

การพัฒนาาระบบเครื่องสputteringแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีส่วนควบคุมปริมาณ  
การไหลของแก๊สปฏิกิริยาเพื่อสร้างฟิล์มบางระดับนาโนเมตร

DEVELOPMENT OF DIRECT CURRENT SPUTTERING SYSTEM WITH REACTIVE  
GAS CONTROLLER FOR NANOSTRUCTURED THIN FILM DEPOSITION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF DIRECT CURRENT SPUTTERING SYSTEM WITH  
REACTIVE GAS CONTROLLER FOR NANOSTRUCTURED  
THIN FILM DEPOSITION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MON GKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาระบบเครื่องสputteringแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีส่วนควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สปฏิกิริยาเพื่อสร้างฟิล์มบางระดับนาโนเมตร

Special Project Title Development of Direct Current Sputtering System with Reactive Gas Controller for Nanostructured Thin Film Deposition

นักศึกษา นายจิรพัฒน์ กฤษณาเรืองชัย

รหัสประจำตัว 57110006



ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. เบญจพล ตันอู๋

คณะกรรมการสอบโครงการ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วณิชชา เมฆประสาธ	
ผศ.ดร.กรกช อ่อนละอ	
รศ.ดร.เบญจพล ตันอู๋	เบญจพล ตันอู๋

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การพัฒนาาระบบเครื่องสปีดเตอริงแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีส่วนควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สปฏิกิริยาเพื่อสร้างฟิล์มบางระดับนาโนเมตร
นักศึกษา	นายจิรพัฒน์ กฤษฏาเรืองชัย
รหัสนักศึกษา	57110006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล ตันธุ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องสปีดเตอริงแมกนีตรอนแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีส่วนการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน โดยการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จากผลการทดลองพบว่าจะสามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนได้ในช่วง 0-10 ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐาน จากการปลูกฟิล์มบางจากเป้าที่เป็นโลหะสังกะสีโดยใช้เวลาในการปลูก 8 ชั่วโมง เมื่อการปรับเปลี่ยนปริมาณแก๊สอาร์กอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยาที่ 2, 5, และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐาน พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาอยู่ที่ 76, 101 และ 139 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยเมื่ออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูงขึ้นจะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาของฟิล์มบางมากขึ้นด้วย จากการตรวจสอบความเป็นผลึกของฟิล์มด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ จะพบยอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 31 และ 36 องศา ซึ่งเป็นมุมการเลี้ยวเบนของวัสดุสังกะสีออกไซด์ แสดงว่าระบบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางระดับนาโนเมตรได้

Special project title	Development of Direct Current Sputtering System with Reactive Gas controller for Nanostructured Thin Film Deposition
Student	Mr. Jirapat Kritsadaruangchai
Student ID	57110006
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nano Material Engineering
Year	2016
Special project advisor	Assoc.Prof.Dr. Benchapol Tunhoo

### ABSTRACT

This special project is studied and developed a direct current sputtering system with argon gas controller. The volume of Ar gas was controlled by mass flow controller with digital to analog converter circuit. The Arduino microcontroller was used as main controller unit. The flow rate of Ar gas can be adjusted in range of 0 to 10 SCCM. To deposit film, the 99.99% Zn metal was used as sputtering target. With Ar gas at flow rate of 2, 5 and 10 SCCM at deposit time of 8 hour, the thickness of deposited films was observed at 76, 101 and 139 nm, respectively. It can be seen that the value of Ar gas was affected to thickness of deposited films. Results from X-ray diffraction exhibited two diffraction peaks at 31 and 36 degree that corresponds to the crystalline structure of ZnO films. Therefore, this deposition system can be used to prepare nanostructured thin films.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เบญจพล ต้นธุ์ ที่คอยประสานงานด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติการให้ควบคู่กันไป ทั้งคำปรึกษา แนวทาง วิชาการความรู้ที่ถูกต้อง และรวมไปถึงด้านงบประมาณของโครงการพิเศษนี้ และขอขอบคุณสมาชิก Electronics and Control for Nanodevice Research Laboratory (ECSN Lab) ที่คอยให้ความช่วยเหลือได้แก่ ผศ.ดร.ทศิตยาภรณ์ ทิววงศ์, ดร.กรกช อ่อนลออ, นายโพธิญาณ สองแก้ว และว่าที่ร้อยตรีดิเรกฤทธิ์ จันทรวงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาเพิ่มเติมและความสามารถในการใช้อุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เครื่อง 3D Printing, เครื่อง Computer Numerical Control (CNC), เครื่อง Multimeter, เครื่อง Mass flow controller (MFC), Rotary pump, Diffusion pump และอุปกรณ์สำหรับทำแผนวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ เพื่อให้โครงการพิเศษนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีตามตารางเวลาที่ได้วางไว้

