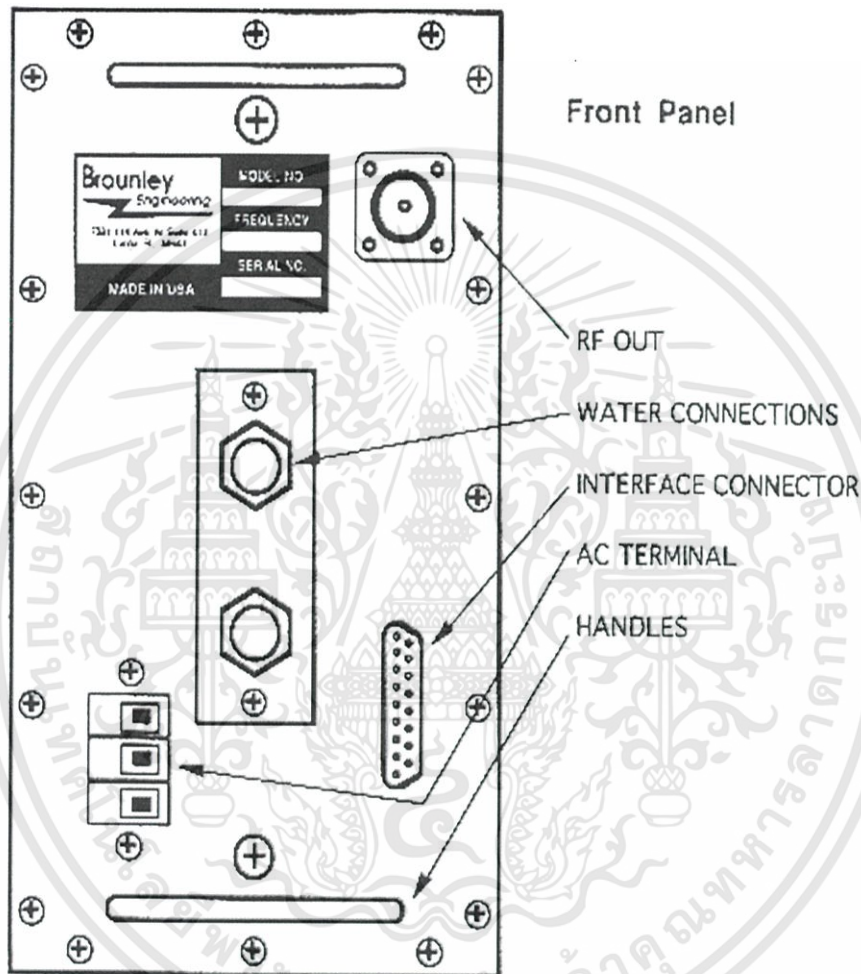
การปลูกฟิล์มบางโดยวิธีรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง เป็นระบบที่ต้องมีการป้อนก๊าซเข้าไปในระบบขณะทำการปลูกฟิล์ม ในระบบจึงจำเป็นต้องมีส่วนทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซเข้าสู่แอมเบอร์สุญญากาศ ( Mass Flow Control ) โดยในโครงการพิเศษนี้ได้สร้างกล่องควบคุมและเปิดปิดการจ่ายก๊าซและกำลังคลื่นอาร์เอฟซึ่งภายในกล่องประกอบด้วย Switching power supply, ส่วนควบคุม Gas flow control, ส่วนควบคุม RF power control, ส่วนแสดงผล และ ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.14 กล่องควบคุมและเปิดปิดการจ่ายก๊าซและกำลังคลื่นอาร์เอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุสามารถทำได้โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าควบคุมผ่านพอร์ตแบบดีบี 25 ซึ่งมีรายละเอียดการเชื่อมต่อแสดงในรูปที่ 3.15 ในเบื้องต้นได้สร้างอุปกรณ์ควบคุมโดยการปรับศักย์ไฟฟ้าผ่านวงจรแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ และแสดงผลผ่าน V27D-T1 Digital LED Voltmeter

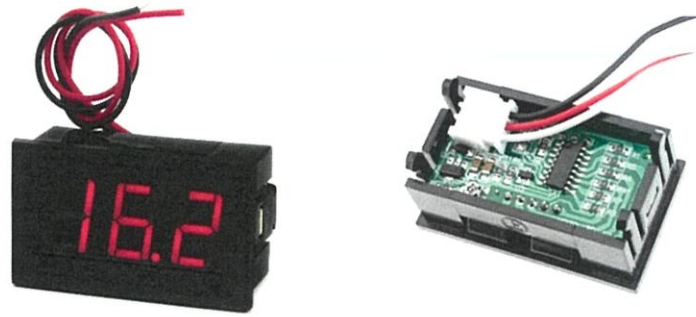


25 pin submin. D connector Function

- 1 +15V - limited to 25mA max.  $R_L = 600\Omega$  min.
- 2 REFL. PWR. Voltage level depends on VSWR:  $V_r + 1/1 - \frac{V_r}{V_i}$  Load Impedance =  $10K\Omega$  min.
- 3 FWD PWR. 0-5V Load Impedance =  $10K\Omega$  min.
- 4 D.C.P.S. ENABLE +5V "on", 0V "off" into  $10K\Omega$
- 5 POWER CONTROL 0-5V  $R_L = 10K\Omega$
- 6 GROUND
- 7 SPARE
- 8 SPARE
- 9 SPARE
- 10 SPARE
- 11 SPARE
- 12 GROUND

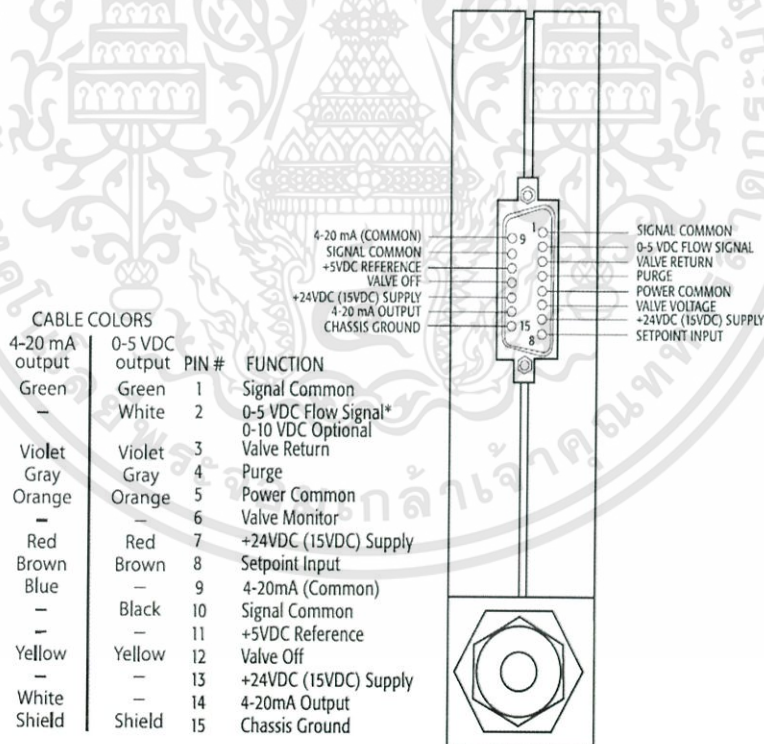
รูปที่ 3.15 รายละเอียดการเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุของบริษัทบราวด์เลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 V27D-T1 Digital LED Voltmeter

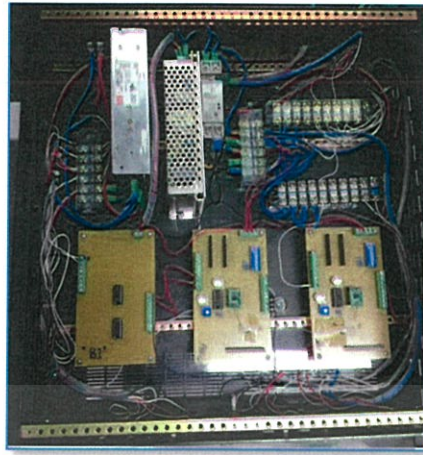
สำหรับส่วนควบคุมการจ่ายก๊าซใช้ตัวควบคุมอัตราการไหลของบริษัท Sierra Instruments รุ่น Sierra 810 ขนาด 100 sccm สำหรับก๊าซอาร์กอน และขนาด 50 sccm สำหรับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของก๊าซได้ เมื่อป้อนแรงดันไฟเลี้ยงให้ โดยทำการปรับระดับแรงดันควบคุมและแสดงอัตราการไหลเป็นแรงดันไฟฟ้า ผ่านทางพอร์ตเชื่อมต่อแบบดีบี 15 ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.17



Note: Pins 1, 3, 5, 9 and 10 are all tied together internally. However it is highly recommended that at least one "signal common", one "power common" and the "valve return" pins be connected to the power supply common via separate wires, so that no ground loops are introduced, (especially on cables longer than ten feet)

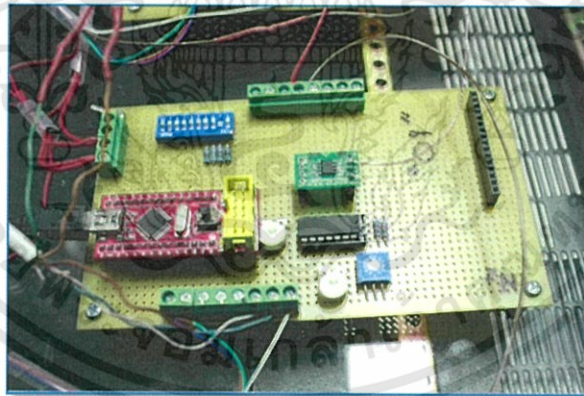
รูปที่ 3.17 รายละเอียดการเชื่อมต่อของคอนเนกเตอร์แบบดีบี 15 ของหัวควบคุมอัตราการไหลรุ่น Sierra 810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 อุปกรณ์ภายในกล่องควบคุมและเปิดปิดการจ่ายก๊าซและกำลังคลื่นอาร์เอฟ

ภายในกล่องตามรูปที่ 3.19 จะเห็นว่ามี Switching Power Supply+24VDC 1 ตัวสำหรับป้อนไฟเลี้ยงให้กับเครื่องควบคุมอัตราการไหลรุ่น Sierra 810 และ +5VDC อีก 2 ตัว สำหรับจ่ายแรงดันให้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและกำลังแหล่งกำเนิดสัญญาณอาร์เอฟ และมีบอร์ดสำหรับวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและจ่ายกำลังสัญญาณอาร์เอฟด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ( ET-EAZY168 STAMP ของบริษัท อีทีที จำกัด) ซึ่งทำขึ้นเพื่อรองรับการพัฒนาต่อไป



รูปที่ 3.19 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EAZY168 STAMP ของบริษัท อีทีที จำกัด

### 3.5 การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริงมี หลังจากที่ได้ทำความสะอาดแผ่นฐานรองแล้ว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มจากการติดตั้งแผ่นฐานรองบนแผ่นยึดจับแผ่นฐานรอง ซึ่งอยู่ภายในแชมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุญญากาศ จากนั้นเปิดปั๊มสุญญากาศ ทำการลดความดันภายในระบบให้อยู่ในระดับ  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ เพื่อที่จะให้พร้อมสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

- 2) เมื่อได้ความดันที่พร้อมต่อการปลูกฟิล์มบางแล้ว ให้ทำการป้อนก๊าซอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์สูงเข้าไปในระบบ 60 sccm (ให้สังเกตความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศ ควรจะประมาณ  $2.7 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์) จากนั้นเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุกำลัง 250 วัตต์ แล้วลดปริมาณการป้อนก๊าซอาร์กอนลงให้เป็น 20 sccm
- 3) ทำการ Pre-Sputter ซึ่งก่อนการปลูกฟิล์มบางทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นเป่าสารเคลือบด้วยพลาสมาของอาร์กอนที่กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 250 วัตต์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะช่วยกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นเป่าสารเคลือบให้หลุดออกไป เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของออกไซด์ขณะปลูกฟิล์ม โดยกระบวนการทำความสะอาดนี้ จะใช้ระยะเวลาประมาณ 20 นาทีและจะต้องทำการปิดชัตเตอร์เพื่อป้องกันแผ่นฐานรอง จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยการเปิดชัตเตอร์ ภายใต้บรรยากาศผสมระหว่างก๊าซอาร์กอน ความบริสุทธิ์สูง (99.999%) และก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) ซึ่งจะทำให้อลูมิเนียมที่หลุดออกจากแผ่นฐานรองทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนแล้วเกิดเป็นฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบที่แผ่นฐานรองพลาสติกพีอีทีในที่สุด

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์สำหรับการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มนั้น

กระทำภายใต้เงื่อนไข ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ใน โรงงานพิเศษนี้

เป่าสารเคลือบ	อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% ขนาด 3 นิ้ว
แผ่นฐานรอง	พลาสติกพีอีที
ระยะระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรอง	80 มิลลิเมตร
ความดันก่อนทำการปลูกฟิล์ม	$5 \times 10^{-6}$ มิลลิบาร์
ความดันก่อนเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	$2.7 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์
กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	250 วัตต์
ความดันขณะทำการปลูกฟิล์ม	ประมาณ $2.2 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์
อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซ	20% 40% 60% 80% และ 100%
อาร์กอน ( $N_2/N_2+Ar$ ) $\times 100\%$	
ระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม	45 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การวัดคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง

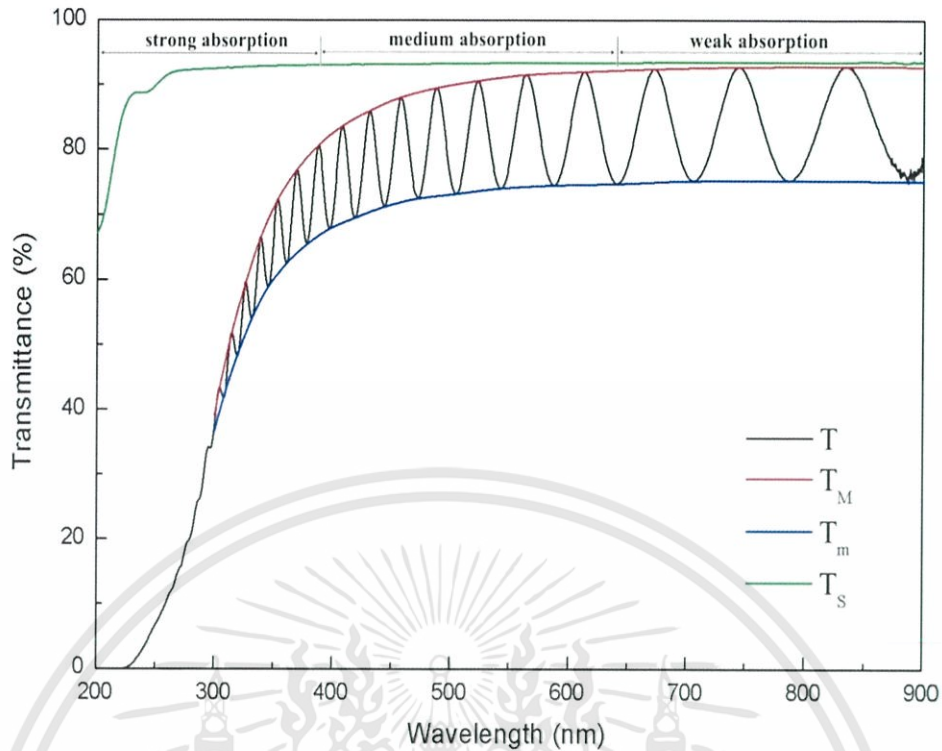
การตรวจวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ในโครงการพิเศษนี้ทำได้โดยการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000 แสดงในรูปแบบที่ 3.20 ซึ่งทำการตรวจสอบในช่วงความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตร จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบาง สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความหนา ดัชนีหักเหของแสง สำหรับฟิล์มบางได้ด้วยวิธีสเวนนิโพล (Swanepoel) ได้อีกด้วย



รูปที่ 3.20 ระบบการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000

สเวนนิโพลได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาค่าความหนาและดัชนีหักเหของฟิล์มบางโดยการใช้อินโฟรมสเปกตรัมการส่องผ่าน โดยแบ่งช่วงการดูดกลืนแสงออกเป็นสามระดับคือ การดูดกลืนระดับต่ำ (weak absorption) การดูดกลืนระดับกลาง (medium absorption) และการดูดกลืนระดับสูง (strong absorption) ดังแสดงในรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ระดับการดูดกลืนแสงพิจารณาจากสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ เส้นกราฟที่ได้จากค่าสูงสุดและต่ำสุดของรีฟลักทีวิตีและสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง

จากสเปกตรัมการส่องผ่านที่มีรีฟลักทีวิตี สามารถหาค่าจุดสูงสุดต่ำสุดของรีฟลักทีวิตีที่ปรากฏในสเปกตรัม และนำไปสร้างกราฟจากค่าสูงสุด ( $T_M$ ) และกราฟจากค่าต่ำสุด ( $T_m$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.21 และสำหรับค่า ( $T_M$ ) ที่จุดสูงสุดใดๆ สามารถหาค่า ( $T_m$ ) ที่ความยาวคลื่นเดียวกันได้ ในทำนองเดียวกันสำหรับค่า ( $T_m$ ) ที่จุดต่ำสุดใดๆ ก็สามารถหาค่า ( $T_M$ ) ที่ความยาวคลื่นเดียวกันได้เช่นกัน ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีหักเหที่เป็นค่าประมาณ ( $n_I$ ) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.1) และ  $N_I$  หาได้จากสมการที่ (3.2)

$$n_I = \sqrt{N_I + (N_I^2 - s^2)^{1/2}} \quad (3.1)$$

$$N_I = 2s \times \frac{T_M T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $s$  คือ ดัชนีหักเหของแผ่นฐานรองซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง  $T_s$  โดยอาศัยสมการที่ (3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s = \frac{1}{T_s} + \left( \frac{1}{T_s^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ สเปกตรัมการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นใดๆ ของแผ่นฐานรอง

ในเบื้องต้นดัชนีหักเห ( $n_1$ ) ที่คำนวณหาได้จากสมการที่ (3.1) สามารถนำมาคำนวณเพื่อปรับค่าใหม่ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องขึ้น หลังจากได้ค่าความหนาของฟิล์ม ( $d$ ) ซึ่งความหนาดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_{e2} - \lambda_2 n_{e1})} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\lambda_1, \lambda_2$  คือ ความยาวคลื่นที่จุดต่ำสุดหรือจุดสูงสุด 2 จุดใดๆ ที่อยู่ใกล้กัน  
 $n_{e1}, n_{e2}$  คือ ดัชนีหักเหที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นข้างต้น

โดยค่าความหนาที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.4) จะสอดคล้องเฉพาะบริเวณที่มีการดูดคลื่นระดับกลางและระดับต่ำเท่านั้น จากความหนาที่ได้ในสองช่วงดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{d}_1$ ) และนำไปคำนวณกลับเพื่อหาค่าลำดับการแทรกสอด ( $m_o$ ) ที่ความยาวคลื่นใดๆ จากสมการที่ (3.5)

$$2nd = m\lambda \quad (3.5)$$

สำหรับค่า  $m_o$  ที่ได้ จะต้องปรับให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มและครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มทีใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่าลำดับการแทรกสอดที่ถูกต้อง ( $m$ ) จากนั้นจึงนำค่าที่ปรับความถูกต้องแล้วไปคำนวณหาความหนา ( $d_2$ ) และหาความหนาเฉลี่ย ( $\bar{d}_2$ ) ออกมา ซึ่งก็คือความหนาของฟิล์มบางที่คำนวณได้ด้วยวิธีนี้

จากค่าความหนาของฟิล์มบางที่คำนวณได้ค่าสุดท้ายและค่าลำดับการแทรกสอดที่ปรับค่าแล้วสามารถนำไปคำนวณกลับเพื่อหาค่าดัชนีหักเหที่ถูกต้องได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.5) โดยค่าดัชนีหักเหที่ได้ดังกล่าวจะมีค่าอยู่ในช่วงการดูดคลื่นในระดับต่ำและระดับกลางเท่านั้น

สำหรับบริเวณที่มีการดูดคลื่นแสงในระดับสูงนั้น สามารถหาค่าดัชนีหักเหได้จาก Cauchy dispersion ดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับกำลังสองของความยาวคลื่นเพื่อหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ซึ่งเมื่อได้ค่าดังกล่าวแล้วก็สามารถคำนวณหาดัชนีหักเหที่ทุกค่าความยาวคลื่นได้ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าดัชนีหักเหในช่วงที่มีการดูดกลืนในระดับต่ำได้

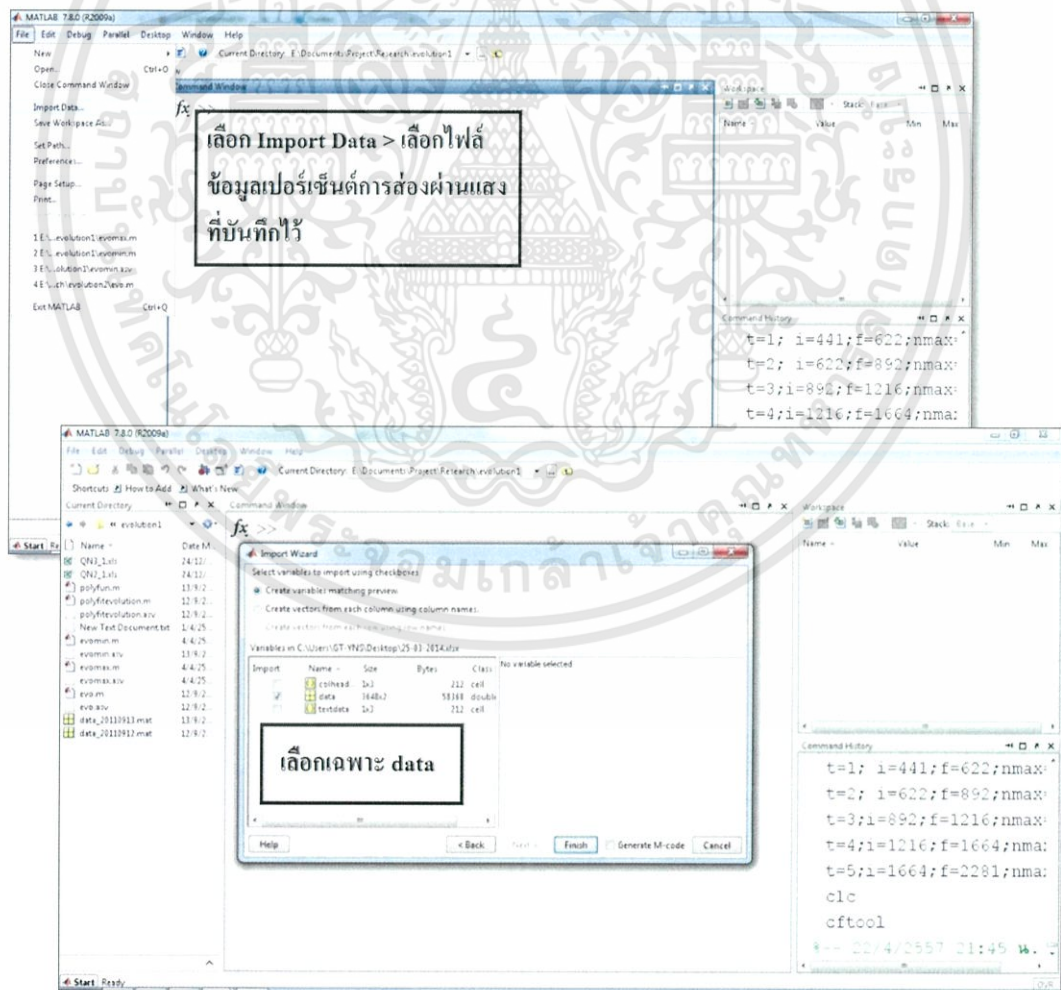
### ตัวอย่างการคำนวณค่าความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีสเวนนิโพล

1. เริ่มจากการเตรียมข้อมูลที่จะใช้ในการวิเคราะห์โดยหา  $T_m$  และ  $T_M$  จากการสร้างกราฟและจัดการข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB R2009

1.1 เตรียมข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางบันทึกข้อมูลในโปรแกรม Microsoft Excel

1.2 เรียกใช้โปรแกรม MATLAB (เวอร์ชัน R2009)

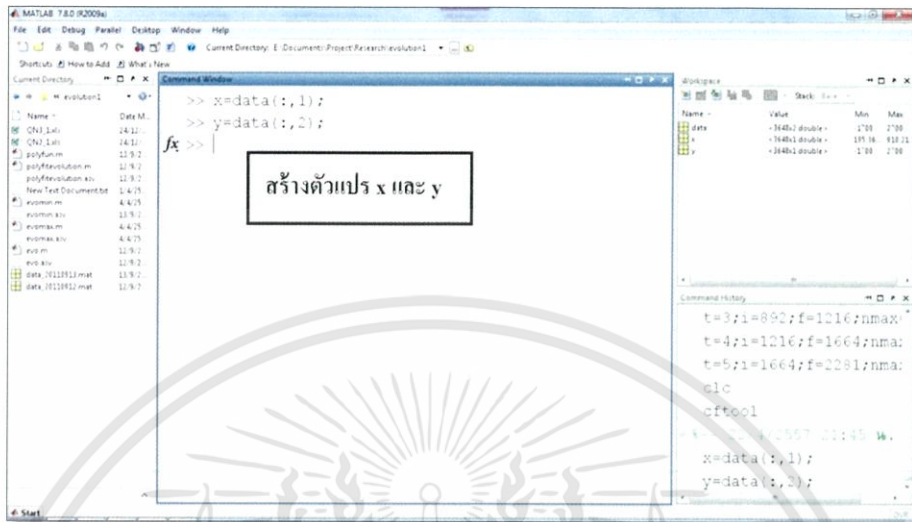
1.3 นำข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางมาเก็บไว้ใน Workspace (โดยมีขั้นตอนตามรูปที่ 3.22)



รูปที่ 3.22 การนำข้อมูลเข้ามาเก็บไว้ใน Workspace

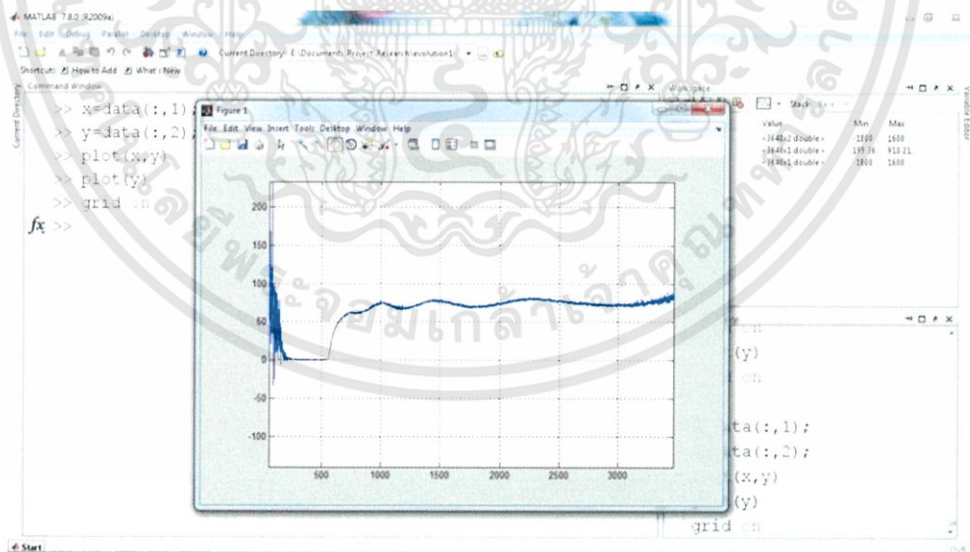
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สร้างตัวแปร  $x$  และ  $y$  โดยกำหนดให้ค่าความยาวคลื่นแสงเป็น  $x$ , เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเป็น  $y$  ตามรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การกำหนดตัวแปรในโปรแกรม MATLAB

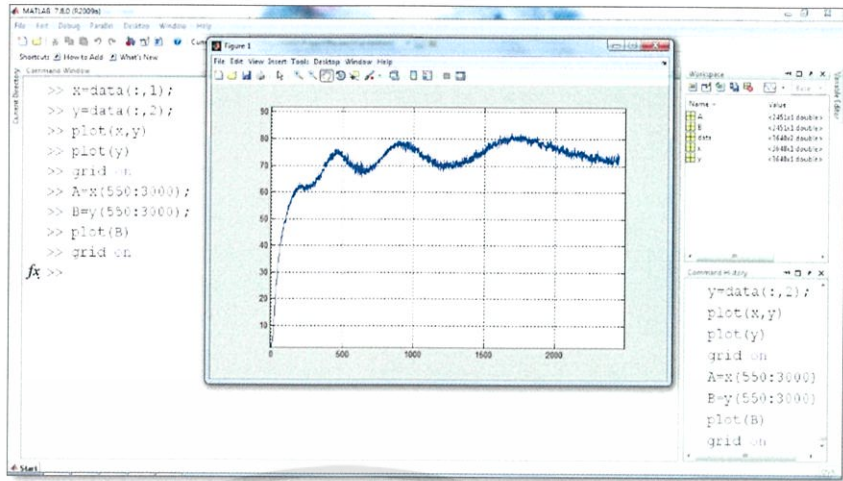
1.5 เมื่อกำหนดตัวแปร  $x$  และ  $y$  เรียบร้อยแล้ว ใช้คำสั่งสร้างกราฟ  $xy$  เพื่อหาขอบเขตของระดับการดูดกลืนแสงโดยมีขั้นตอนตามรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การใช้คำสั่งเขียนกราฟในโปรแกรม MATLAB

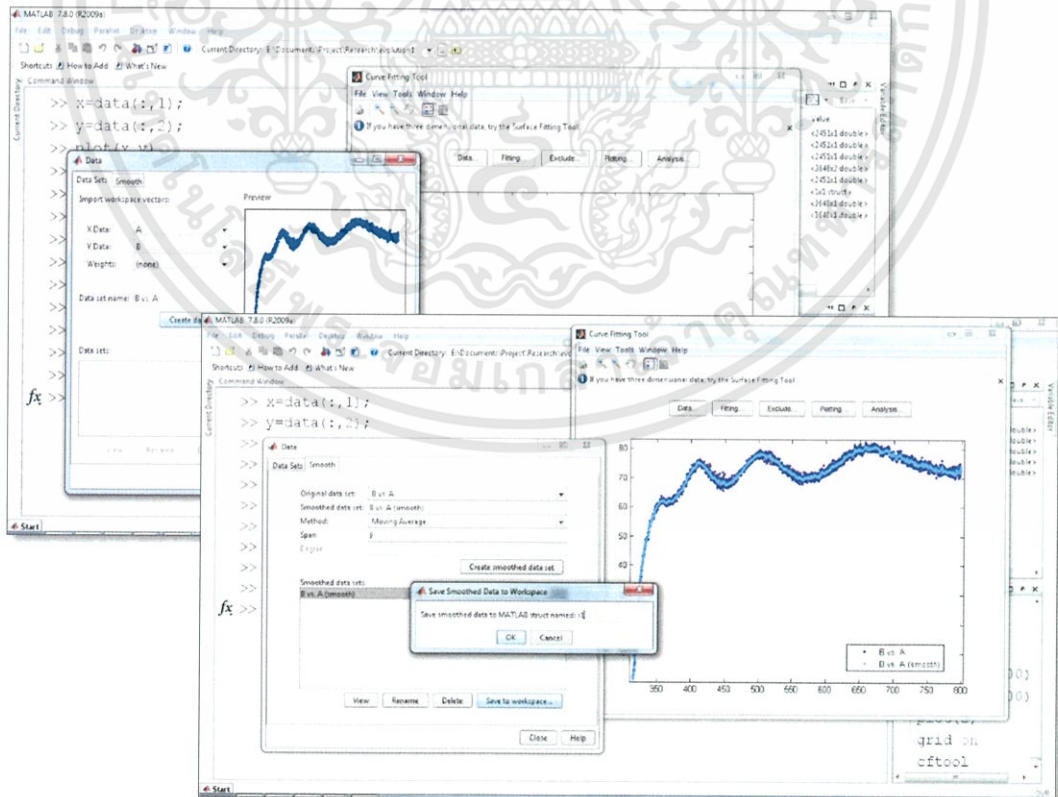
1.6 เลือกช่วงที่สเปกตรัมการส่องผ่านมีรีวกการแทรกสอด (ทำการตัดแกนกราฟ เลือกเฉพาะช่วงที่มีรีวกการแทรกสอด) เพื่อที่จะทำการหาค่าจุดสูงสุดต่ำสุดของรีวกการแทรกสอดที่ปรากฏในสเปกตรัมการส่องผ่านของแสงตามรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 การสร้างกราฟความยาวคลื่นแสงและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉพาะช่วงที่มีรีวิการแทรกสอด

- 1.7 สร้างตัวแปร A และ B โดยที่ A คือข้อมูลความยาวคลื่นในแกน x และ B คือข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางในแกน y จากนั้นเรียกใช้คำสั่ง cftool เพื่อทำการ smooth graph แล้วให้บันทึก smoothed data เป็น s1 แล้วเก็บค่า x และ y ใน s1 เป็น lamda และ T100 ใน workspace มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการ smooth graph ของกราฟ BvsA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.8 หาจุดต่ำสุดของรีวการแทรกสอดตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.27

เลือก Current Directory เป็นโฟลเดอร์ที่จัดเก็บไฟล์ evomin.m จากนั้นเปิด evomin.m ขึ้นมา

กำหนดตัวแปร  
 i - ลำดับของรีวการแทรกสอด;  
 i - ตำแหน่งเริ่มต้นของจุดต่ำสุดของรีวการแทรกสอดลำดับที่ i (ในแกน x);  
 f - ตำแหน่งสุดท้ายของจุดต่ำสุดของรีวการแทรกสอดลำดับที่ i (ในแกน x);  
 nmax = degree of polynomial;

เมื่อกำหนดตัวแปรแล้ว เปิดหน้าต่าง Editor ของ evomin.m จากนั้นกดรัน evomin.m

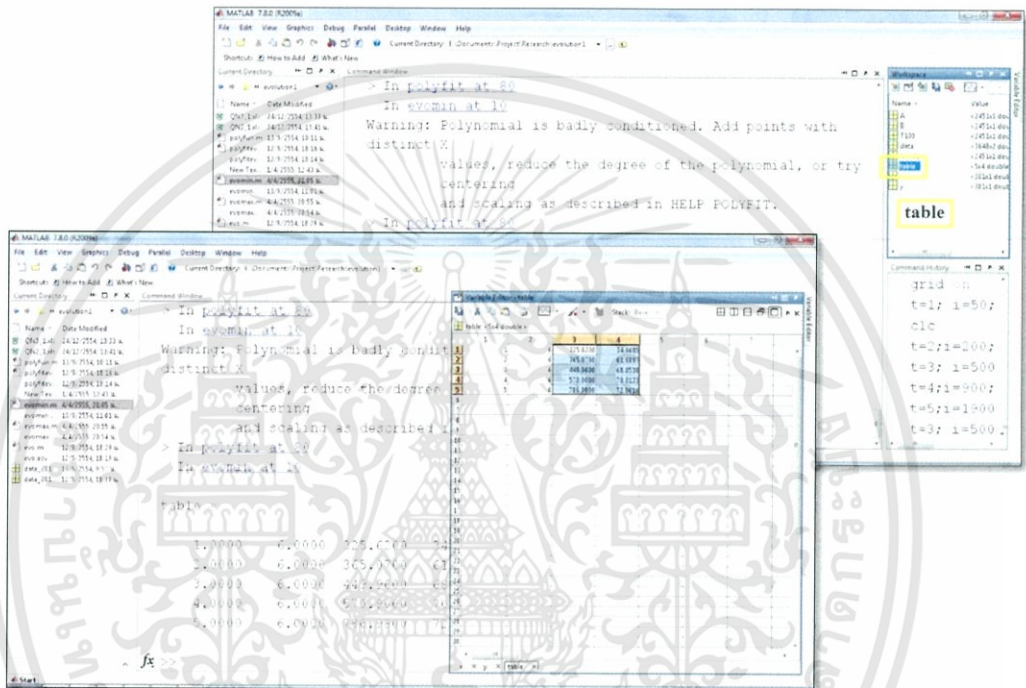
Figure 1  
 n = 6. (449.96 68 0538) m = 5.2146

รูปที่ 3.27 การหาจุดต่ำสุดของรีวการแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

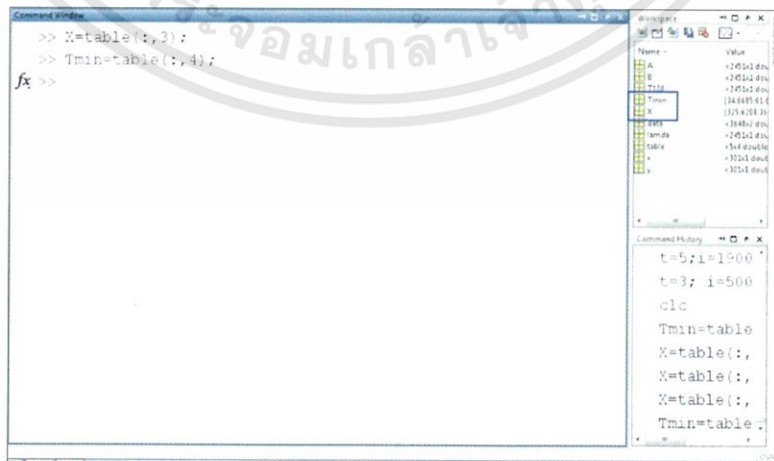
ทำตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.27 โดยเปลี่ยน  $t$ ,  $i$  และ  $f$  ไปคนครบจำนวนที่มีจุดต่ำสุดของรีวการแทรกสอด ( $T_m$ ) ซึ่งในกรณีของการหาจุดสูงสุดของรีวการแทรกสอดให้ทำเช่นเดียวกัน แต่เปลี่ยนจากการรัน `evomin.m` เป็น `evomax.m`