จิรพัฒน์ กฤษฎาเรืองชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vi
สารบัญตาราง.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตทางการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 รายละเอียดงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การปลูกฟิล์มบาง.....	3
2.1.1 กระบวนการระเหยสารด้วยวิธีทางกายภาพ.....	3
2.1.2 กระบวนการระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี.....	4
2.2 ระบบสปีดเตอริง.....	6
2.2.1 ระบบพลาสมา.....	7
2.2.2 ระบบสปีดเตอริงแบบกระแสตรง.....	7
2.2.3 ระบบสปีดเตอริงแบบคลื่นวิทยุ.....	7
2.2.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของการสปีดเตอริงด้วยแมกนีตรอน.....	8
2.3 ระบบสุญญากาศ.....	9
2.3.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ.....	9
2.3.2 ระบบวัดความดันสุญญากาศ.....	11
2.3.2.1 เครื่องวัดค่าสุญญากาศด้วยการอ่านความดัน.....	11
2.3.3 ระบบควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในสุญญากาศ.....	13
2.4 การวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....	13
2.4.1 เทคนิคการวัดสมบัติทางโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	13
2.4.2 เทคนิคการวัดการทะลุผ่านแสง.....	14
2.4.3 เทคนิคการวัดลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 ทบทวนวรรณกรรม .....	15
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 ออกแบบแผนผังของระบบทั้งหมด .....	17
3.2 เตรียมแผ่นกระจกสไลด์.....	19
3.2.1 เตรียมแผ่นกระจกสไลด์ DAMI.....	19
3.3 ระบบสุญญากาศ.....	20
3.3.1 สุญญากาศระดับหยาบ.....	20
3.3.2 สุญญากาศระดับสูง.....	20
3.3.3 ระบบวาล์ว.....	23
3.4 ระบบจ่ายไฟกระแสตรงสปีดเตอร์ริง .....	25
3.5 วิธีการปลูกฟิล์ม.....	25
บทที่ 4 วิเคราะห์และอภิปรายผล .....	27
4.1 การพัฒนาระบบและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น.....	27
4.1.1 เครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊สอาร์กอน .....	27
4.2 ผลของฟิล์มบาง.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน .....	36
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	36
5.2 แนวทางในการพัฒนาระบบสปีดเตอร์ริง .....	36
5.2.1 ระบบอัตราการไหลแก๊สแบบผสม .....	36
5.2.2 เครื่องสปีดเตอร์ริงแมกนีตรอนไฟฟ้ากระแสตรงแบบจิ้งหะ.....	36
บรรณานุกรม.....	37
ประวัติผู้เขียน.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างฟิล์มบางของแต่ละมิติ .....	3
2.2 ระบบสปีดเตอริง .....	6
2.3 ระบบสปีดเตอริงกระแสตรง .....	7
2.4 ระบบสปีดเตอริงแบบคลื่นวิทยุ.....	8
2.5 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบแมกนีตรอน .....	9
2.6 แสดงการทำงานของปั๊มโรตารีแบบใบกวาด.....	10
2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของปั๊มแรงดันไอแพร์.....	11
2.8 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในสุญญากาศ (Mass flow controller) ยี่ห้อ Tylan รุ่น 2900 FC-2950MEP5 .....	13
2.9 อธิบายการเคลื่อนที่ของรังสีเอกซ์ .....	13
2.10 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	15
3.1 ไดอะแกรมแผนผังงานการดำเนินงานของผู้วิจัย .....	16
3.2 แผนผังของระบบสปีดเตอริงไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ...	17
3.3 ส่วนประกอบของระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	17
3.4 (ก) สวิตช์เซ็นเซอร์วัดแรงดันลม (ข) สวิตช์เซ็นเซอร์วัดความร้อน .....	18
3.5 รีเลย์สวิตช์.....	19
3.6 แผ่นกระจกสไลด์และฐานรองรับ .....	19
3.7 ปั๊มโรตารี ยี่ห้อ Edward รุ่น 18 E1M18.....	20
3.8 กดปุ่มหมายเลข 1 .....	20
3.9 หม้อแปลง 3 เฟส 110 โวลต์.....	21
3.10 เครื่องให้ความเย็น รุ่น BL-30.....	21
3.11 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	22
3.12 กดปุ่มหมายเลข 2 .....	22
3.13 กดปุ่มหมายเลข 3 .....	23
3.14 วาล์วควบคุมทิศทาง เครื่องกรองอากาศ และเซ็นเซอร์วัดแรงดันลม.....	23
3.15 เครื่องปั๊มลมยี่ห้อ NORVAX .....	24
3.16 สวิตช์เปิดปิดและวาล์วคันโยกมือของปั๊มลม .....	24
3.17 (ก)ตัวปรับค่าแรงดัน (ข)วงจรรดับเบิ้ลโวลต์.....	25
4.1 ส่วนควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า 0 ถึง 5 โวลต์ ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า +15 และ -15 โวลต์ จากหม้อแปลง 220 โวลต์ .....	28
4.3 ผลของการเกิดพลาสมาที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการไหลของแก๊ส.....	28
4.4 สีของพลาสมาแรงดันไฟฟ้า 550 โวลต์ ที่อัตราการไหลแก๊สอาร์กอนต่างกัน.....	29
4.5 (ก)ภาพ SEM แบบ Top-view ของฟิล์มในอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM (ข) 5 SCCM และ(ค) 10 SCCM.....	29
4.5 (ต่อ) (ก)ภาพ SEM แบบ Top-view ของฟิล์มในอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM, (ข) 5 SCCM และ(ค) 10 SCCM.....	30
4.6 ภาพ SEM แบบภาพตัดขวางของฟิล์มในอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ (ก) 2 SCCM (ข) 5 SCCM (ค) 10 SCCM .....	31
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาและปริมาณของแก๊สอาร์กอน.....	32
4.8 (ก) กราฟ X-Ray Diffraction ของฟิล์มที่มีอัตราการไหลแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM (ข) 5 SCCM (ค) 10 SCCM .....	33
4.8 (ต่อ) (ก) กราฟ X-Ray Diffraction ของฟิล์มที่มีอัตราการไหลแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM (ข) 5 SCCM (ค) 10 SCCM.....	34
4.9 ผล X-Ray Diffraction ที่ใช้เปรียบเทียบกับผลฟิล์มบาง .....	35

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปกระบวนการระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี .....5
3.1	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ..... 26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เมื่อกล่าวถึงฟิล์มบาง (Thin film) ในปัจจุบันฟิล์มมีขนาดระดับตั้งแต่ไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตรแล้วยังสามารถเพิ่มและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำไปเคลือบฟิล์มบางได้ทั้งกรรมวิธีแบบทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลต่อหน้าพื้นผิวของวัสดุที่จะนำไปเคลือบฟิล์มบางน้อยที่สุด แล้วนำไปเคลือบลงบนวัสดุด้วยกรรมวิธีเทคนิคต่างๆ โรงงานอุตสาหกรรมในโลกตอนนี้มีหลายเทคนิคหลายวิธีในการทำฟิล์มหรือเคลือบฟิล์ม ซึ่งจะเลือกและใช้ในความต้องการของผู้ผลิตและความเหมาะสมของชิ้นงานนั้น โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบ่งได้เป็นสองประเภทได้แก่ การตกเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition) คือการเคลือบผิววัสดุด้วยสารเคมีที่ใช้กระบวนการกรรมวิธีระเหยสารทางกายภาพโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมีของสารเคมีที่นำมาใช้เคลือบแล้วยังไม่ทำให้สูญเสียรูปร่างของวัสดุ โดยมีเทคนิคต่อไปนี้ เช่น Cathodic Arc, Magnetron Sputtering, Electron Beam, Hollow Cathode Discharge เป็นต้น และการตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition) คือ การเคลือบผิววัสดุด้วยสารเคมีที่ใช้กระบวนการกรรมวิธีระเหยสารทางเคมี โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารตั้งต้นควบคู่กันไปกับผิววัสดุหรือสารตั้งต้นกันอย่างเดียวเหนือผิววัสดุก่อนตกลงไปบนหน้าผิววัสดุ