- 1.9 เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 1.8 แล้วจะได้ตัวแปร `table` ตามรูปที่ 3.28 บันทึกค่าที่ได้ไว้ในโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งจะได้อ่านค่า `wavelength` และ  $T_m$  จากคอลัมน์ที่ 3 และ 4 ของตัวแปร `table` และทำเช่นเดียวกันนี้กับการหาจุดสูงสุดของรีวการแทรกสอด



รูปที่ 3.28 หน้าต่างที่แสดงตัวแปร `table` ใน workspace

- 1.10 สร้างตัวแปร  $X$  และ  $Tmin$  ใน Workspace

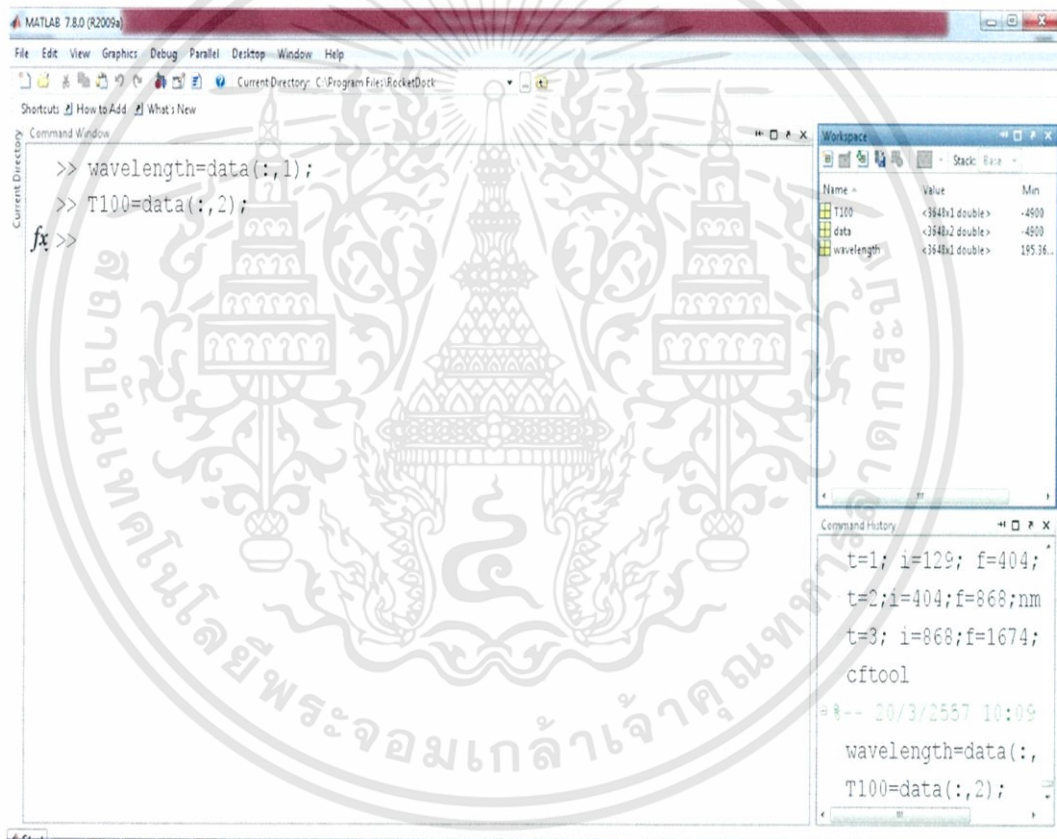


รูปที่ 3.29 การสร้างตัวแปร  $X$  และ  $Tmin$  ใน Workspace

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



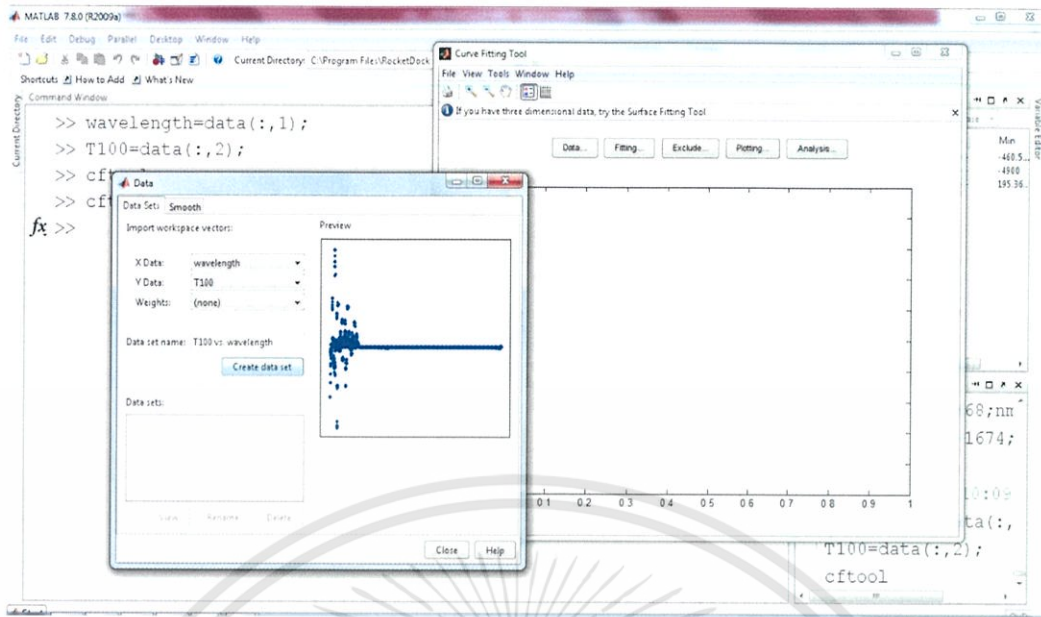
- 1.12 หาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่จุดสูงสุด ซึ่งทำเช่นเดียวกันกับขั้นตอนข้างต้น แต่เปลี่ยนชุดข้อมูลเป็นข้อมูลจากจุดสูงสุดของรีวการแทรกสอดแทน
2. หาค่าดัชนีหักเหของแผ่นฐานรอง ( $s$ ) หาได้จากสเปกตรัมการส่องผ่านของแผ่นฐานรอง ( $T_s$ ) ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้
- 2.1 ปรับช่วงข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นรอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังนี้
- 2.1.1 เปิดโปรแกรม MATLAB แล้วสร้างตัวแปร Wavelength และ T100 โดยให้ Wavelength คือ ความยาวคลื่นแสง, T100 คือ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง



รูปที่ 3.31 สร้างตัวแปร Wavelength และ T100 ในโปรแกรม MATLAB

- 2.1.2 เรียกใช้คำสั่ง cftool เลือก Data ในหน้าต่าง Curve Fitting Tool
- 2.1.3 ในหน้าต่าง Curve Fitting Tool > Data > Data sets เลือก X Data เป็น Wavelength และ Y Data เป็น T100

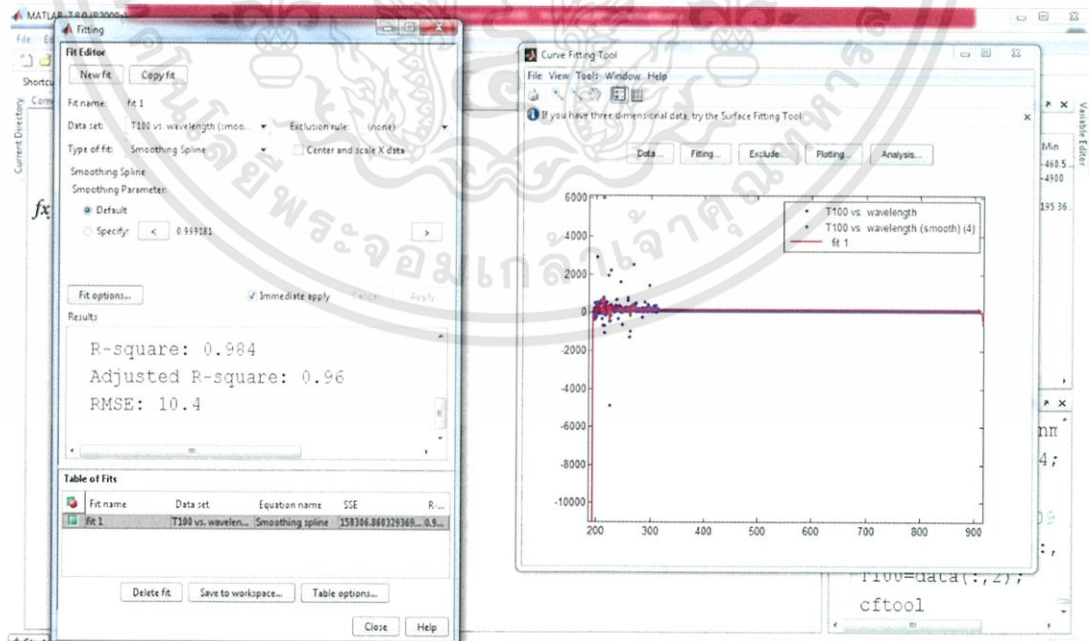
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรองกับความยาวคลื่น

2.1.4 ในหน้าต่าง Curve Fitting Tool > Fitting เลือก New fit > Data sets เลือก T100 vs. Wavelength

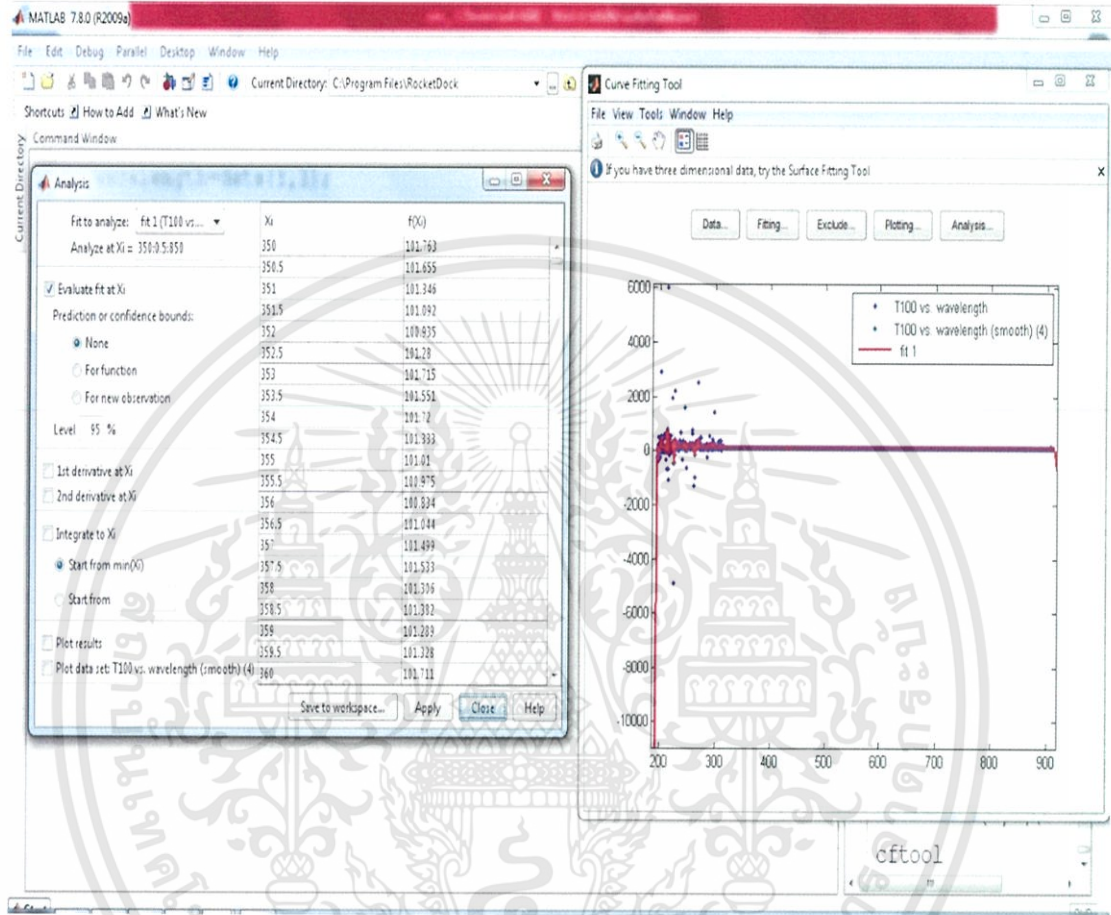
2.1.5 เลือก Type of fit เป็น Smoothing Spline > Immediate apply



รูปที่ 3.33 การ Fitting กราฟเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรองกับความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.1.6 ในหน้าต่าง Curve Fitting Tool เลือก Analysis.. > Analyze at Xi ให้เลือกช่วงที่จะทำการประมาณค่า โดยให้ช่วงระยะห่างของข้อมูลเป็น 0.5 จากนั้นกดเลือก Evaluate at Xi > apply



รูปที่ 3.34 การ Evaluate ข้อมูลเพื่อหา  $T_s$  ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ

- 2.1.7 จัดเก็บข้อมูล  $X_i$  และ  $f(X_i)$  ในโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่ง  $X_i$  คือความยาวคลื่น และ  $f(X_i)$  คือ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง ( $T_s$ )
- 2.2 จากสมการที่ 3.3 หาค่าดัชนีหักเหของแผ่นฐานรอง ( $s$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$s = \frac{1}{T_s} + \left( \frac{1}{T_s^2} - 1 \right)^{1/2}$$

เมื่อกำหนดด้วยโปรแกรม Microsoft Excel แล้วจะได้ดัชนีหักเหของแผ่นฐานรองที่ความยาวคลื่นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

	A	B	C	D	E	F	G
A1	wavelength						
1	wavelength	%T	Ts	1/Ts	$(1/Ts)^{1/2} - 1$	$((1/Ts)^{1/2} - 1)^{1/2}$	s
2	350.0	72.455000	0.724550	1.380167	0.904861	0.951242	2.331409
3	350.5	73.144000	0.731440	1.367166	0.869143	0.932279	2.299445
4	351.0	72.881200	0.728812	1.372096	0.882647	0.939493	2.311589
5	351.5	73.575900	0.735759	1.359141	0.847263	0.920469	2.279610
6	352.0	73.817300	0.738173	1.354696	0.835201	0.913893	2.268589
7	352.5	73.565700	0.735657	1.359329	0.847776	0.920747	2.280077
8	353.0	73.821500	0.738215	1.354619	0.834992	0.913779	2.268398
9	353.5	73.098500	0.730985	1.368017	0.871471	0.933526	2.301543
10	354.0	74.394800	0.743948	1.344180	0.806820	0.898231	2.242411

รูปที่ 3.35 การคำนวณดัชนีหักเหแผ่นฐานรองในโปรแกรม Microsoft Excel

3. คำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบางด้วยโปรแกรม Microsoft Excel มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้ข้อมูล  $X_i$  และ  $f(X_i)$  ของกราฟเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่จุดต่ำสุด ที่ได้จากกราฟ
- 2) จุดต่ำสุดและสูงสุดของรีฟลักเทรคสอดคล้องกับความยาวคลื่น

	A	B	C	D	E	F
A1	Xi					
1	$X_i$	$f(X_i) T_{max}$		$X_i$	$f(X_i) T_{min}$	
2	360.0	72.59126078		375.0	67.34364222	
3	360.5	72.62229414		375.5	67.35615133	
4	361.0	72.65332736		376.0	67.36866144	
5	361.5	72.68435986		376.5	67.38117250	
6	362.0	72.71539108		377.0	67.39368448	
7	362.5	72.74642046		377.5	67.40619733	
8	363.0	72.77744743		378.0	67.41871104	
9	363.5	72.80847143		378.5	67.43122556	
10	364.0	72.83949189		379.0	67.44374085	
11	364.5	72.87050823		379.5	67.45625689	
12	365.0	72.90151991		380.0	67.46877363	
13	365.5	72.93252635		380.5	67.48129104	
14	366.0	72.96352698		381.0	67.49380908	
15	366.5	72.99452125		381.5	67.50632772	
16	367.0	73.02550858		382.0	67.51884693	
17	367.5	73.05648841		382.5	67.53136666	

รูปที่ 3.36 ค่า  $X_i$  และ  $f(X_i)$  ที่ได้ Analyze ข้อมูลแล้ว ของ  $T_M$  และ  $T_m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) นำชุดข้อมูลความยาวคลื่น  $T_{min}$  และ  $T_{max}$  ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.9 มาเรียงลำดับจากชุดข้อมูลที่มีความยาวคลื่นสูงไปต่ำ โดยจัดการข้อมูลตามรูปแบบในรูปที่ 3.37

ไฟล์													
หน้าแรก		แทรก		เค้าโครงหน้ากระดาษ		สูตร		ข้อมูล		รีวิว		มุมมอง	
D1													
		f <sub>c</sub>		X1									
	C	D	E	F	G	H	I						
1		X1	Tmax		X1	Tmin							
2		360.37	72.1181833		389.42	67.633192							
3		435.01	77.6938662		488.59	70.252637							
4		574.97	81.3861207		671.30	74.110756							
5													

รูปที่ 3.37 ข้อมูลค่าความยาวคลื่น  $T_{max}$  และความยาวคลื่น  $T_{min}$

ไฟล์													
หน้าแรก		แทรก		เค้าโครงหน้ากระดาษ		สูตร		ข้อมูล		รีวิว		มุมมอง	
D12													
		f <sub>c</sub>											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
1	$\lambda$ (nm)	Tmax	Tmin	s(Index)	N	n1	d1(nm)	m <sub>1</sub>	m	d2(nm)	n2		
2	671.30		74.1108										
3	574.97	81.3861											
4	488.59		70.2526										
5	435.01	77.6939											
6	389.42		67.6332										
7	360.37	72.1182											
8													

รูปที่ 3.38 ตารางการคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง

- 4) เติมข้อมูลค่า  $T_{max}$  และ  $T_{min}$  ในตารางจากรูปที่ 3.39 โดยใช้ค่าจากขั้นตอนที่ 1 ในรูปที่ 3.37 เลือกจากความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านที่ต้องการ
- 5) ใส่ค่า  $s(\text{Index})$  ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ลงในตารางโดยใช้ข้อมูลจากขั้นตอนที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	$\lambda$ (nm)	Tmax	Tmin	s(Index)	N	n1	d1(nm)	$m_0$	m	d2(nm)	n2
2	671.30	84.5055	74.1108	1.66							
3	574.97	81.3861	72.0972	1.69							
4	488.59	79.1574	70.2526	1.73							
5	435.01	77.6939	68.8418	1.77							
6	389.42	74.4036	67.6332	1.89							
7	360.37	72.1182	66.9815	2.15							
8											
9											

รูปที่ 3.39 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง

- 6) สามารถคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางได้ตามสมการที่ 3.5 โดยทำการคำนวณหา ค่า  $N$ ,  $n1$ ,  $d1$  และ  $m_0$  ตามสมการที่ (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ แล้วนำค่า ความยาวคลื่น  $m_0$  และ  $d1$  มาคำนวณกลับหาความหนาของฟิล์มที่ถูกต้องได้ตามสมการที่ (3.5) และสามารถนำค่าความหนาของฟิล์มมาคำนวณหาดัชนีหักเหของฟิล์มได้ ตามรูปที่ 3.40

$\lambda$ (nm)	Tmax	Tmin	s(Index)	N	n1	d1(nm)	$m_0$	m	d2(nm)	n2
678.04	69.0977	68.5128	1.66	1.8784	1.66		2.19	2	408	1.5886
576.57	74.9675	67.0502	1.71	1.9623	1.71		2.66	2.5	421	1.6886
494.08	71.3616	65.4794	1.70	1.9544	1.71	497	3.09	3	434	1.7364
451.13	69.9050	61.2945	1.72	1.9835	1.72	586	3.42	3.5	458	1.8497
389.80	60.9191	55.9585	1.86	2.2359	1.86	376	4.28	4	418	1.8265
372.95	57.1121	55.7740	1.99	2.4821	1.99	330	4.78	4.5	421	1.9660

STDEV	116
Average d1	447
Percentage	25.98

STDEV	17
Average d2	427
Percentage	4.05

รูปที่ 3.40 ตารางการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง และค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม

## ผลการวิจัย และอภิปรายผล

สำหรับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้ทำการปลูกในโรงงานพิเศษนี้ เป็นฟิล์มบางที่ปลูกด้วยวิธีรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริงบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที) ในอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 20% 40% 60% 80% และ 100% เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน ที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง และทำการศึกษาการใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นอลูมิเนียมเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% เพื่อศึกษาผลทางโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้

### 4.1 การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ

การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้ทำการปลูกบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ โดยมีเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 4.1

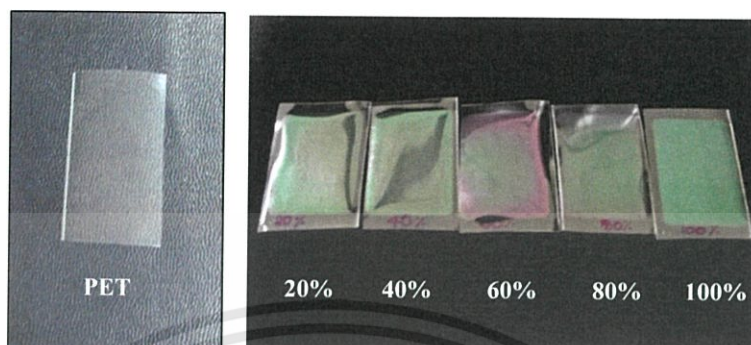
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ที่เงื่อนไขเวลาในการปลูกฟิล์มเท่ากัน

เป่าสารเคลือบ	อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 3 นิ้ว
แผ่นฐานรอง	พลาสติก PET
ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรอง	80 มิลลิเมตร
ความดันก่อนทำการปลูกฟิล์ม	$5 \times 10^{-6}$ มิลลิบาร์
ความดันก่อนเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	$2.7 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์
กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	250 วัตต์
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	$2.2 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์
อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน	20% 40% 60% 80% และ 100%
$C_N = (N_2/N_2+Ar) \times 100\%$	
ระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม	45 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะ โปร่งใสได้แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100%

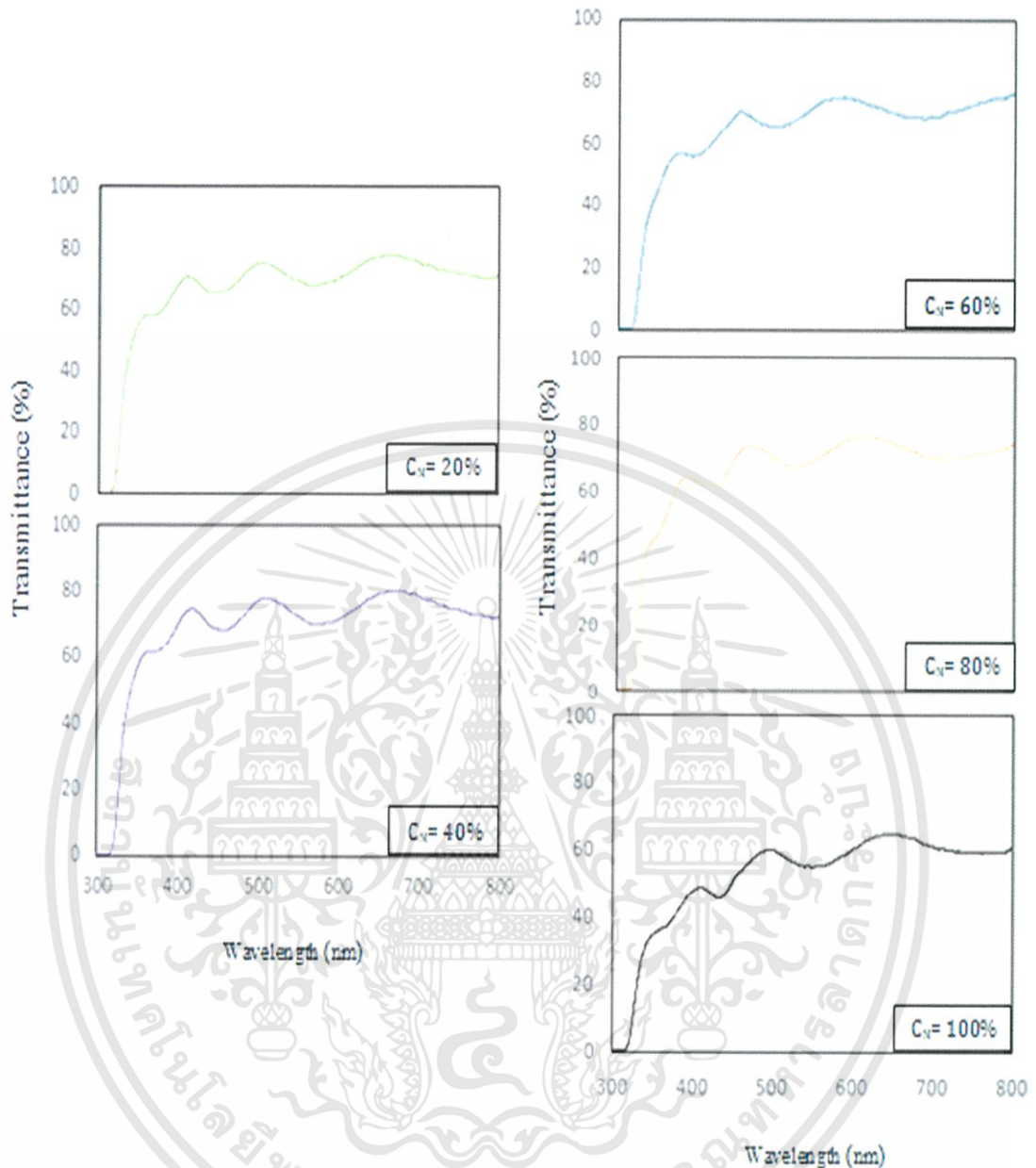
#### 4.1.2 ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์

ผลจากการวัดสเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์มีความหนาใกล้เคียงกันมาก ซึ่งในเบื้องต้นสามารถสังเกตได้จากจำนวนของริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจากแสงที่สะท้อนบริเวณรอยต่อของผิวฟิล์มกับอากาศ และส่วนที่สะท้อนบริเวณรอยต่อของผิวฟิล์มกับแผ่นฐานรอง สำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเอเทอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที) สามารถทำการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง โดยวิธีสเวนนิ โพล (Swanepoel) ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสเวนนิ โพล เมื่อปลูกด้วยเวลาเท่ากัน (45 นาที)

อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน ( $N_2/N_2+Ar$ ) $\times 100\%$	ความหนาของฟิล์มบาง (นาโนเมตร)
20	413
40	514
60	427
80	444
100	478

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

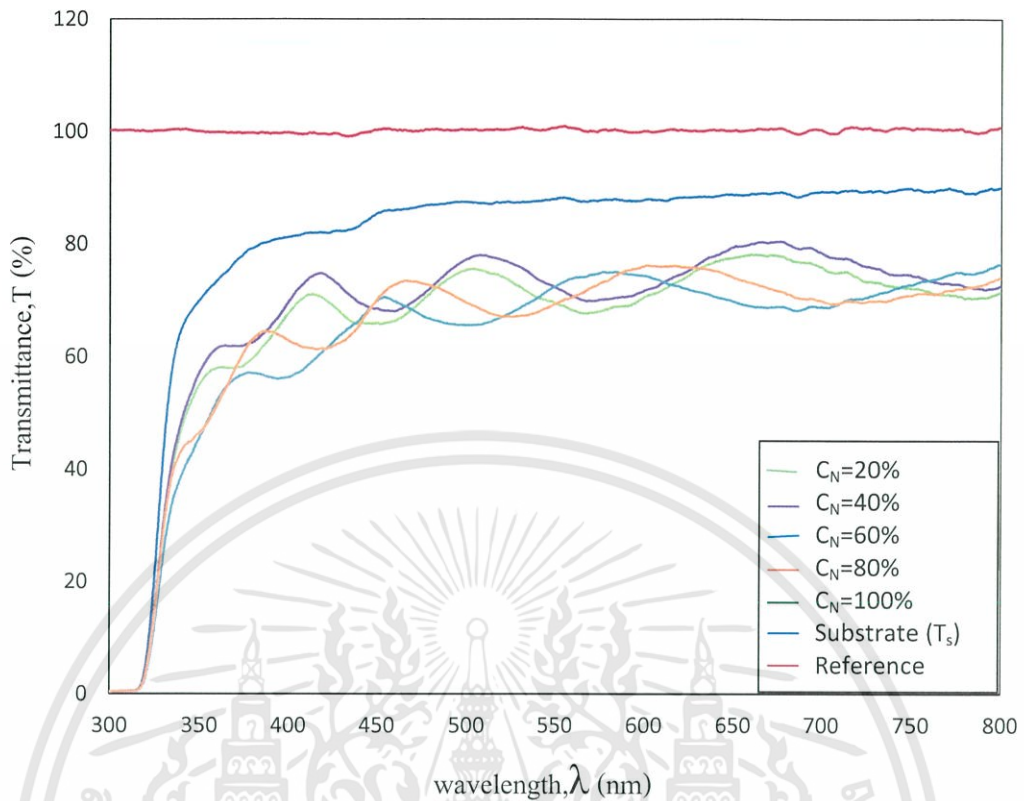


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงย่านตามองเห็นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ

#### 4.1.3 สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

ผลการวัดสเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ เมื่อปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100% แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีการส่องผ่านของแสงมีค่าเฉลี่ยการส่องผ่านเป็น 71.1% 73.4% 68.8% 69.8% และ 56.4% ตามลำดับ ตลอดช่วงความยาวคลื่น 350-800 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงย่านตามองเห็นของฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์ซึ่งปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ

เนื่องจากการปลูกฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (PET) พบว่ามีข้อจำกัดในการวัดการดูดกลืนแสงในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงทำให้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงานต้องห้าม (Energy Band gap) ได้ เนื่องจากจะเห็นได้ว่า ช่วงที่เริ่มมีการส่องผ่านแสงของแผ่นฐานรอง (PET) เป็นช่วงเดียวกันกับช่วงที่มีการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์ คือ ที่  $\lambda = 315$  นาโนเมตร ซึ่งค่าแถบพลังงานต้องห้าม (Energy Band gap) ของฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์มีค่าประมาณ 5.6 อิเล็กตรอนโวลต์[1] ซึ่งจะต้องมีการส่องผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร เป็นต้นไป แต่จากข้อมูลสเปกตรัมการส่องผ่านของแสงย่านตามองเห็นของฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า เริ่มมีการส่องผ่านแสงที่  $\lambda = 350$  นาโนเมตร เป็นต้นไป

สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์ที่แสดงในรูปที่ 4.3 สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าความหนา และค่าดัชนีหักเหของแสงด้วยวิธีของเสวนนีโพลตามที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ซึ่งในการทดลองคำนวณหาค่าความหนา และค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบางออกซิเดียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 60% ได้ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า  $T_M$   $T_m$   $s$   $n1$   $d1$   $m_0$   $m$   $d2$  และ  $n2$  ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ซึ่งปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 60%

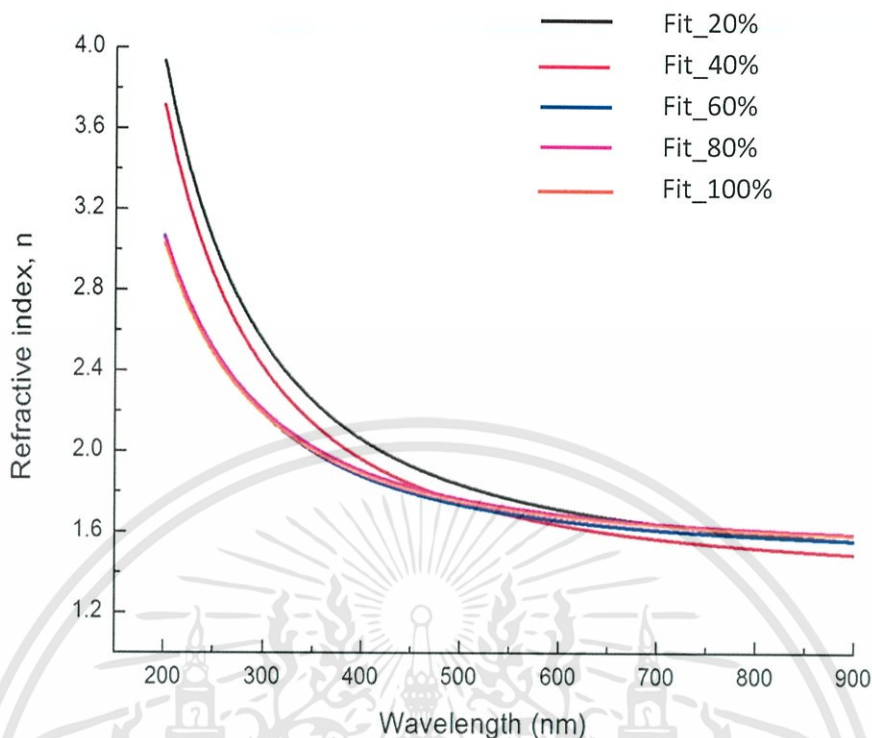
$\lambda$ (nm)	$T_M$	$T_m$	$s$	$n1$	$d1$ (nm)	$m_0$	$m$	$d2$ (nm)	$n2$
678	69.098	68.513	1.66	1.66		2.19	2	408	1.59
577	74.968	67.050	1.71	1.71		2.66	2.5	421	1.69
494	71.362	65.479	1.70	1.71	497	3.09	3	434	1.74
451	69.905	61.295	1.72	1.72	586	3.42	3.5	458	1.85
390	60.919	55.959	1.86	1.86	376	4.28	4	418	1.83
373	57.112	55.774	1.99	1.99	330	4.70	4.5	421	1.97
$d1 = 447$ nm						$d2 = 427$ nm			

จากผลดังกล่าวจะได้ดัชนีหักเหของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เท่ากับ 1.77 1.68 1.69 1.72 และ 1.71 เมื่ออัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 2% 40% 60% 80% และ 100% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนขณะทำการปลูกฟิล์มมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ได้้น้อยมาก สำหรับค่าดัชนีหักเหที่ได้้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้จากวิธีอื่นที่ฟิแมกนี ครอนสปีด เตอริง

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของเส้นแนวโน้มสำหรับความสัมพันธ์เคอร์ซี

$C_N = (N_2 / (N_2 + Ar)) \times 100\%$	$a(n_0)$	$b$
20%	1.4346	9.99E+04
40%	1.3737	9.37 E+04
60 %	1.4804	6.34 E+04
80%	1.5129	6.21 E+04
100%	1.5075	6.09 E+04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



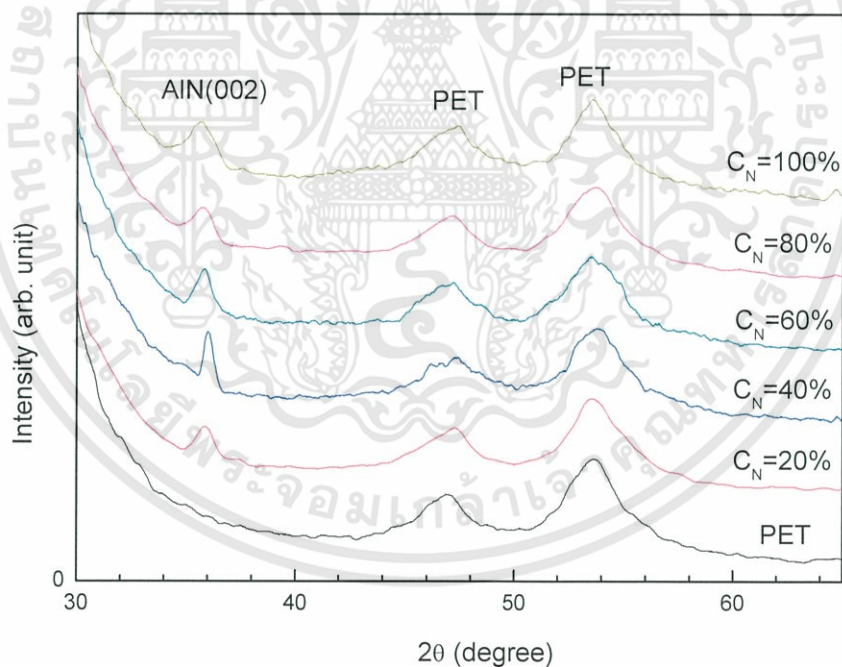
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของฟิล์มกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเอเทอร์เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100%

#### 4.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

สำหรับโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเอเทอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100% ตรวจสอบด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer, XRD) ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% มีพีคของชั้นฟิล์มอยู่ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ พีคแรกอยู่ที่ตำแหน่ง 35.776 องศา มีขนาด FWHM เท่ากับ 0.929 องศา มีความสอดคล้องกับตำแหน่งของอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบ (002) พีคที่สองและสามเป็นพีคของ PET ในขณะที่ระนาบ (002) จะมีค่าความเข้มของพีคสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนจาก 20% เป็น 40% ซึ่งพีคอยู่ที่ตำแหน่ง 35.999 องศา มีขนาด FWHM เท่ากับ 0.327 องศา และที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 60% 80% และ 100% ค่าความเข้มของพีคจะมีค่าลดลง และมีขนาด FWHM เท่ากับ 1.129 และ 1.157 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