สำหรับโรงงานพิเศษนี้ผู้ทํารวจยุติถึงเทคนิคการเคลือบฟิล์มหรือวัสดุด้วย เทคนิคสปีดเตอริง คือระบบการปลูกฟิล์มบางโดยใช้พลังงานสนามไฟฟ้าในระบบสุญญากาศ ที่มีความต่างศักย์กันสูงมาก ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสี่แบบ คือ สปีดเตอริงไฟฟ้ากระแสตรง, สปีดเตอริงไฟฟ้ากระแสตรงแบบจิ้งหะ, สปีดเตอริงแบบคลื่นวิทยุ และ สปีดเตอริงแบบแมกนีตรอน ซึ่งแต่ละแบบมีความสามารถและความเหมาะสมของวัสดุแตกต่างกันออกไป โดยโรงงานพิเศษนี้ผู้วิจัยจะทำการพัฒนาเครื่องสปีดเตอริงไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน และยังเป็น การนำอุปกรณ์ที่เหลือใช้หรือที่ปลดระวางแล้วสามารถนำมาพัฒนาเพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรของอุปกรณ์ที่มีอยู่ให้ถึงขีดสุด และเป็นการประหยัดต้นทุนในการดำเนินการทำงานวิจัยชิ้นนี้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพัฒนาระบบการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปีดเตอริงไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปีดเตอริงไฟฟ้าด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตทางการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยสำหรับการพัฒนาระบบการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปตโตริงไฟฟ้า กระแสตรงด้วยการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ในที่สุญญากาศระดับกลาง (Medium vacuum) และศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปตโตริงไฟฟ้า กระแสตรงด้วยการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน และศึกษาฟิล์มด้วยเครื่อง X-ray diffraction และเครื่อง scanning electron microscope

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้การปฏิบัติงานทางเทคนิคของเครื่องสเปตโตริงไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน และระบบสุญญากาศ
2. ได้รู้และวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบทั้งสเปตโตริงไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน และระบบสุญญากาศ

### 1.5 รายละเอียดงานวิจัย

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเป็นที่ทฤษฎีที่ผู้วิจัยต้องนำไปประกอบในการดำเนินการทำงานวิจัยทั้งในทางภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยเพื่อสร้างระบบสุญญากาศระดับกลาง ระบบสเปตโตริงไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการสร้างระบบสุญญากาศ ระบบสเปตโตริงไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและฟิล์มบางที่ได้จากระบบสเปตโตริงไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานวิจัยขึ้นนี้และขอเสนอแนะที่ควรดำเนินการในภายภาคหน้า

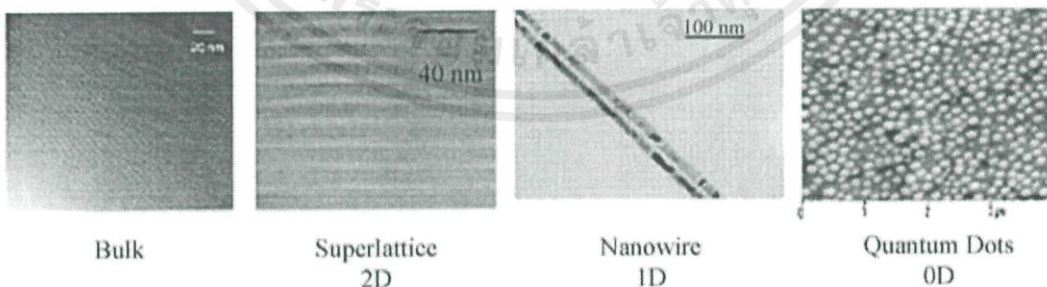
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การปลูกฟิล์มบาง

ฟิล์มบางเป็นฟิล์มที่มีขนาดอยู่ในช่วงระดับนาโนเมตร ถ้าใหญ่กว่านาโนเมตรจะเป็นฟิล์มที่มีความหนาในระดับไมโครเมตรไม่ถือว่าเป็นฟิล์มบาง การปลูกฟิล์มนั้นเกิดจากการทับถมของอะตอมของธาตุหรือสารประกอบบนพื้นผิวหนึ่งหรือเรียกว่า ฐานรองรับ (Substrate) จะคอยรองรับอะตอมที่ตกลงมาจากกระบวนการปลูกฟิล์มต่างๆที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน โดยปัจจุบันกระบวนการปลูกฟิล์มได้ก้าวหน้าและพัฒนาไปไกลมากขึ้นเพราะวิศวกรรมทางวัสดุสามารถคิดหาวิธีต่างๆ เพื่อเพิ่มความเหมาะสมให้กับชิ้นงานต่อความต้องการของการใช้งาน และยังรวมถึงเพิ่มคุณสมบัติของฟิล์มได้เมื่อสารที่นำมาสังเคราะห์มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรทำให้เพิ่มคุณสมบัติกับฟิล์มบางได้แก่ ทางกายภาพ, ทางเคมี, ทางไฟฟ้า, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, ความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น โดยวัสดุที่นำมาปลูกฟิล์มบางเป็นได้ทั้ง โลหะ, เซรามิกซ์, พอลิเมอร์และสารประกอบ

การเคลือบฟิล์มบางหรือการปลูกฟิล์มจะใช้กระบวนการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบนฐานรองรับ ซึ่งฟิล์มบางสามารถประกอบได้ด้วย สารประกอบเนื้อเดียว สารประกอบที่มีเฟสเป็นผลึก จนทำให้เกิดสารประกอบระดับนาโนจนทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ตามรูปที่ 2.1 จะเป็นรูปที่บอกถึงลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางที่เกิดขึ้นจะแบ่งเป็นตามมิติตามรูปภาพ และทางวิศวกรรมได้พัฒนาการปลูกฟิล์มบางได้หลายวิธี ได้แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1.การตกเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (Physical vapor deposition) 2.การตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical Vapor-Deposition)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างฟิล์มบางของแต่ละมิติ [1]