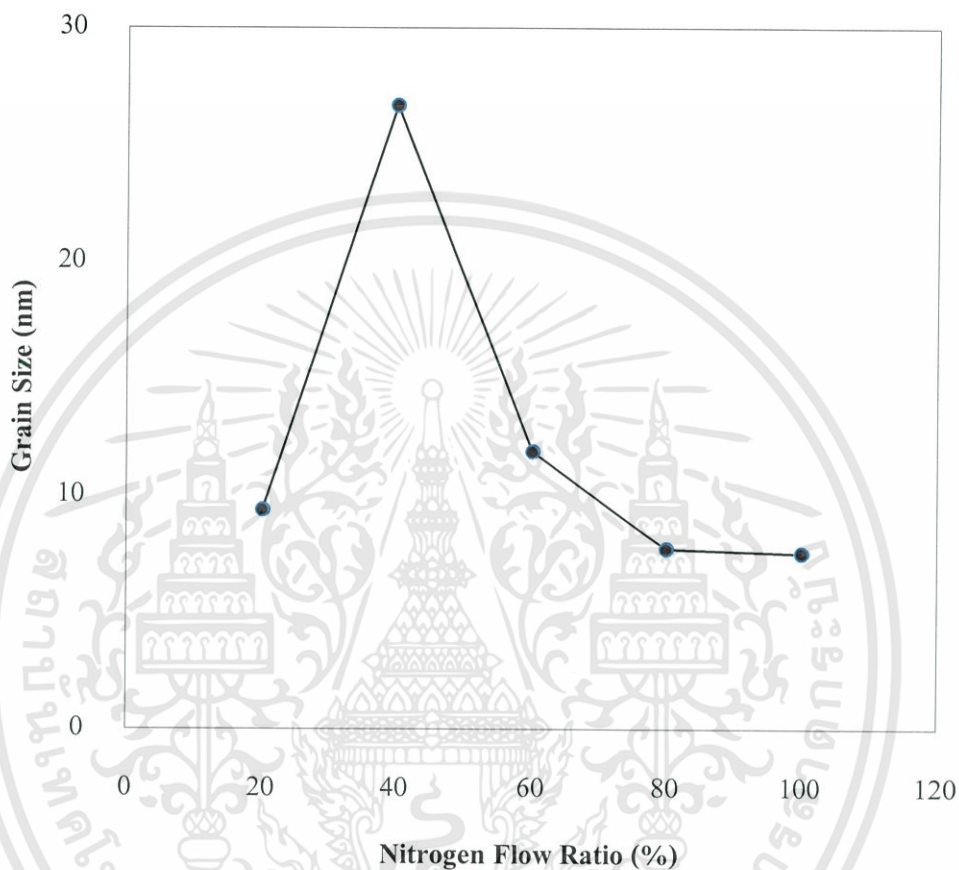
จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบ (002) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนตั้งข้างต้น อธิบายได้ว่าเกิดจากเปลี่ยนแปลงพลังงานของอะตอมเป่าสารเคลือบที่ตกสะสมเป็นฟิล์มบนแผ่นฐานรอง โดยเมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเพิ่มจาก 20% เป็น 40% ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของอะตอมที่หลุดออกจากเป่าสารเคลือบกับอะตอมของไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความน่าจะเป็นที่จะชนกับอะตอมของอาร์กอนลดลง จึงทำให้อะตอมของอะตอมสะสมถึงแผ่นฐานรองมีพลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้มีพลังงานมากพอที่จะจัดเรียงตัวให้อยู่ในระนาบ (002) แต่เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนมีค่าเพิ่มเป็น 60% 80% และ 100% ถึงแม้ว่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของอะตอมออลูมิเนียมกับอาร์กอนจะลดลงไป แต่เนื่องจากการสเปคเตอร์เป่าสารเคลือบเกิดจากอะตอมของไนโตรเจนซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเป็นหลัก แทนที่จะเป็นอะตอมของอาร์กอน จึงทำให้อัตราการหลุดของอะตอมออลูมิเนียมลดลงและยังส่งผลทำให้อะตอมออลูมิเนียมที่หลุดออกมานั้นมีพลังงานน้อยลงตามไปด้วย ส่งผลให้ได้อัตราการเกิดฟิล์มออลูมิเนียมไนไตรด์ที่เป็นระนาบ (002) ลดน้อยลง



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มออลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ ซึ่งปลูกด้วยเงื่อนไขอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ

สำหรับค่า d-spacing มีค่าใกล้เคียงกันมากที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100% และขนาดของเกรน พบว่าเกรนมีขนาดเล็กมากเป็นนาโนเมตร โดยที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% เกรนมีขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่ที่สุด หลังจากนั้นขนาดของเกรนจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้น สังกัดได้จากข้อมูลทางเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) คือค่า FWHM แสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.5

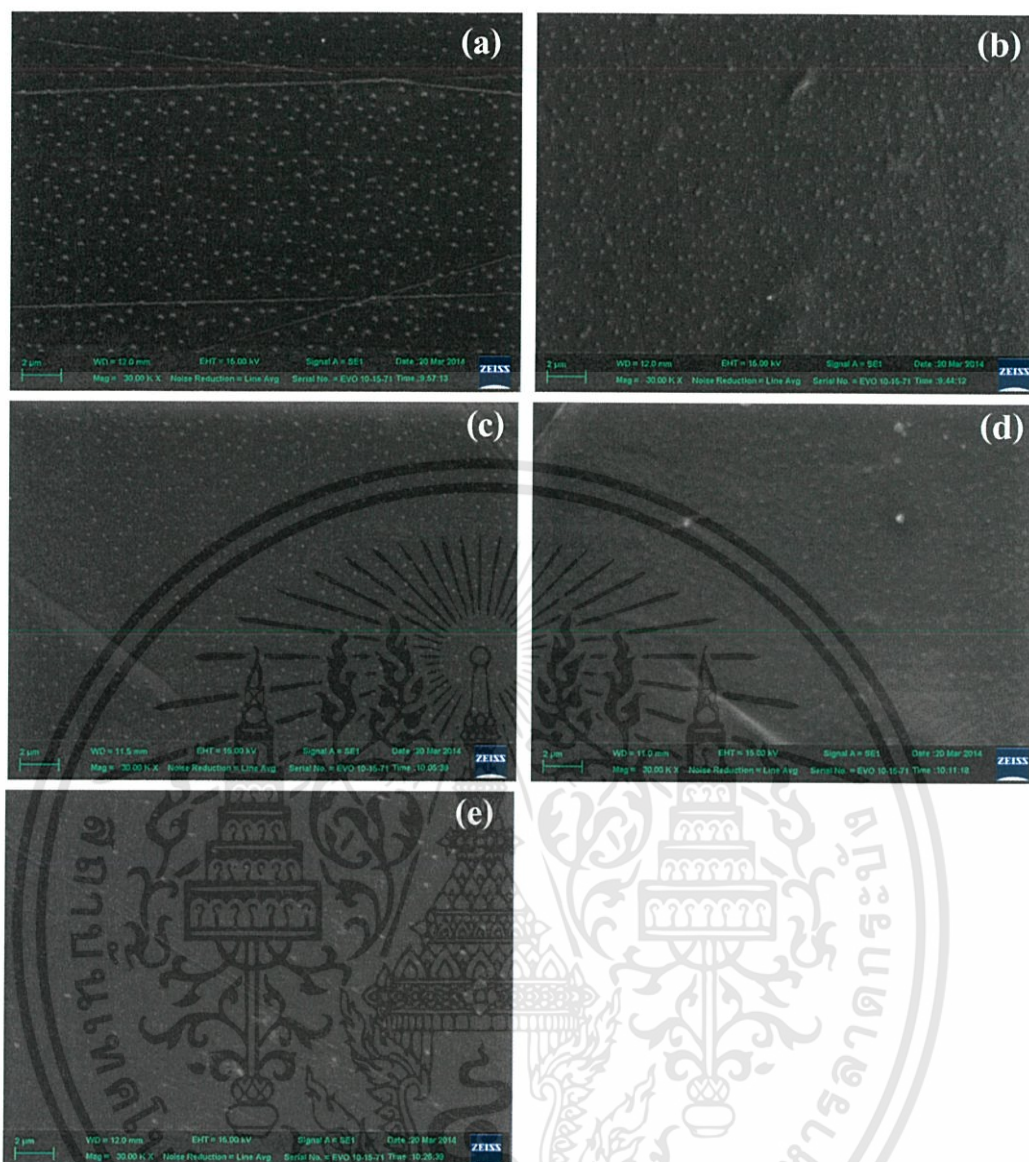


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า d-spacing กับ FWHM ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ

$(N_2/N_2+Ar) \times 100\%$	20%	40%	60%	80%	100%
<b>d-spacing (nm)</b>	0.25078	0.24927	0.25157	0.25161	0.25162
<b>2 <math>\theta</math> (องศา)</b>	35.776	35.999	35.654	35.653	35.652
<b>FWHM (องศา)</b>	0.929	0.327	0.732	1.129	1.157
<b>Grain Size (nm)</b>	9.3927	26.6782	11.8839	7.7217	7.5304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน (a) 20%, (b) 40%, (c) 60%, (d) 80% และ (e) 100%

#### 4.2 การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เงื่อนไขของการใช้เป่าสารเคลือบที่ความบริสุทธิ์แตกต่างกัน

การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที) เพื่อศึกษาผลของการใช้เป่าสารเคลือบที่ความบริสุทธิ์แตกต่างกันว่ามีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้ทำการปลูกบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ โดยมีเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 4.6

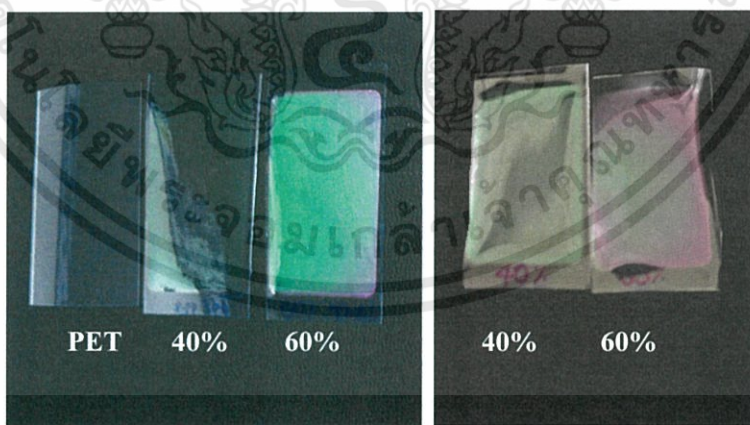
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ ที่เงื่อนไขของการใช้เป่าสารเคลือบที่ความบริสุทธิ์แตกต่างกัน

เป่าสารเคลือบ	อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% ขนาด 3 นิ้ว
แผ่นฐานรอง	พลาสติก PET
ระยะระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรอง	80 มิลลิเมตร
ความดันก่อนทำการปลูกฟิล์ม	$5 \times 10^{-6}$ มิลลิบาร์
ความดันก่อนเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	$2.7 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์
กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	250 วัตต์
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	$2.2 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์
อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน ( $N_2/N_2+Ar$ ) $\times 100\%$	40% และ 60%
ระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม	45 นาที

#### 4.2.1 ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะโปร่งใสได้แสดงดังรูปที่ 4.7



(a)

(b)

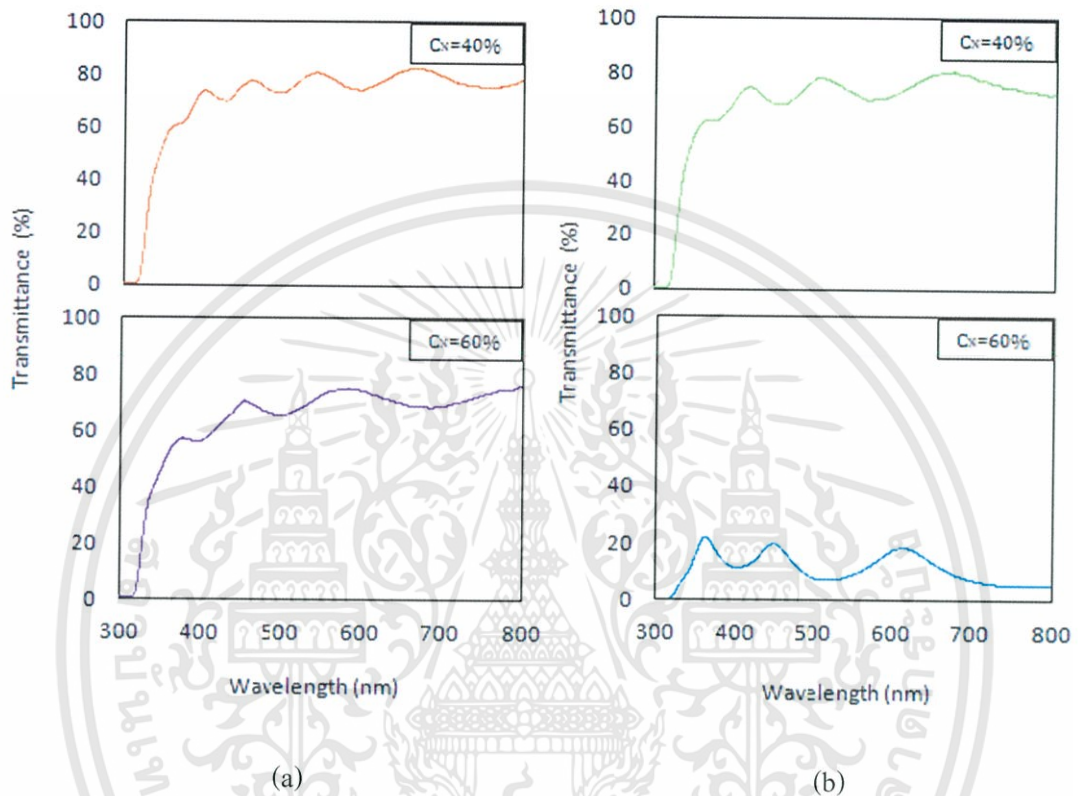
รูปที่ 4.8 ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน 40 และ 60% (a) เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8%

(b) เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์

สำหรับการหาค่าความหนาของฟิล์มบางในเบื้องต้นสามารถคำนวณได้จากข้อมูลของสเปกตรัมการส่องผ่านของแสงในย่านตามองเห็นและย่านอัลตราไวโอเล็ต แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยการคำนวณหาด้วยวิธีสเวนนิโพล (Swanepoel) ได้ความหนาแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงย่านตามองเห็นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60%

(a) เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% (b) เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8%

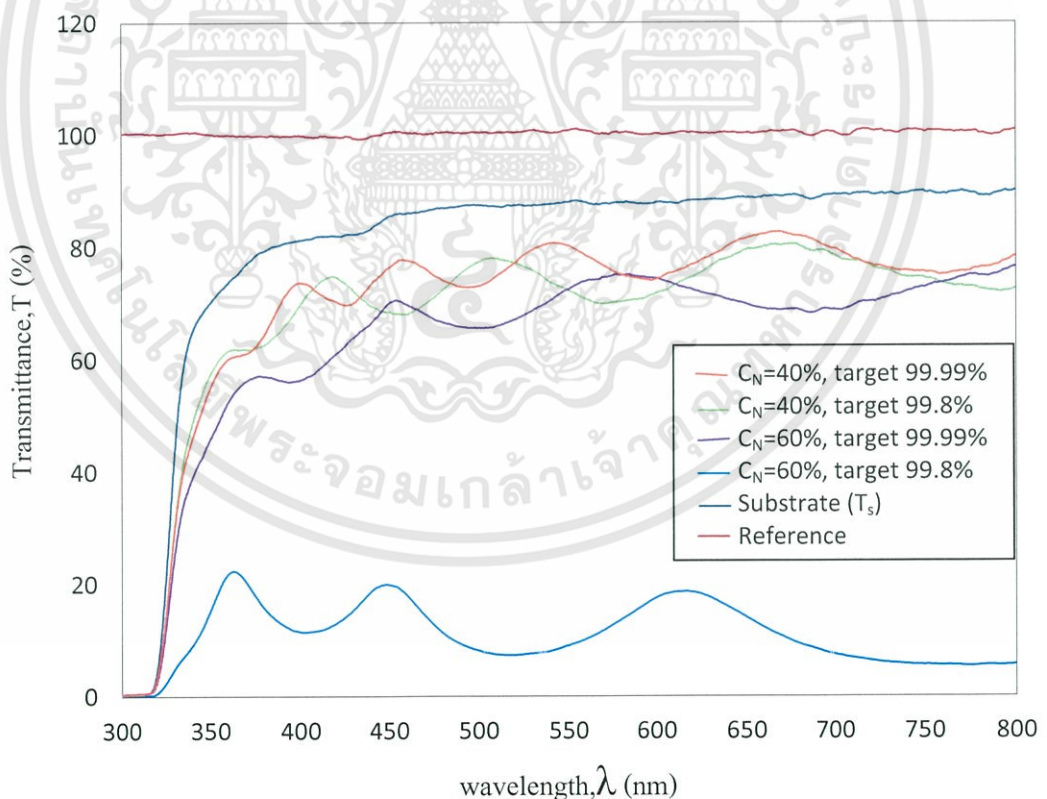
ตารางที่ 4.7 ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสเวนนิโพล เมื่อปลูกด้วยเวลาที่เท่ากัน (45 นาที)

เป้าสารเคลือบ	$C_N = \left( \frac{N_2}{N_2 + Ar} \right) \times 100\%$	ความหนาจากการคำนวณ (nm)
อลูมิเนียม 99.99%	40	514
	60	474
อลูมิเนียม 99.8%	40	549
	60	396

สำหรับความหนาที่คำนวณได้ (จากตารางที่ 4.7) พบว่า ค่าความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่ใช้เป่าสารเคลือบความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% แสดงให้เห็นว่า ความบริสุทธิ์ของเป่าสารเคลือบไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม

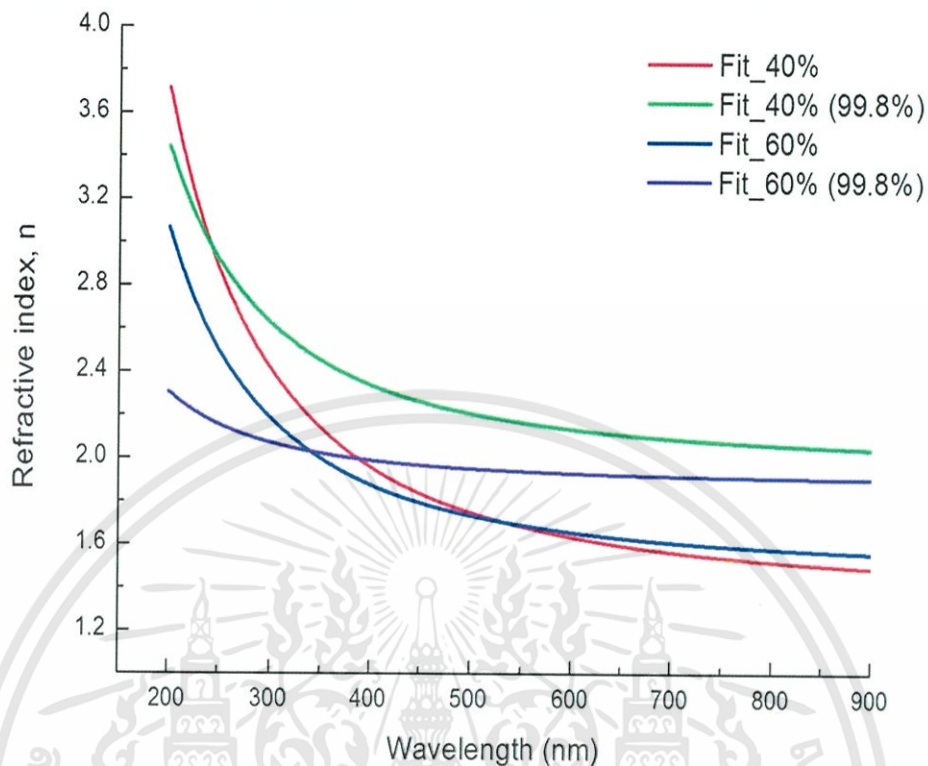
#### 4.2.3 สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

จากผลการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ เมื่อปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ที่เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8% แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยการเปรียบเทียบกับเป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 4.1) พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีการส่งผ่านของแสงมีค่าเฉลี่ยการส่งผ่านเป็น 72.7% และ 11.4% ตามลำดับ ตลอดช่วงความยาวคลื่น 350-800 นาโนเมตร ซึ่งค่าเฉลี่ยการส่งผ่านที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยใช้เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% มีการส่งผ่านของแสงได้ดีกว่าฟิล์มบางที่ปลูกโดยใช้เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมไนไตรด์ความบริสุทธิ์ 99.8%



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการส่งผ่านของแสงย่านตามมองเห็นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ที่เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8%

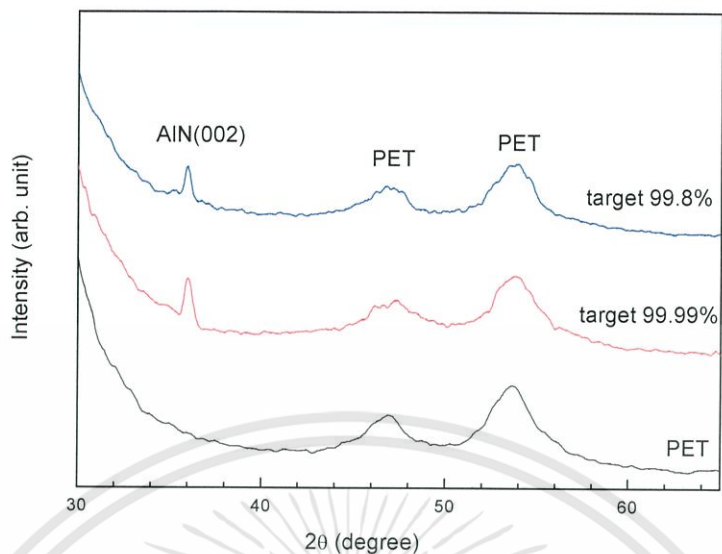
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



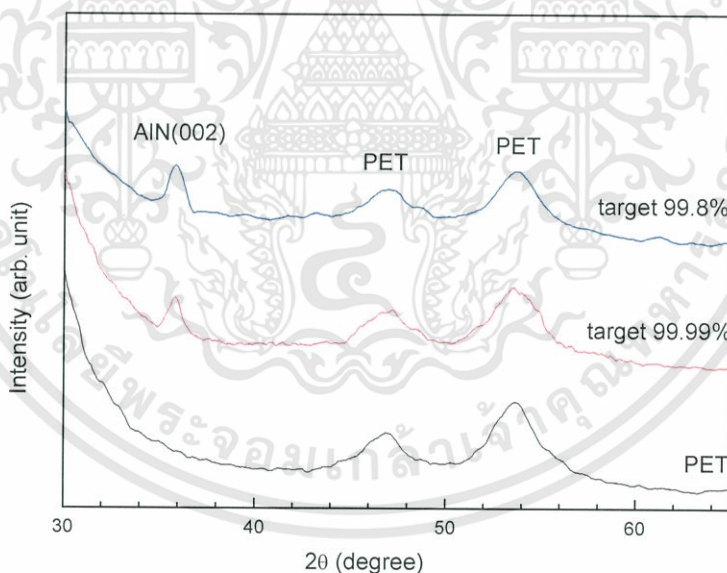
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของฟิล์มกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (PET) เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ที่เป้าสารเคลือบความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8%

#### 4.2.4 ตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

โครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene terephthalate , PET) ที่เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ตรวจสอบด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer , XRD) ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ที่เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% ที่ตำแหน่งของอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบ (002) มีค่าความเข้มของพีคสูงกว่าที่เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8% ทั้งอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ที่เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40%



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ที่เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% เมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 60%

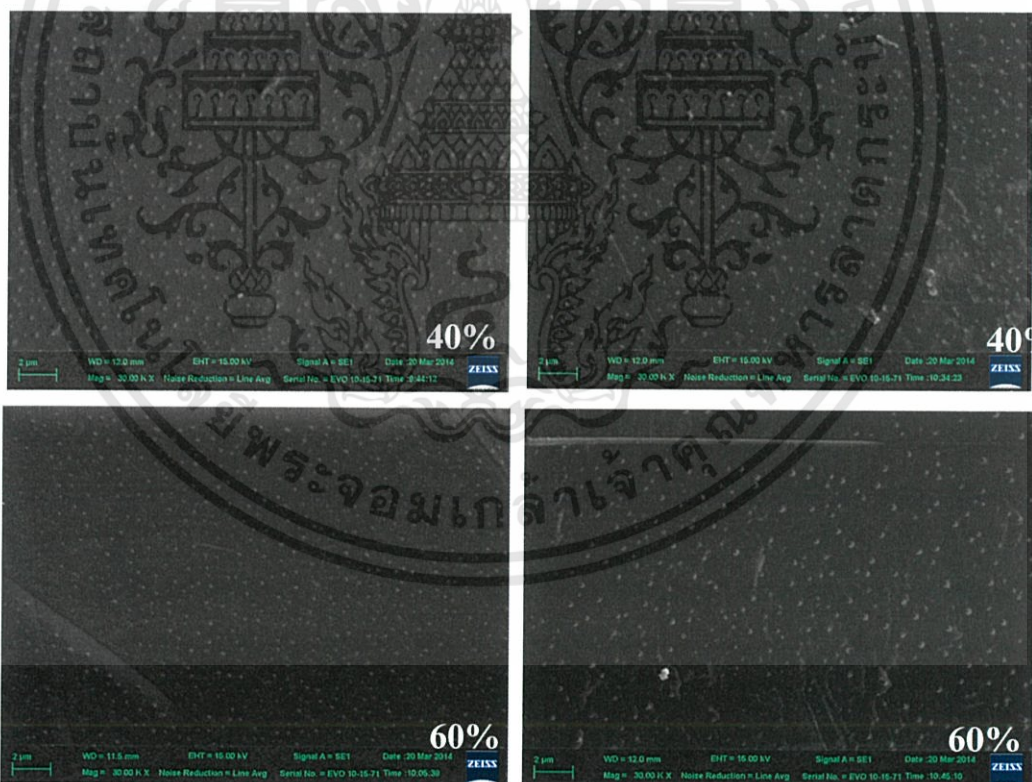
สำหรับค่า d-spacing ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ มีค่าใกล้เคียงกันมากที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ที่ปลูกโดยใช้เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% แต่ว่าขนาดของเกรนที่ปลูกโดยใช้เป่าสารเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% มีค่ามากกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่ปลูกโดยใช้เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8% แสดงว่า การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดีกว่า แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า d-spacing,  $2\theta$ , FWHM และ Grain size ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60% ที่อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8%

เป่าสารเคลือบ	อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99%		อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8%	
$(N_2/N_2+Ar)\times 100\%$	40%	60%	40%	60%
d-spacing (nm)	0.24927	0.25157	0.25018	0.25096
$2\theta$ (องศา)	35.999	35.654	35.864	35.748
FWHM (องศา)	0.327	0.732	0.446	0.861
Grain Size (nm)	26.6782	11.8839	19.5537	10.1441



(a)

(b)

รูปที่ 4.14 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และ 60%

(a) เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% (b) เป่าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผล การปลูกฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง และศึกษาการใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นออลูมิเนียมเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% เพื่อศึกษาผลทางโครงสร้างของฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้

#### 5.1 สรุปผลการปลูกฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ในอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 20% 40% 60% 80% และ 100% ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที)

จากการทดลองปลูกฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) โดยเทคนิครีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอรिंग ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที) ในอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 20% 40% 60% 80% และ 100% พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะ โปร่งใส สามารถส่องผ่านแสงในย่านตามองเห็นได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ความหนาของฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้เวลาในการปลูก 45 นาที มีความหนาอยู่ในช่วง 400 – 500 นาโนเมตร และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนขณะทำการปลูกฟิล์มสำหรับจากผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์มีการจัดเรียงตัวที่ระนาบ (002) ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวตามแนวแกน C โดยตั้งฉากกับระนาบพื้นผิว และมีค่าความเข้มของพีกสูงสุด ซึ่งหมายถึงผลึกมีความสมบูรณ์มากที่สุดเมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% และสำหรับขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กมากเป็นนาโนเมตร โดยที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 40% เกรนมีขนาดใหญ่ที่สุด ดังนั้นจึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้

#### 5.2 สรุปผลการปลูกฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ในอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 40% และ 60% ที่เป่าสารเคลือบออลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene Terephthalate) ที่เงื่อนไขเวลาเท่ากัน (45 นาที) ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน เป็น 40% และ 60% ที่เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% และ 99.8% พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะโปร่งใส ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.99% มีการส่องผ่านของแสงดีกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.8% ความหนาของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 400-500 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าความบริสุทธิ์ของเป้าสารเคลือบไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์มบาง จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า ความเข้มของพีคที่ระนาบ (002) ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียม 99.99% มีความเข้มมากกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.8% และฟิล์มบางที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.99% ยังมีค่า FWHM น้อยกว่าฟิล์มบางที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.8% จึงสรุปได้ว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียม 99.99% มีการจัดเรียงตัวของผลึกที่ระนาบ (002) ได้ดีกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียม 99.8%

### 5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

1. ในขั้นตอนการเตรียมระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง ควรมีความระมัดระวังและรอบคอบในทุกขั้นตอน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศสูงซึ่งระบบจะต้องไม่มีคราบไขมันหรือสิ่งสกปรกที่ทำให้เกิดการการปลดปล่อยก๊าซหรือ ไอออกมา (Outgassing) ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำความดันสุญญากาศสูงได้
2. ไม่สามารถทำความดันสุญญากาศต่ำในห้องสุญญากาศได้ เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น น้ำมันปั๊มสุญญากาศเสื่อมคุณภาพ ห้องสุญญากาศมีการปนเปื้อนของไขมันหรือสิ่งสกปรก มีจุดรั่วในห้องสุญญากาศหรือที่บริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ต่างๆกับห้องสุญญากาศ แก้ไขได้โดยการเปลี่ยนน้ำมันปั๊มสุญญากาศ เช็ดทำความสะอาดห้องสุญญากาศด้วยอะซิโตน และเมทานอลหรือติดอลูมิเนียมฟอยล์ใหม่ และตรวจสอบอย่างกันรั่วและการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ให้แน่นขึ้น
3. การปลูกฟิล์มไม่ติด อาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ใช้กำลังคลื่นวิทยุต่ำเกินไป ไม่สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมไอออน และไนโตรเจนไอออนได้ ในกรณีนี้ต้องเพิ่มกำลังคลื่นวิทยุขึ้น หรือแผ่นฐานรองไม่สะอาดก็มีผลต่อการเกิดฟิล์มได้
4. เมื่อพลาสมาดับขณะทำการปลูกฟิล์ม เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น สัญญาณสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุมีค่าสูง ระบบระบายความร้อนให้กับหัวแมกนีตรอนไม่เพียงพอ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแก้ไขได้โดยการเปิดเครื่องทำน้ำเย็นทิ้งไว้ก่อนทำการปลูกฟิล์ม เพื่อให้ น้ำที่มาหล่อระบายความร้อนของหัวแมกนีตรอนมีความเย็นจัดก่อน

5. หากฟิล์มบางมีการหลุดร่อนหลังการปลูก ในการปลูกครั้งต่อไปต้องรอให้ฟิล์มอยู่ในสถานะสุญญากาศจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกเสียก่อน แล้วจึงนำฟิล์มออกมาจากห้องสุญญากาศ และหลังจากนั้นควรเก็บไว้ในตู้อบสุญญากาศ เพื่อป้องกันการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวฟิล์ม

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้น้อยเกินไป (45 นาที) จึงทำให้ฟิล์มที่ได้บางมาก (400 –500 นาโนเมตร) ซึ่งฟิล์มที่บางเกินไปทำให้การวิเคราะห์คุณสมบัติบางอย่างของฟิล์มนั้นทำได้ยาก จึงควรเพิ่มเวลาในการปลูกฟิล์มเพื่อให้ฟิล์มมีความหนามากขึ้น
2. ระบบควบคุมการปล่อยก๊าซ และกำลังคลื่นวิทยุควรได้รับการพัฒนาให้มีความแม่นยำมากขึ้น
3. ควรมีการตรวจสอบกราฟด์ของระบบทุกส่วนที่เชื่อมกับระบบอาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง และควรตรวจสอบให้แน่ใจว่ากราฟด์ทุกส่วนของระบบเชื่อมต่อกัน
4. หากมีเวลาดำเนินงานเพียงพอ ควรทำการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางมากกว่านี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อมร เทศสกุลวงศ์. 2556. การปลูกและการตรวจวัดสมบัติของฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริก อลูมิเนียมไนไตรด์เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์ คุุญฉบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ. ศ. 2556
- [2] A. Bessière, J.-C. Badot, M.-C. Certiat, J. Livage, V. Lucas, and N. Baffier. 2001. Sol-gel deposition of electrochromic  $WO_3$  thin film on flexible ITO/PET substrate. *Electrochimica Acta*. 46, 2251-2256.
- [3] Atul Vir Singh, Sudhir Chandra, G. Bose. *Thin Solid Films* 519 (2011) 5846-5853. Bunshah, R. F. Handbook of deposition technologies for films and coatings --2<sup>nd</sup> ed. D.Y. Lee, J.R. Lee, G.H. Lee, and P.K. Song. 2008. Study on In-Zn-Sn-O and In-Sn-Zn-O films deposited on PET substrate by magnetron co-sputtering system. *Surface and Coatings Technology*. 202, 5718-5723.
- [4] E.R. SHAABAN, I.S. YAHIA AND E.G. EL-METWALLY. Validity of Swanepoel's Method for Calculating the Optical Constants of Thick Films. H. Jin, J. Zhou, S.R. Dong, B. Feng, J.K. Luo, D.M. Wang, W.I. Milne, C.Y. Yang. *Thin Solid Films* 520 4863-4870 (2012).
- [5] Han-Yong Joo, Hyeong Joon Kim, Sang June Kim and Sang Youl Kim. Spectrophotometric analysis of aluminum nitride thin films.
- [6] J. Sánchez-González, A. Díaz-Parralejo, A.L. Ortiz\* and F. Guiberteau. Determination of optical properties in nanostructured thin films using the Swanepoel method. *Applied Surface Science* 252 (2006) 6013-6017.
- [7] Jian Zhou, Shurong Dong, Hao Jin, Bing Feng, and Demiao Wang. *Journal of Control Science and Engineering* 2012.
- [8] Lijun Zhou, Shanshan Yan, Baozhu Tian, Jinlong Zhang and Masakazu Anpo. 2006. Preparation of  $TiO_2-SiO_2$  film with high photocatalytic activity on PET substrate. *Materials Letters*. 60, 396-399.
- [9] Morito Akiyama, Yukari Morofuji, Toshihiro Kamohara, Keiko Nishikubo, Masayoshi Tsubai, Osamu Fukuda, and Naohiro Ueno. *Journal of Applied Physics* 100, 114318 (2006).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] N. I. Stas'kov and I. V. Ivashkevich. 2008. Optical Constants of Poly(ethylene terephthalate) in the Range of  $1410\text{-cm}^{-1}$  IR Absorption Band. *Polymer Science, Ser. B.* 50, 120–123.
- [11] S. Cho. *Journal of Crystal Growth*, vol. 326, no. 1, pp. 179–182, 2011.
- [12] S. D. Theiss, P. G. Carey, P.M. Smith, P. Wickboldt and T. W. Sigmon. *PolySilicon Thin Film Transistors Fabricated at  $100^{\circ}\text{C}$  on a Flexible Plastic Substrate*. Lawrence Livermore' National Laboratory P.O. Box 808, L-271, Livermore, CA 9455 1, USA
- [13] Young-Soon Kim, Young-Chul Park, S.G. Ansari, Jeong-Young Lee, Byung-Soo Lee, and Hyung-Shik Shin. 2003. Influence of  $\text{O}_2$  admixture and sputtering pressure on the properties of ITO thin films deposited on PET substrate using RF reactive magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 173, 299–308.
- [14] [Online].Available: <http://www.ajaint.com/whatis.htm>
- [15] [Online].Available: [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Scherrer\\_equation.com](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Scherrer_equation.com)
- [16] [Online].Available: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/AlN/basic.html>
- [17] [Online].Available: <http://www.prism.mit.edu/xray.htm>
- [18] [Online].Available: [www.vt-sun.com](http://www.vt-sun.com)



**ภาคผนวก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก 1

#### ขั้นตอนและวิธีการเปิดระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง

##### 1. ขั้นตอนการสร้างสภาวะสุญญากาศสูง

- 1) ตรวจสอบวาล์วทุกตัวอยู่ในสถานะปิด และวาล์วสามทางอยู่ในตำแหน่ง Isolated
- 2) เปิดเครื่องทำความเย็นให้พร้อมใช้งาน
- 3) เปิด Gauge display และปั๊ม โรตารี ปรับวาล์วสามทางให้อยู่ในตำแหน่ง Roughing
- 4) เปิดระบบทำความเย็นและเปิดฮีตเตอร์ปั๊มไอฟุ้งกระจาย พร้อมปรับวาล์วสามทางให้อยู่ในตำแหน่ง Backing
- 5) รอให้น้ำมันในปั๊มไอฟุ้งกระจายร้อนประมาณ 30 นาที ในขั้นตอนนี้ความดันใน Backing line จะอยู่ที่  $1.2 \times 10^{-2} - 1.4 \times 10^{-2}$  mbar
- 6) เมื่อปั๊มไอฟุ้งกระจายพร้อมใช้งานแล้ว ปรับวาล์วสามทางเป็นตำแหน่ง Roughing และทำให้ความดันใน Roughing line เป็น  $5 \times 10^{-3}$  mbar (หรือต่ำกว่า)
- 7) ปรับวาล์วสามทางกลับมาที่ตำแหน่ง Backing หลังจากนั้นเปิดวาล์วสุญญากาศสูง หรือ High Vacuum Valve ( Butterfly Valve )
- 8) เปิดเพนนิ่งเกจ และตรวจสลิปความดันของ Roughing Line ในขณะนั้นความดันจะต้องอยู่ในย่าน  $10^{-4}$  mbar
- 9) รอประมาณ 2 ชั่วโมง ความดันใน Roughing line จะลดลงไปจนถึงระดับ  $10^{-6}$  mbar
- 10) ทำความดันให้ได้  $5 \times 10^{-6}$  mbar (หรือต่ำกว่า) เพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการปลูกฟิล์ม