#### 2.1.1 กระบวนการระเหยสารด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition)

กระบวนการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางกายภาพ ครอบคลุมความหลากหลายรูปแบบของเทคโนโลยีและเป็นคำที่ใช้ในการอธิบายถึงวิธีการต่างๆ ในการปลูกฟิล์มบาง โดยการควบแน่นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่เป็นรูปไอของวัสดุแข็งลงบนพื้นผิวต่างๆหรือฐานรองรับกระบวนการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางกายภาพ เกี่ยวข้องกับการทำเป็นไอด้วยวิธีทางกายภาพของวัสดุเป็นอะตอมหรือโมเลกุลและการควบแน่นและการสร้างอะตอมของอะตอมเหล่านี้ลงบนพื้นผิวหรือฐานรองรับ แล้วเมื่อวัสดุที่มีกลายเป็นไอตอนตกเคลือบด้วยไอออนหรือพลาสมา อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับก๊าซที่นำเข้าสู่กระบวนการโดยตามแผนที่วางไว้หรืออาจปนเปื้อนกับก๊าซในกระบวนการที่ไม่ได้ตั้งใจ ซึ่งเรียกว่า reactive deposition เพื่อสร้างสารประกอบใหม่ กระบวนการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางกายภาพมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

1. Thermal evaporation เป็นการระเหยสารด้วยการให้ความร้อนแก่สารจนสารมีความร้อนสูงจนถึงจุดหลอมเหลว แล้วไปจุดเดือด
2. Electron beam เป็นการระเหยสารด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่ยิงไปบนเนื้อสารเพื่อให้เกิดพลังงานจนอะตอมหลุดออกไปที่ฐานรองรับ
3. Sputtering เป็นการควบคุมทิศทางของแก๊สเฉื่อยด้วยสนามไฟฟ้า ให้ไปชนเป้าสารให้อะตอมของสารหลุดลงมายังฐานรองรับ
4. Ion plating หลักการของระบบจะเหมือนกับสปัตเตอริงแต่ใช้ช่วง Arc แทนเพื่อพลังงานที่สูงมากพอให้อะตอมที่หลุดออกมาแตกเป็นไอออนก่อนลงบนฐานรองรับ
5. Pulsed laser deposition เป็นการระเหยสารด้วยลำแสงโฟตอนยิงไปบนเป็นเนื้อสารให้ระเหยไปที่ฐานรองรับ

### 2.1.2 กระบวนการระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Vapor Deposition)

กระบวนการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางเคมี เป็นการจ่ายแก๊สเข้าไปในระบบของกระบวนการโดยแก๊สที่จ่ายเข้าไปเป็นแก๊สสารตั้งต้นที่ต้องการนำไปปลูกฟิล์มที่ฐานรองรับ ใช้ความร้อนในการอบให้สารตั้งต้นที่ลงมาทำปฏิกิริยากัน บนฐานรองรับจนเกิดหน้าฟิล์มแล้วให้ความร้อนเพื่อทำให้โครงสร้างของสารคงสภาพ ไม่ให้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง การตกเคลือบไอด้วยวิธีทางเคมีสามารถปลูกฟิล์มให้ความหนาที่สม่ำเสมอ มีคุณสมบัติที่มีความพรุนต่ำแม้อยู่บนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนก็ตาม และการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางเคมีมีหลากหลายวิธีตามความเหมาะสมของชิ้นงานและความต้องการของผู้ใช้ ตามตารางที่ 2.1 โดยตารางนี้จะอธิบายถึงกระบวนการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งจะแบ่งเป็นประเภทของการทำแล้วแต่ละการทำต้องใช้ระดับความดันอยู่ในช่วงไหนถึงจะเหมาะสมแก่การทำด้วยวิธีการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางเคมี และบอกจุดที่ระบบของแต่ละประเภทจะเริ่มกระบวนการตกเคลือบไอด้วยวิธีทางเคมีได้

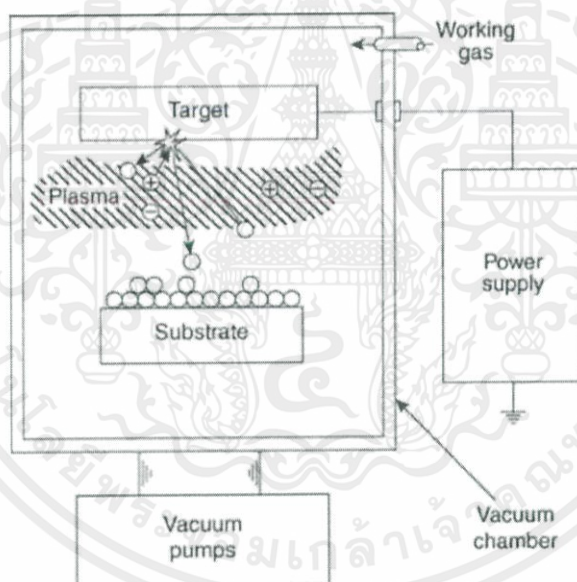
ตารางที่ 2.1 สรุปกระบวนการระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี [1]

Type	Pressure range	Description
Atmospheric pressure CVD	High – atmospheric	Processes at atmospheric pressure
Low pressure CVD	Low	Processes at subatmospheric pressures
Ultrahigh vacuum CVD	Typically below $10^{-6}$ Pa	Processes at a very low pressure
Aerosol assisted CVD		Precursors are transported to the substrate by means of a liquid/gas aerosol, which can be generated ultrasonically
Direct liquid injection CVD		Precursors are in liquid form (liquid or solid dissolved in a convenient solvent). Liquid solutions are injected in a vaporization chamber towards injectors (typically car injectors). Then the precursor's vapors are transported to the substrate as in classical CVD process
Microwave plasma assisted CVD		
Remote plasma enhanced CVD		Utilizes a plasma to enhance chemical reaction rates of the precursors, and allows deposition at lower temperatures
Atomic layer CVD		Deposits successive layers of different substances to produce layered, crystalline films
Hot wire CVD		Also known as catalytic CVD (Cat-CVD) or hot filament CVD (HFCVD). Uses a hot filament to chemically decompose the source gases

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Metal organic CVD		Based on metal-organic precursors
Hybrid physical CVD		Vapor deposition processes that involve both chemical decomposition of precursor gas and vaporization of a solid source
Rapid thermal CVD		Uses heating lamps or other methods to rapidly heat the wafer substrate
Vapor phase epitaxy		

## 2.2 ระบบสปัตเตอริง



รูปที่ 2.2 ระบบสปัตเตอริง [2]