##### 2. ขั้นตอนการปลูกฟิล์ม

- 1) ปิดเพนนิ่งเกจ เปิด Mass flow controller เปิดระบบทำความเย็นให้แหล่งกำเนิดกำลังอาร์เอฟและหัวแมกนีตรอน
- 2) ปลดปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสุญญากาศโดยควบคุมความดันและอัตราการไหลของแก๊สด้วย Mass flow controller รุ่น SIERRA 810C ของบริษัท Sierra instrument ผ่านกล่องควบคุมและเปิดปิดการจ่ายแก๊สและกำลังคลื่นวิทยุที่สร้างขึ้นมา
- 3) ปลดปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปจนภายในห้องสุญญากาศมีความดันอยู่ในช่วง  $2.6 \times 10^{-2}$  ถึง  $2.8 \times 10^{-2}$  mbar (อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนประมาณ 60 sccm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) จ่ายไฟให้แหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุกำลัง 250 W โดยเปิด Matching ก่อน จากนั้นเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ขั้นตอนนี้ควรสังเกตสัญญาณคลื่นสะท้อน (Reflect) จากกล่องควบคุมและเปิดปิดการจ่ายก๊าซและกำลังคลื่นวิทยุ หากสัญญาณสะท้อนกลับมีค่ามากเกินไป (เกิน 1 Volt) ควรปิดแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุทันที
  - 5) เมื่อเกิดพลาสมาแล้วให้ปล่อยแก๊สในโตรเจนเข้าไปตามอัตราส่วนที่ต้องการทำการปลูกฟิล์ม หลังจากนั้นจึงค่อยลดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนลง
  - 6) ปลูกฟิล์มตามระยะเวลาที่ต้องการ ในขั้นตอนี้ควรสังเกตความดันขณะทำการปลูกจะมีค่าประมาณ  $2.2 \times 10^{-2}$  mbar และตรวจสอบระบบหล่อเย็นแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุและหัวแมกนีตรอน
  - 7) ปิดแหล่งจ่ายไฟแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ปิดการทำงานของ Mass flow controller
  - 8) ปิดระบบทำความเย็นหัวแมกนีตรอนและแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ
3. ขั้นตอนการปิดสถานะสุญญากาศสูง
- 1) ปล่อยแก๊สเข้าไปให้ความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-3}$  mbar
  - 2) ปิดวาล์วสุญญากาศสูง (Butterfly valve)
  - 3) ปิดฮีตเตอร์ของปั๊มไอฟุ้งกระจาย รอประมาณ 30 นาที ให้อุณหภูมิของน้ำมันในปั๊มลดลง แล้วจึงปิดระบบทำความเย็นของปั๊ม
  - 4) ปิดปั๊มโรตารี ปิดเกจวัดความดัน ปรับวาล์วสามทางให้อยู่ในตำแหน่ง Isolated
  - 5) ตรวจสอบว่าวาล์วและสวิตช์ทุกตัวอยู่ในสถานะปิด

# BE625P (BE1113) Integrated Plasma Driver

## Operation Manual



**Brounley**  
Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# BE625P (BE1113) Integrated Plasma Driver Operation Manual

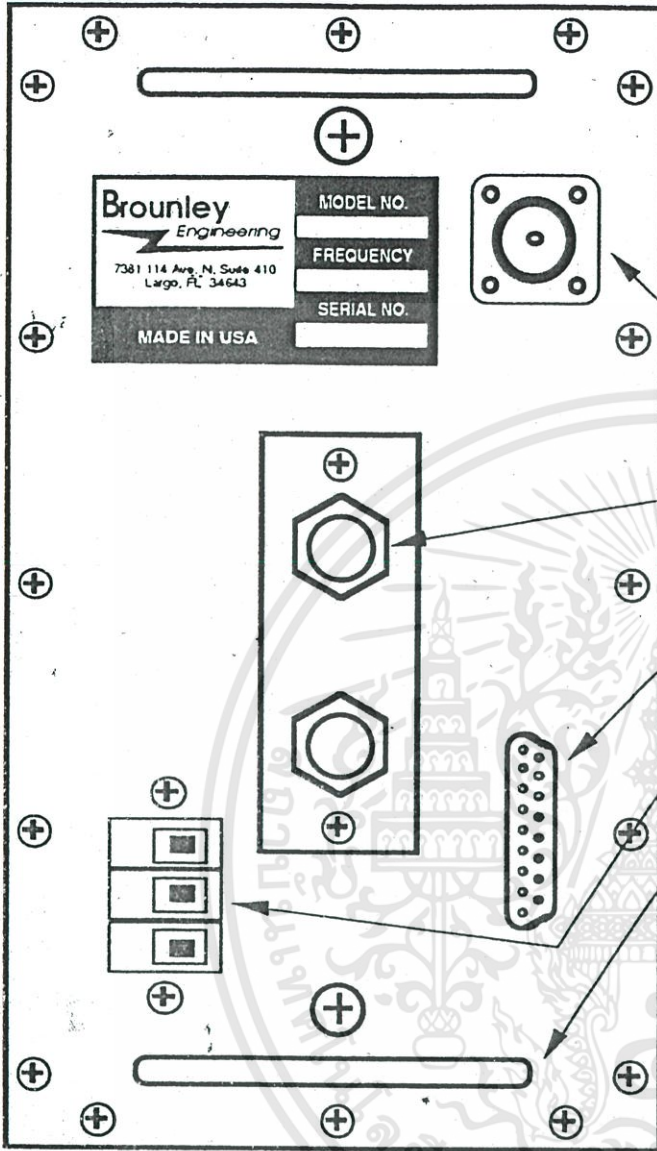
## Introduction

The BE625P Power Generator is a solid state, fully integrated power source designed to handle a wide variety of plasma etching applications. It will provide a maximum power output of 625W into a 50 ohm impedance. The model you have selected has been customized to your frequency and interface requirements.

## Specifications

Rated Power Output	625W into 50 ohms
Mismatched Protection	Protected for VSWR > 2:1 by folding back the forward power when the reflected power exceeds 100W.
Frequency/Stability	13.56MHz $\pm$ .005%
Harmonics	> 40dBc
Spurious Level	> 50dBc into any condition of mismatch.
Power Control Input	0-5VDC into 10K $\Omega$ Internally limited to 625W
Power Setpoint Stability & Repeatability	$\pm$ 5% over 12.5W-625W power control range
Power Control Range	17dB (12.5W-625W)
AC Power	110 - 220VAC $\pm$ 10% single phase at 11A max. Power factor corrected to .98
Cooling	Water flow rate of 1.5gpm at inlet temperature of 30°C max. Max. ambient temperature of 35°C
Size and Weight	5" X 9" X 12", approx. 18 lbs. (8 kg)
Overcurrent Protection	Hic-cup current limiting for current exceeding the normal maximum current by 25%. Will not activate under any normal operating conditions including mismatched loads. Indicates a need for service.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Front Panel

RF OUT

WATER CONNECTIONS

INTERFACE CONNECTOR

AC TERMINAL

HANDLES

25 pin submin. D connector Function

- 1 +15V - limited to 25mA max.  $R_L = 600\Omega$  min.
- 2 REFL. PWR. Voltage level depends on VSWR:  $V_r + 1/1 - \frac{V_r}{V_f}$  Load Impedance =  $10K\Omega$  min.
- 3 FWD. PWR. 0-5V Load Impedance =  $10K\Omega$  min.
- 4 D.C.P.S. ENABLE +5V "on", 0V "off" into  $10K\Omega$
- 5 POWER CONTROL 0-5V  $R_L = 10K\Omega$
- 6 GROUND
- 7 SPARE
- 8 SPARE
- 9 SPARE
- 10 SPARE
- 11 SPARE
- 12 GROUND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Safety

The BE625P should never be operated in a manner inconsistent with the procedures and specifications documented in this manual. Improper operation may cause personal injury or damage to the unit and will void the warranty. Brounley Associates assumes no responsibility for any unit operated improperly or repaired/modified by personnel not authorized by Brounley to service the BE625P.

The unit is designed to be laid on any side or rack mounted. If the unit must be mounted or operated with the front panel facing upwards, special care should be used to ensure a proper water connection is made with no leakage. Failure to do so may result in damage to the unit.

## Installation

### Initial Inspection

If damage to the shipping carton is evident, request the carrier's agent be present when the unit is unpacked. Check the unit visually for damage. Retain the shipping carton and packing material should a return become necessary.

**NOTE:** If the unit shows signs of damage or fails to meet any of the specifications found in this manual, please contact Brounley Associates immediately. If you are returning a unit to us, use the original shipping carton and packing materials if possible.

### Placement

Lay the unit on one of its sides or place it in a rack mounting cabinet (rack-mount models only).

## **Connecting the Water Chiller**

The BE625P requires two 1/4" NPT male water connections. The chiller must be set to 30°C at a flow rate of 1.5 gpm. Secure fittings to the generator using Teflon pipe tape or pipe dope and check for leaks before proceeding.

Distilled water should be used to eliminate possible build-up of corrosion or scale inside the heatsink tubing, thereby restricting water flow. If tap water with a high mineral content must be used, it may be necessary to periodically flush the unit by pumping a commercial lime or scale removing agent through the unit.

## **Connecting the Interface**

Connect your system interface to the BE625P interface using a standard 25 pin Sub D connector cable (male/female). The individual pin functions can be found in the "Specifications" section at the beginning of this manual as well as in the RF Control schematic. A remote control unit is available from Brounley Associates if you wish to operate the unit outside of your system.

## **Connecting the RF Output**

Connect the unit to your load. The BE625P generator requires a type "N" male 50 ohm coaxial cable connector for connection to the load. Use a Teflon RG393A/U cable or equivalent.

## **Connecting the AC Line**

The 110/220V AC line is connected to the three feedthru terminal blocks on the front panel of the BE625P generator. The center terminal block is connected to ground. The other two terminals are interchangeable. Be sure no bare wire is exposed and connections are secure and use only a well insulated cable rated for use at 110/220V, 15A.

# Operating the Generator

## Turn on Procedure

- 1) Turn on the water. Ensure that proper flow has been established before proceeding.
- 2) Plug in AC line power cable.
- 3) Turn on the +5V to enable the DC Power Supply.
- 4) Adjust the output power to the desired level by applying the correct voltage to the Power Control input. Use the Power output vs. DC Control voltage data provided in this manual.

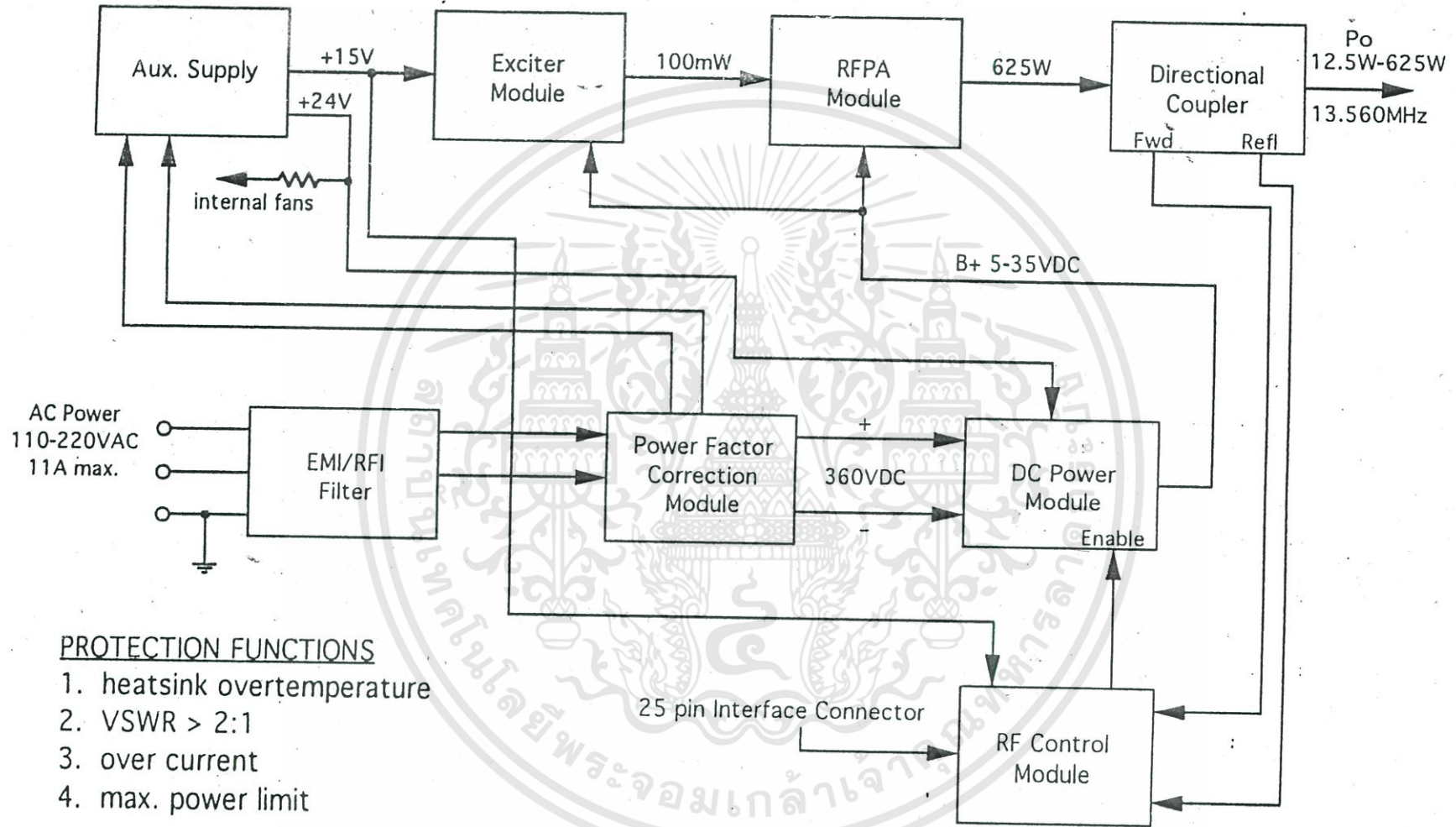
The Forward Power Monitor voltage ( $V_f$ ) gives the same voltage reading as the DC Control voltage and can therefore be used to monitor the power output of the unit. It will vary into a VSWR however as dictated by the foldback protection when the VSWR exceeds 2:1.

## Shut Down Procedure

- 1) Turn off the unit by returning the DC Power Supply enable to 0V.
- 2) Disconnect the AC line if the unit is to be left off for an extended period of time.
- 3) Turn off the water.

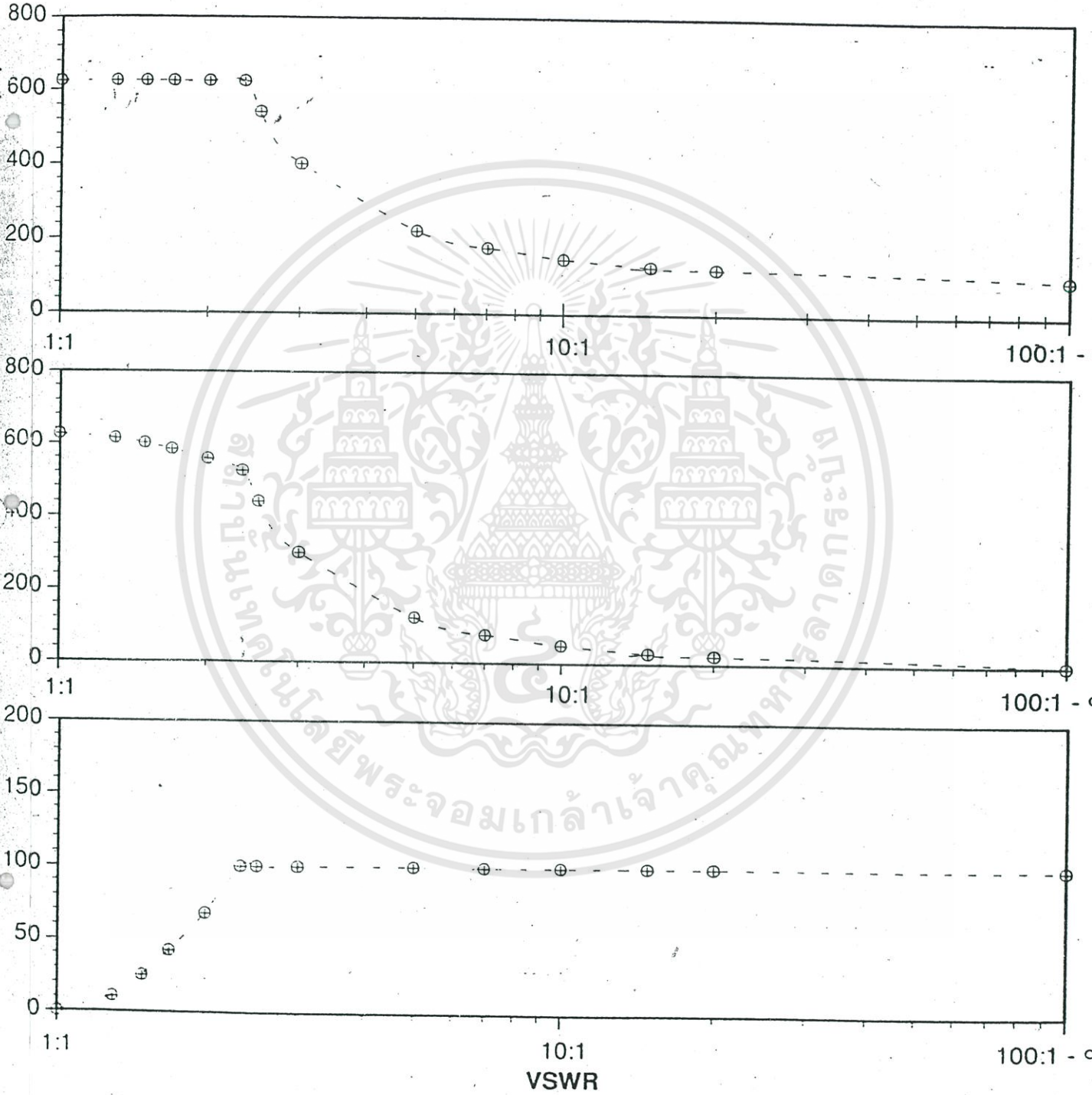
NOTE: Do not leave the water on for extended periods of time with the RF disabled. This can cause a build up of condensation inside the unit housing.