การสปัตเตอริง คือ การทำให้ผิวหน้าอะตอมของวัสดุที่เป็นเป้าหลุดออกด้วยการชนของอะตอมที่มีอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานช่วงระยะระหว่างเป้ากับฐานรองรับ ที่มาจากโมเมนต์ระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป้าวัสดุ ซึ่งการสปัตเตอริงจะอาศัยการดิสชาร์จของก๊าซอาร์กอนที่มาจากสนามไฟฟ้ากำลังสูง ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนแล้วควบคุมโมเมนต์ของไอออนให้ชนเป้าด้วยขั้วลบของสนามไฟฟ้ากำลังสูง ซึ่งอนุภาคของสารเคลือบหรือเป้าที่หลุดออกมาด้วยการชนของอาร์กอนไอออนนั้นจะมีความเร็วมากกว่าความเร็วของการระเหยมาก แรงนี้จึงทำให้อนุภาคได้ฝังและก่อตัวบนเนื้อสารที่ฐานรองรับได้ตามรูปที่ 2.2

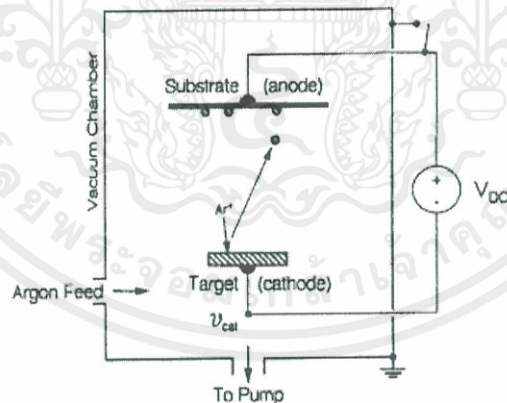
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 ระบบพลาสมา

พลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบ ในปริมาณที่เท่าๆกัน พลาสมาสามารถเกิดได้โดย การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มขึ้นจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด พลาสมามีความแตกต่างจากสถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะก๊าซ โดยมีเงื่อนไข 3 ประการ ในเรื่องดังต่อไปนี้คือ ความยาวคลื่นเดอบาย จำนวนอนุภาค และความถี่พลาสมา ซึ่งทำให้พลาสมามีความจำเพาะเจาะจงที่แตกต่างจากสถานะอื่นออกไป

### 2.2.2 ระบบสปัตเตอริงแบบกระแสตรง

สปัตเตอริงแบบกระแสตรง เป็นสปัตเตอริงที่ง่ายที่สุดในการทำสปัตด้วยกันเนื่องจากหลักการสปัตเตอริงจะเป็นหลักการสปัตปกติไม่เปลี่ยนแปลงอะไร และใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการปลูกฟิล์มโดยการต่อขั้วแคโทดไว้ที่หัวของสปัตเตอริงคือด้านฝั่งเป้าสารที่จะนำไปปลูกฟิล์ม ส่วนด้านฐานรองรับนั้นจะต่อเข้ากับขั้วแอโนด เมื่อทำการจ่ายแก๊สเข้าไปในระบบพร้อมกับจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปเพื่อให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน แก๊สอาร์กอนที่แตกตัวเป็นไอออนจะวิ่งไปชนเป้าสารที่นำมาปลูก เมื่ออะตอมของเป้าหลุดออกมาจะตกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกไปบนฐานรองรับตามรูปที่ 2.3



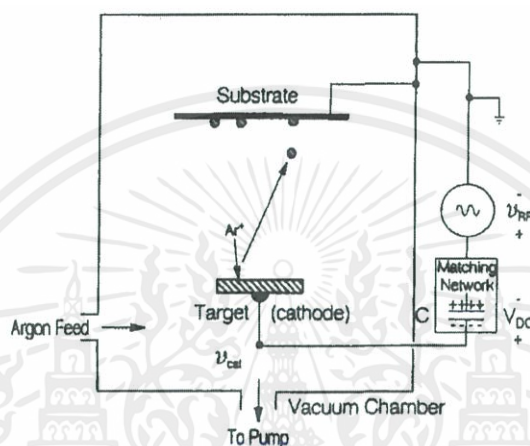
รูปที่ 2.3 ระบบสปัตเตอริงกระแสตรง[2]

### 2.2.3 ระบบสปัตเตอริงแบบคลื่นวิทยุ

หลักการของระบบสปัตเตอริงแบบคลื่นวิทยุ เป็นการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นกระแสสลับซึ่งจะมีความถี่เข้ามาช่วยในการสปัตเนื่องจากสามารถทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนได้ง่ายยิ่งขึ้นและยังปลูกฟิล์มได้ในที่ความดันต่ำกว่าระบบสปัตเตอริงแบบกระแสตรง แล้วยังสามารถสปัตเป้าสารที่เป็นสารจำพวกไดอิเล็กทริกได้ที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า ที่สามารถทำได้เพราะระบบสปัตเตอริงแบบคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้กระแสสลับที่มีค่าเป็นบวกและลบในรอบของไซเคิลของการจ่ายไฟ ถ้าเป้าสารเป็นสารจำพวกไดอิเล็กตริกสูงๆจะทำให้แก๊สที่แตกตัวเป็นไอออนบวกไปเกาะบนหน้าเป้าจนไม่สามารถทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาสู่ฐานรองรับได้จะทำให้การสปัตนั้นสิ้นสุดลง แต่เมื่อในไซเคิลหนึ่งจะมีช่วงเวลาหนึ่งที่กระแสเป็นลบชั่วขณะนั้นจะทำให้เกิดการผลักแก๊สไอออนบวกหน้าเป้าสารออกไปแล้วจะกลับไปสู่กระแสบวกเพื่อทำการผลักแก๊สไอออนบวกไปชนเป้าสารเหมือนเดิมเพื่อทำการปลูกฟิล์มต่อไป เพราะฉะนั้นจะนิยมในการใช้ปลูกฟิล์มที่ใช้เป้าสารเป็นสารไดอิเล็กตริกตามรูปที่ 2.4



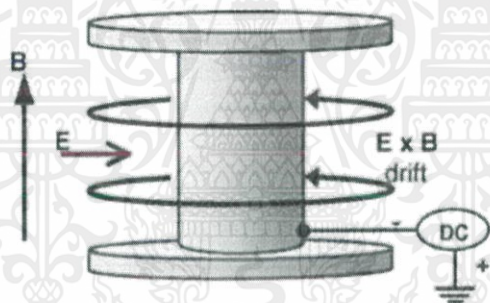
รูปที่ 2.4 ระบบสปัตเตอริงแบบคลื่นวิทยุ[2]

#### 2.2.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของการสปัตเตอริงด้วยแมกนีตรอน

ระบบการเคลือบฟิล์มแบบดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้พัฒนามาจากระบบ ดีซี สปัตเตอริง เพราะเนื่องจากว่าอัตราการสปัตเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริง อาจทำได้ 2 วิธี คือโดยการเพิ่มอีลด์หรือโดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ แต่ในระบบ ดีซี สปัตเตอริง ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความดันประมาณ 100 มิลลิทอร์ นอกจากนี้ระบบ ดีซี สปัตเตอริง ทั่วไปอะตอมของก๊าซที่เกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% และเมื่อความดันสูงจะทำให้ปริมาณก๊าซแทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย เป็นการแสดงระบบ ดีซี สปัตเตอริงอย่างง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง จึงถูกพัฒนาขึ้นมา โดยใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดการไอออไนซ์มากขึ้น ซึ่งระบบ ดีซี สปัตเตอริงจะไม่มี เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาช่วย โดยทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางกับผิวหน้าของเป้าสารเคลือบและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น อำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งเข้าชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยมากขึ้น เมื่อก๊าซเกิดการไอออไนซ์มากขึ้นจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย จากทฤษฎีพบว่าถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กโดยมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมแต่ถ้าอิเล็กตรอนทำมุม กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบหมุนควงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับ สนามแม่เหล็กและจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็ก ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมของก๊าซแนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศตั้งฉากกัน อำนาจของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้ง แล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift Motion) ระบบสปีดเทอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามยาวจะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงมากนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไป และยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามขวางทำให้เกิดกระบวนการเพิ่มไอออนเกิดขึ้น โดยที่หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบแล้วจะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสองออกมา อิเล็กตรอนลำดับสองจะเคลื่อนที่ในลักษณะไซคลอยด์ (Cycloid) ทำให้ถูกกักอยู่ในสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และเคลื่อนที่ลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของคาโทดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบแมกนีตรอน [1]

## 2.3 ระบบสุญญากาศ

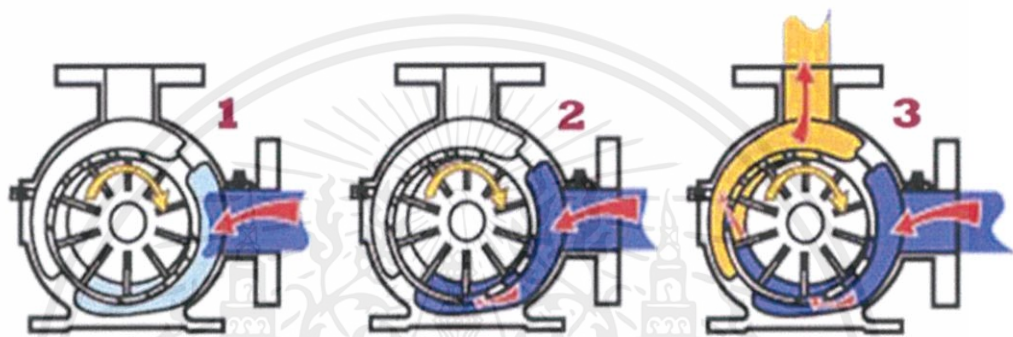
### 2.3.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

ประเภทของปั๊ม (Classification Pumps) ใช้หลักการวิทยาศาสตร์ทางฟิสิกส์ ปั๊มจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ปั๊มประเภทพลวัต (Dynamic Pumps) และ ปั๊มประเภทแทนที่บวก (Positive Displacement Pumps) เป็นการกำหนดในระดับสากล จะมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงสรุปโดยใช้หลักการวิทยาศาสตร์ทางฟิสิกส์ ลักษณะโครงสร้าง และลักษณะในการใช้งาน จึงแบ่งประเภทของปั๊มเป็น 3 ประเภทลักษณะ คือ 1. ปั๊มประเภทจลน์ (Kinetic pumps) 2. ปั๊มประเภทโรตารี (Rotary Pumps) และ 3. ปั๊มประเภทสูบชัก (Reciprocating Pumps) ซึ่งปั๊มแต่ละประเภทก็จะมีปั๊มแยกย่อยไปอีก

1. ปั๊มโรตารี (Rotary pump) เป็นปั๊มที่ใช้ในช่วงสุญญากาศระดับหยาบ จะประกอบด้วย ครีบบีบอัด, โรเตอร์ และสเตเตอร์ โดยโรเตอร์จะเป็นตัวหมุนและพาครีบบีบอัดไปมาตามไปด้วย จะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างระหว่างครีบบีบอัดกับสเตเตอร์ เกิดความดันเป็นลบหรือเกิดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ทำให้ของเหลวหรือแก๊สไหลเข้ามาแทนที่ในช่องว่างนั้น ทำให้ความดันกลายเป็นบวก (Positive) จากนั้นของเหลวหรือแก๊สก็จะถูกดันออกไปในปริมาตรที่คงที่ ผ่านทางออกของปั๊มไปที่มีความดันสูงกว่า ปั๊มแบบโรตารีถูกแบ่งตามรูปร่างลักษณะได้เป็น 7 ชนิด คือ 1.ใบกวาด (Vane), 2. ลูกสูบ (Piston), 3. วัสดุยืดหยุ่น (Flexible Member), 4. ลอนกลีบ (Lobes), 5. เกียร์ (Gears), 6. ลูกสูบหมุนตามเส้นรอบวง (Circumferential Pistons) และ 7. สกรู (Screw) เป็นต้น ในโครงงานวิจัยผู้วิจัยใช้ปั๊มโรตารีแบบใบกวาด (Rotary vane pump)



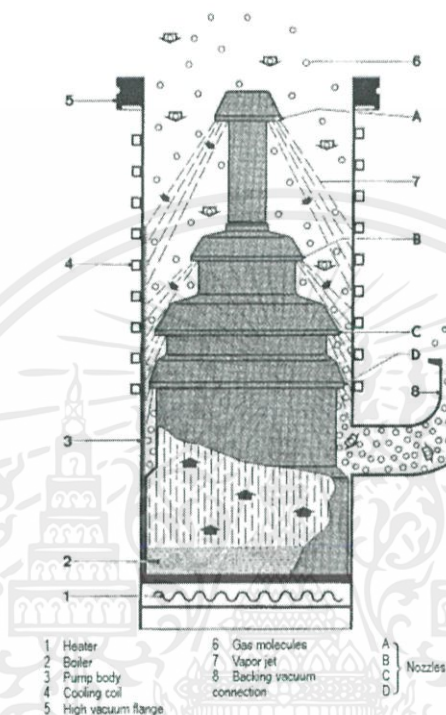
รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของปั๊มโรตารีแบบใบกวาด[3]