# BE625 Block Diagram



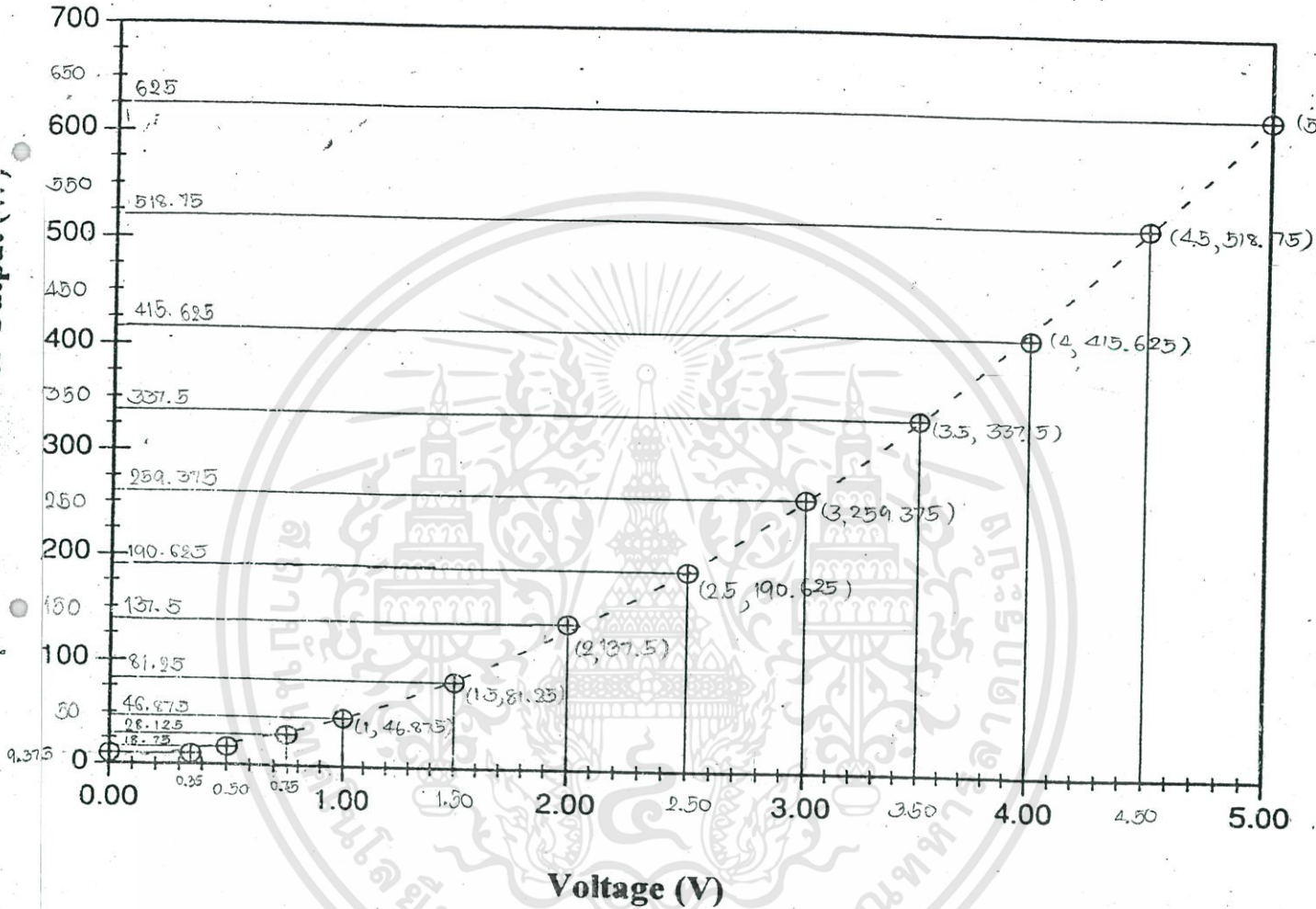
# BE625 Forward, Load & Reflected Power Vs. VSWR

Power Max. = 100W



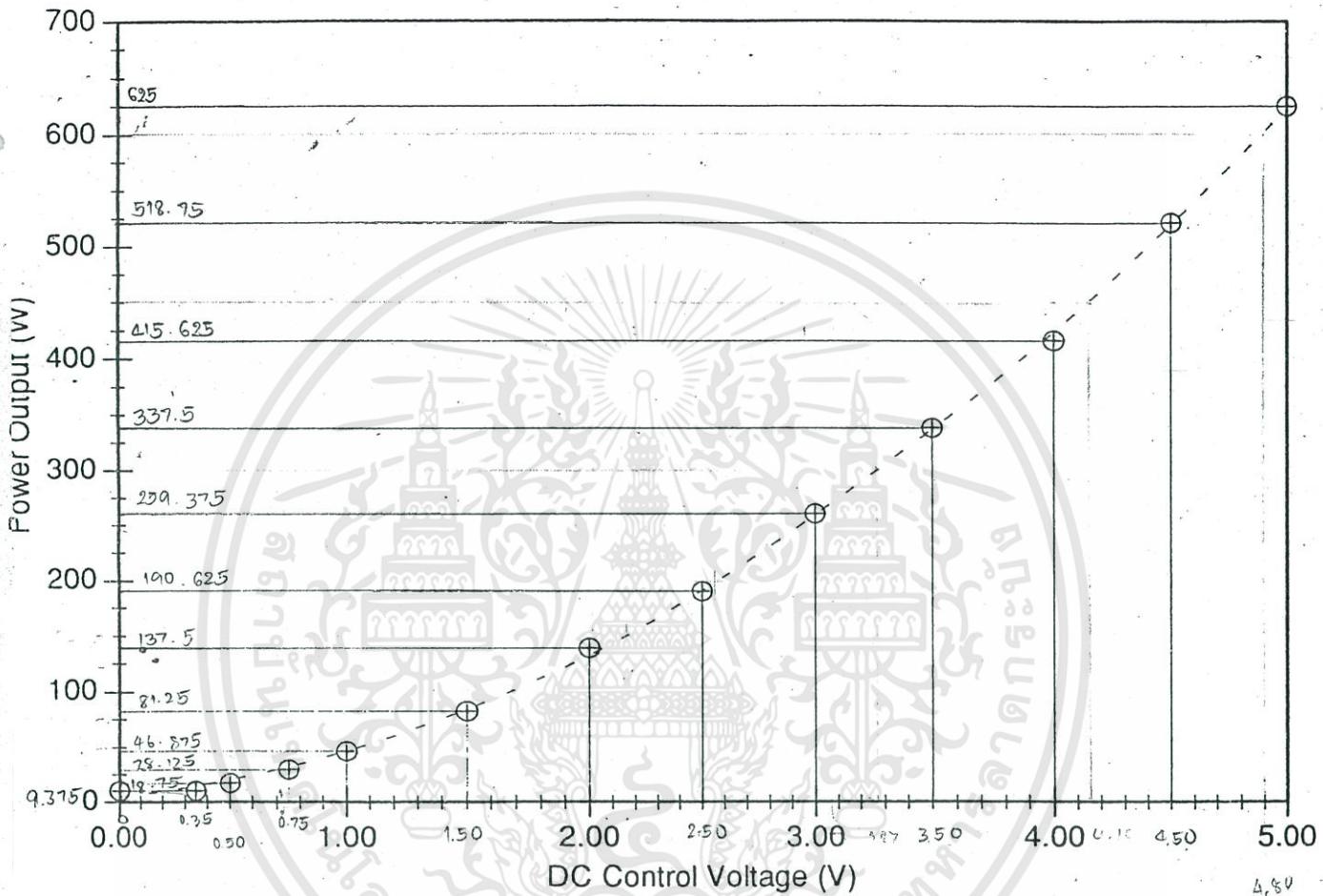
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## REFLECTED POWER VS. VOLTAGE OUTPUT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Power Output Vs. Control Voltage



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sierra Instruments, Inc.  
 5 Harris Court, Bldg. L  
 Monterey, CA 93940

File Name : c:\records\RC130023\130023

Test Date: 1/14/2010

Print Date: 1/14/2010

Due Date: 1/14/2011

Device Under Test

Ambient Conditions

Customer Code: 113308  
 Model#: 810C-NR-2-V1-S1  
 Serial No.: 130023  
 Accuracy: 1.5% FS  
 Bypass: LFE  
 Orifice: .010

Gas Temperature: 21.1 Degrees C  
 Room Temperature: 21.7 Degrees C  
 Ambient Pressure: 763.26 mm Hg  
 Back Pressure: 1.064 In H2O  
 Relative Humidity: 46.18 Percent

Master

STP

Serial Number: None  
 Full Scale Flow: 50 SCCM

Temperature: 21.1 Degrees C  
 Pressure: 760.00 mm Hg

GAS DATA

%	Density	N	Cp	Name
100.00	1.250	1.000	0.248	Nitrogen, N2

Test Gas: Nitrogen, N2  
 Calculated K Factor is: 1.000

DATA

Full Scale Flow: 50 SCCM

Voltage VDC	Indicated Flow SCCM	Actual Flow SCCM	Error % Full Scale	Error % Reading
0.000	0.000	0.000	0.0	0.0
1.265	12.646	12.659	-0.0	-0.1
2.520	25.195	25.176	0.0	0.1
3.760	37.598	37.397	0.4	0.5
5.010	50.098	49.985	0.2	0.2

Device Information

Vacuum Test: N/A x 10<sup>-9</sup> Atm cc/sec (He)

Fittings: 1/4" COMP

Inlet Pressure: 1 BAR G

Outlet Pressure: -30" HG G

Meter O-Rings: VITON  
Serial Number: 130023

Valve Seat material: VITON  
Test Date: 1/14/2010

----- Test Equipment -----

Cal Bench Asset No.: 0126  
%RH Meter Asset No.: 0736  
DVM(s) Asset No.: 0054

Barometer Asset No.: 0698  
Thermometer Asset No.: 0736

----- Comments -----

0-5 VDC OUTPUT/COMMAND SIGNAL  
24 VDC INPUT POWER

Calibration Technician: \_\_\_\_\_

DON BISHOP

*Don Bishop*

Date: JAN 14,

Verified By: \_\_\_\_\_

*Alisa Kistana*

Date: JAN 15, 2010

This Cal=Bench was calibrated with NIST-traceable equipment and in conformance with the provisions of ANSI/NCSL Z540 and ISO/IEC Guide 25. Applicable NIST traceable numbers are available upon request.

The accuracy of this equipment is 0.2% of reading.

Suggested recalibration due dates for the following critical items are:

The Cal=Bench System: 12/31/2011 D/A and A/D converters: 12/31/2010

Glass Tube Diameters: 12/31/2011 System Clock: 12/31/2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ประสงค์ออกหนังสือ สิ่งนี้ช่วยผู้ใช้ข้อมูลแบบเบ็ดเสร็จ และช่วยลดความเสี่ยงด้วยเอกสารที่เชื่อถือได้

Sierra Instruments, Inc.  
 5 Harris Court, Bldg. L  
 Monterey, CA 93940

File Name : c:\records\RC130022\130022 ✓

Test Date: 1/14/2010

Print Date: 1/14/2010

Due Date: 1/14/2011

Device Under Test	Ambient Conditions
Customer Code: 113308	Gas Temperature: 21.3 Degrees C
Model#: 810C-NR-2-V1-S1	Room Temperature: 21.7 Degrees C
Serial No.: 130022	Ambient Pressure: 762.16 mm Hg
Accuracy: 1.5% FS	Back Pressure: 1.083 In H2O
Bypass: LFE	Relative Humidity: 46.18 Percent
Orifice: .010	

Master	STP
Serial Number: None	Temperature: 21.1 Degrees C
Full Scale Flow: 100 SCCM	Pressure: 760.00 mm Hg

----- GAS DATA -----

%	Density	N	Cp	Name
100.00	1.782	1.040	0.124	Argon, Ar

Test Gas: Argon, Ar  
 Calculated K Factor is: 1.000

----- DATA -----

Full Scale Flow: 100 SCCM

Voltage VDC	Indicated Flow SCCM	Actual Flow SCCM	Error % Full Scale	Error % Reading
0.000	0.000	0.000	0.0	0.0
1.259	25.171	25.006	0.2	0.7
2.512	50.244	50.084	0.2	0.3
3.764	75.283	75.105	0.2	0.2
5.017	100.334	100.119	0.2	0.2

----- Device Information -----

Vacuum Test: N/A x 10<sup>-9</sup> Atm cc/sec (He)

Fittings: 1/4" COMP

Inlet Pressure: 1 BAR G

Outlet Pressure: -30" HG G

Meter O-Rings: VITON  
Serial Number: 130022

Valve Seat material: VITON  
Test Date: 1/14/2010

----- Test Equipment -----

Cal Bench Asset No.: 0126  
RH Meter Asset No.: 0736  
DVM(s) Asset No.: 0054

Barometer Asset No.: 0698  
Thermometer Asset No.: 0736

----- Comments -----

C-5 VDC OUTPUT/COMMAND SIGNAL  
24 VDC INPUT POWER

Calibration Technician: \_\_\_\_\_

DON BISHOP

*Don Bishop*

Date: JAN 14,

Verified By: \_\_\_\_\_

*Aisa Kham*

Date: \_\_\_\_\_

Jan 15, 2010

This Cal=Bench was calibrated with NIST-traceable equipment and in conformance with the provisions of ANSI/NCCL Z540 and ISO/IEC Guide 25. Applicable NIST traceable numbers are available upon request.

The accuracy of this equipment is 0.2% of reading.  
Suggested recalibration due dates for the following critical items are:  
The Cal=Bench System: 12/31/2011 D/A and A/D converters: 12/31/2010  
Glass Tube Diameters: 12/31/2011 System Clock: 12/31/2010

## ข้อมูล Control Voltage VS. Power Output

$$y = 0.0093x^6 - 0.2825x^5 + 3.168x^4 - 16.204x^3 + 57.793x^2 - 8.9767x + 8.7847$$

เส้นแนวโน้ม ( สมการพหุนามลำดับที่ 6 )

ข้อมูลจากกราฟ

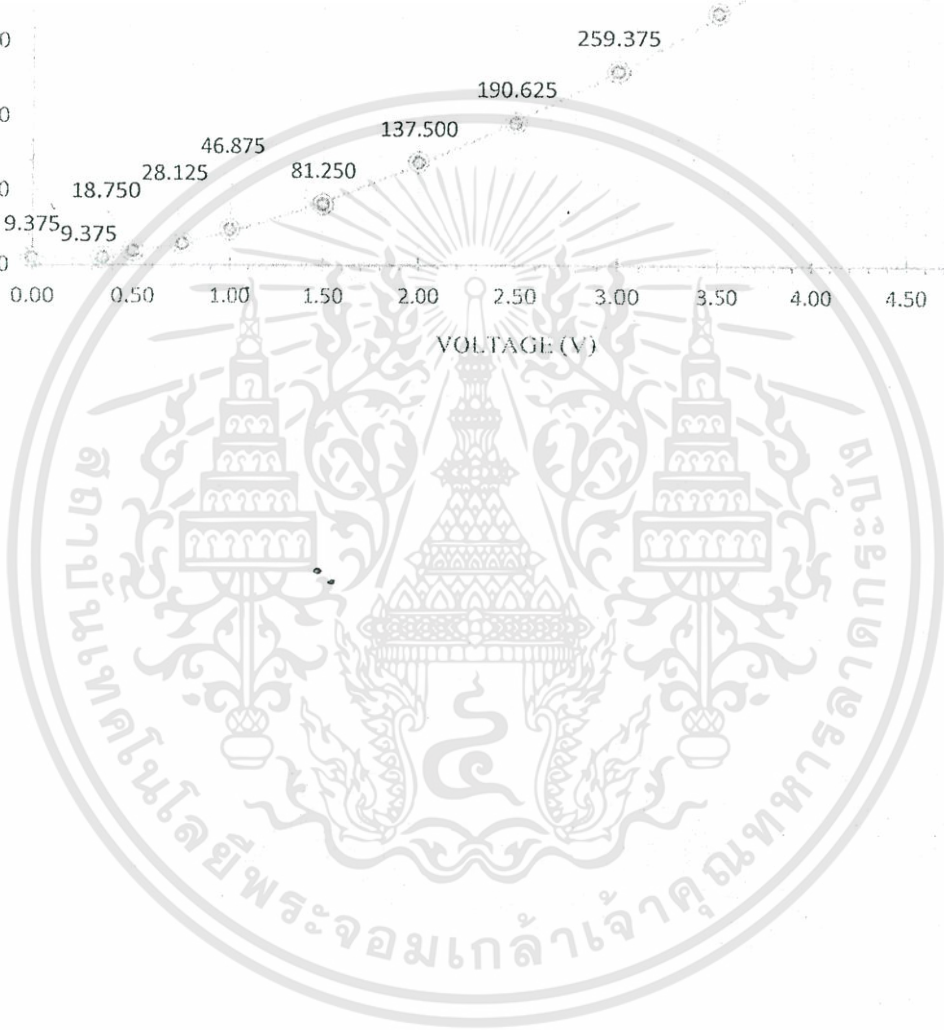
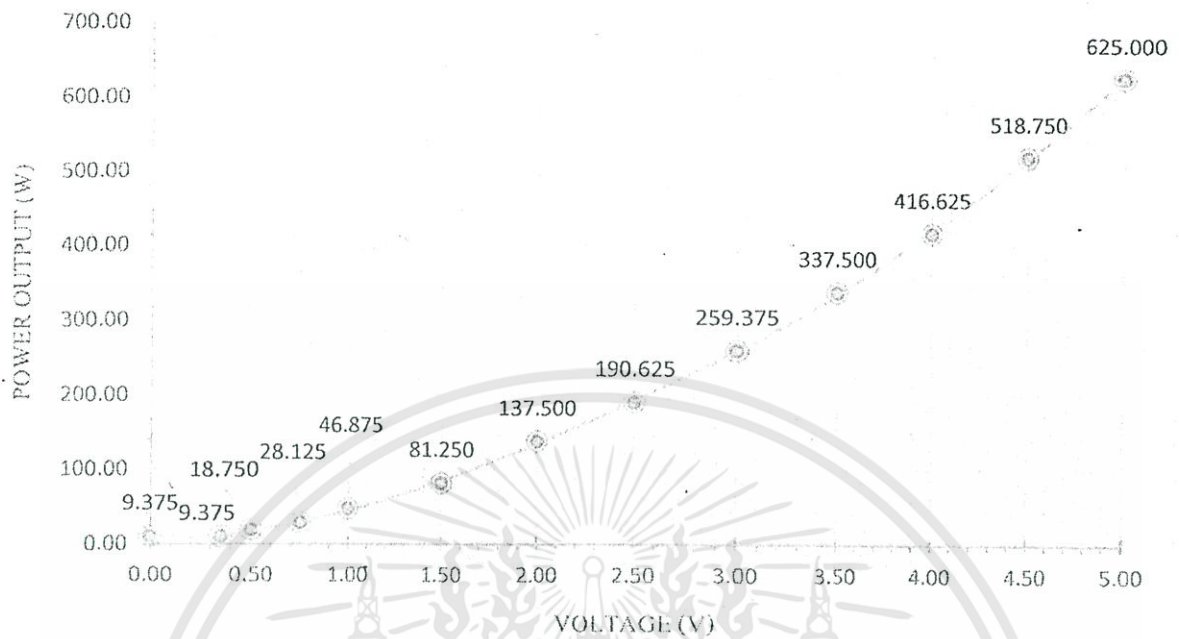
DC Control Voltage (V)	Power Output (W)
0.00	9.375
0.35	9.375
0.50	18.750
0.75	28.125
1.00	46.875
1.50	81.250
2.00	137.500
2.50	190.625
3.00	259.375
3.50	337.500
4.00	416.625
4.50	518.750
5.00	625.000

ข้อมูลจากการคำนวณเส้นแนวโน้ม

Control Voltage	Power Output
0.00	8.7847
0.20	9.1764
0.40	13.4821
0.60	21.0931
0.80	31.5019
1.00	44.2918
1.20	59.1281
1.40	75.7487
1.60	93.9561
1.80	113.6089
2.00	134.6145
2.20	156.9216
2.40	180.5137
2.60	205.4025
2.80	231.6222
3.00	259.2238
3.20	288.2703
3.40	318.8318
3.60	350.9815
3.80	384.7917
4.00	420.3307
4.20	457.6597
4.40	496.8304
4.60	537.8828
4.80	580.8440
5.00	625.7262



## POWER OUTPUT VS. CONTROL VOLTAGE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้