หลักการของปั๊มโรตารีแบบใบกวาด (Rotary vane pump) โรเตอร์ทำการหมุนส่งผลให้ใบพัดหมุนตามเข็มนาฬิกาตามภาพหมายเลข 1 ทำให้ครีบบีบอัดที่มีแกนกลางเหมือนสปริงจะหดเข้าเมื่อโรเตอร์หมุนครีบบีบอัดไปชิดกับผนังของสเตเตอร์ จึงทำให้เกิดห้องว่างห้องหนึ่งที่มีแรงเหวี่ยงจากครีบบีบอัดตามภาพหมายเลข 2 หมุนไปจนครีบบีบอัดกับผนังสเตเตอร์เริ่มค่อยๆ มีระยะห่างกันทำให้เกิดห้องว่างห้องนั้นจากแรงเหวี่ยงแปลงเป็นแรงดันอากาศไปสู่ที่มีความดันบรรยากาศสูงกว่าตามภาพหมายเลข 3 ตามรูปที่ 2.6

2. ปั๊มแรงดันไอแพร่ (Diffusion pump) เป็นที่จจะร่วมกันปั๊มประเภทโรตารีในการดูดอากาศออกเพื่อดันอากาศให้ได้มากขึ้น เนื่องจากปั๊มโรตารีมีขีดจำกัดในการดูดได้ถึงสุญญากาศระดับหยาบซึ่งอยู่ที่ 1013 mbar ถึง  $10^{-3}$  mbar จึงต้องใช้ปั๊มแรงดันไอแพร่ดูดอากาศให้ถึงสุญญากาศระดับสูงอยู่ที่  $10^{-3}$  mbar ถึง  $10^{-7}$  mbar หลักการของปั๊มแรงดันไอแพร่ คือ การต้มน้ำมันไอแพร่ด้วยฮีทเตอร์ให้กลายเป็นไอ และเนื่องจากปั๊มแรงดันไอแพร่ไม่สามารถดูดอากาศออกได้จึงต้องใช้ปั๊มโรตารีเป็นตัวดูดอากาศออกให้จึงทำให้ระบบภายในของปั๊มแรงดันไอแพร่มีความกดอากาศต่ำลงจึงส่งผลให้น้ำมันไอแพร่ยิ่งเดือดเร็วขึ้นซึ่งส่วนที่ต่อกับปั๊มโรตารีที่ดูดออกนั้นเรียกว่า backing pump เมื่อน้ำมันไอแพร่กลายเป็นไอจะเกิดการพุ่งขึ้นตามพฤติกรรมปกติของของเหลวเป็นไอที่จะพุ่งขึ้นด้านบนเป็นธรรมชาติ แต่ตัวปั๊มแรงดันไอแพร่จะบังคับให้น้ำมันที่พุ่งขึ้นแล้วชนกับตัวฝาครอบเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางแบบเฉียบพลันจากที่เป็นมุมตรงจะเป็นมุมงอลงมาทันที เพื่อให้เกิดการแหวกอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ไอน้ำมันจะทำหน้าที่พาอากาศออกไปทาง backing pump แต่ไอน้ำมันจะไม่ออกไปด้วย เนื่องจากปั๊มแรงดันไอแพร่จะมีการหล่อความเย็นไว้เพื่อให้ปั๊มแรงดันไอแพร่ไม่ร้อนเกินไป และไม่ให้อไอน้ำมันหลุดออกไปข้างนอก เพราะไอน้ำมันจะควบแน่นตกกลับมาที่ฐานของปั๊มเหมือนเดิม ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของปั๊มแรงดันไอแพร่[1]

### 2.3.2 ระบบวัดความดันสุญญากาศ

#### 2.3.2.1 เครื่องวัดค่าสุญญากาศด้วยการอ่านค่าความดัน

เครื่องวัดค่าสุญญากาศด้วยการอ่านค่าความดัน (Vacuum gauges with gas dependent pressure reading) ชนิดนี้ไม่ได้วัดความดันโดยตรง เป็นแรงที่เกี่ยวข้งกับพื้นที่ แต่ใช้ตัวแปรทางกายภาพอื่น ๆ ที่เป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของอนุภาคและความดัน เครื่องวัดสุญญากาศที่มีการอ่านค่าความดันขึ้นกับก๊าซ ได้แก่ มาตรวัดการลดลง, เครื่องวัดสุญญากาศด้วยการนำความร้อน และเครื่องวัดสุญญากาศไอออนิกที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งเครื่องมือประกอบด้วยเซ็นเซอร์ที่ประกอบด้วย หัววัดกับเซนเซอร์ และส่วนควบคุมที่จำเป็นในการใช้งาน

##### 1. Thermal conductivity vacuum gauges

เครื่องวัดสุญญากาศแบบใช้เส้นใยการนำความร้อนที่มีความสัมพันธ์กับอากาศ ส่วนใหญ่เครื่องมือวัดที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดคือเครื่องวัดสุญญากาศ Pirani หลักการของเครื่องวัดคือ เมื่ออากาศมีการพาความร้อนด้วยอนุภาคภายในระบบผ่านเส้นใยนำความร้อนของวงจรวัดทอสตัน เป็นวงจรวัดค่าความต้านทานที่ขึ้นกับความร้อนของเส้นใย ในที่ความดันต่ำหรือความดันอากาศปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคของอากาศจะสูงตามเมื่อทำการดูดอากาศออก อากาศจะผ่านเส้นใยของเครื่องวัดสุญญากาศ Pirani ซึ่งพาความร้อนไปด้วยยิ่งอนุภาคมากเท่าไรความร้อนก็มากเช่นกัน ทำให้ความต้านทานในระบบเพิ่มขึ้น และที่ความดันอากาศสูงขึ้น อนุภาคก็น้อยลงความร้อนที่พาผ่านเส้นใยก็น้อยลงเช่นกัน ทำให้ความต้านทานลดลง จึงทำให้วงจรวีทสโตนแปลงค่าออกมาเป็นความดันบรรยากาศได้ โดยที่วงจรวีทสโตนจะไม่ผลต่อการสูญเสียของความร้อนแต่อย่างใดเครื่องสุญญากาศแบบใช้เส้นใยการนำความร้อนวัดได้ในช่วงความดันที่ 1013 mbar ถึง  $10^{-4}$  mbar

## 2. Ionization vacuum gauges

เครื่องวัดสุญญากาศแบบไอออนไนซ์เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดในการวัดแรงดันก๊าซในช่วงสุญญากาศที่มีความไวสูงและความดันสูงมาก จะวัดความดันในความหนาแน่นของจำนวนอนุภาค สัมพันธ์กับความดัน ก๊าซที่มีแรงดันจะเข้าสู่หัววัดของเครื่องมือและ ไอออนบางส่วนมีผลมาจากสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดไอออนไนซ์เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่งในสนามไฟฟ้าและมีพลังงานที่เพียงพอเพื่อสร้างไอออนบวกให้มีแรงกระทำกับโมเลกุลของแก๊ส ไอออนจะคอยส่งผ่านประจุไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรดวัดเพื่อเก็บประจุไอออน ในระบบกระแสไอออนที่เกิดขึ้นเป็นตัววัดความดันเนื่องจากจำนวนไอออนนั้นมีสัดส่วนกับความหนาแน่นของอนุภาค และทำให้เกิดความดัน การก่อตัวของไอออนเป็นผลมาจากการปลดปล่อยที่ความแรงของสนามไฟฟ้าสูงที่เรียกว่า cold-cathode หรือ penning discharge ภายใต้สภาวะคงที่เป็นอย่างอื่นอัตราไอออนและกระแสไอออนจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซเนื่องจากก๊าซบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนไนซ์ได้ง่ายกว่าสารอื่น เครื่องวัดสุญญากาศแบบไอออนไนซ์จะถูกปรับเทียบกับไนโตรเจนเป็นก๊าซอ้างอิง

## 3. Cold-cathode ionization vacuum gauges (Penning vacuum gauges)

เครื่องวัดสุญญากาศแบบไอออนไนซ์ที่ทำงานด้วยการจ่ายไฟเย็นจะเรียกว่าเครื่องวัดสุญญากาศแบบ cold-cathode หรือ Penning vacuum gauges ขั้นตอนการวัดเป็นหลักการเดียวกับในระบบอิเล็กโทรดของเครื่องปั๊มไอออนแบบสปัตเตอร์ เป็นการให้ขั้วแอโนดอยู่ตรงกลางโดยมีขั้วแคโทดขนาบทั้งสองข้าง แล้วใช้ขั้วแม่เหล็กอยู่ต่อจากขั้วแคโทดอีกที ซึ่งระบบจะมีขั้วแม่เหล็กล้อมรอบขั้วแคโทด และขั้วแคโทดก็จะล้อมรอบขั้วแอโนดอีกทีหนึ่ง แล้วจะใช้แผ่นเพลตโลหะเป็นขั้วแคโทด เพื่อให้โมเลกุลแก๊สลงมาร่วงชนแผ่นเพลตเพื่อให้เกิดการหลุดออกของไอออนโลหะเพื่อไปตกที่ขั้วแอโนด เมื่อไอออนโลหะตกลงบนขั้วแอโนดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ขั้วส่งผ่านไปยังวงจรเพื่อวัดค่ากระแสจึงแปรเป็นความดันอากาศ แสดงว่าเมื่อไอออนตกกระทบที่ขั้วแอโนดมากความดันอากาศสูง แต่ถ้าไอออนตกกระทบที่ขั้วแอโนดน้อยความดันอากาศต่ำ

### 2.3.3 ระบบควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในสุญญากาศ



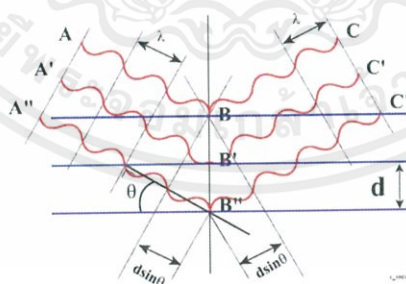
รูปที่ 2.8 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในสุญญากาศ (Mass flow controller)

ยี่ห้อ Tylan รุ่น 2900 FC-2950MEP5

เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในสุญญากาศ (Mass flow controller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการระเหยสารที่นำเข้าไปในระบบสุญญากาศ ซึ่งทางสากลจะใช้เป็นหน่วย SCCM กับ SLPM โดยแต่ละตัวจะมีขีดการระเหยไม่เหมือนกัน แต่จะควบคุมด้วยการจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงควบคุมการเปิดปิดของวาล์วในตัวของอุปกรณ์ ตามรูปที่ 2.8

## 2.4 การวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

### 2.4.1 เทคนิคการวัดสมบัติทางโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.9 อธิบายการเคลื่อนที่ของรังสีเอกซ์[8]

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ  $2d \sin \theta = n\lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยเครื่อง XRD ของ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

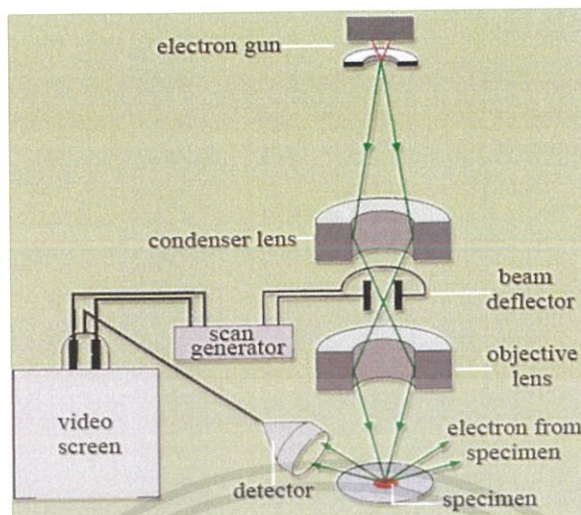
ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือหาองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน และค่าตัวแปรที่มีความหมายดังนี้ได้แก่  $\lambda$  แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์,  $n$  แทน ลำดับการสะท้อน,  $d_{hkl}$  แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

#### 2.4.2 เทคนิคการวัดการทะลุผ่านแสง

หลักการของ UV/VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้ไอเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

#### 2.4.3 เทคนิคการวัดลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลยดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[11]

## 2.5 ทบทวนวรรณกรรม

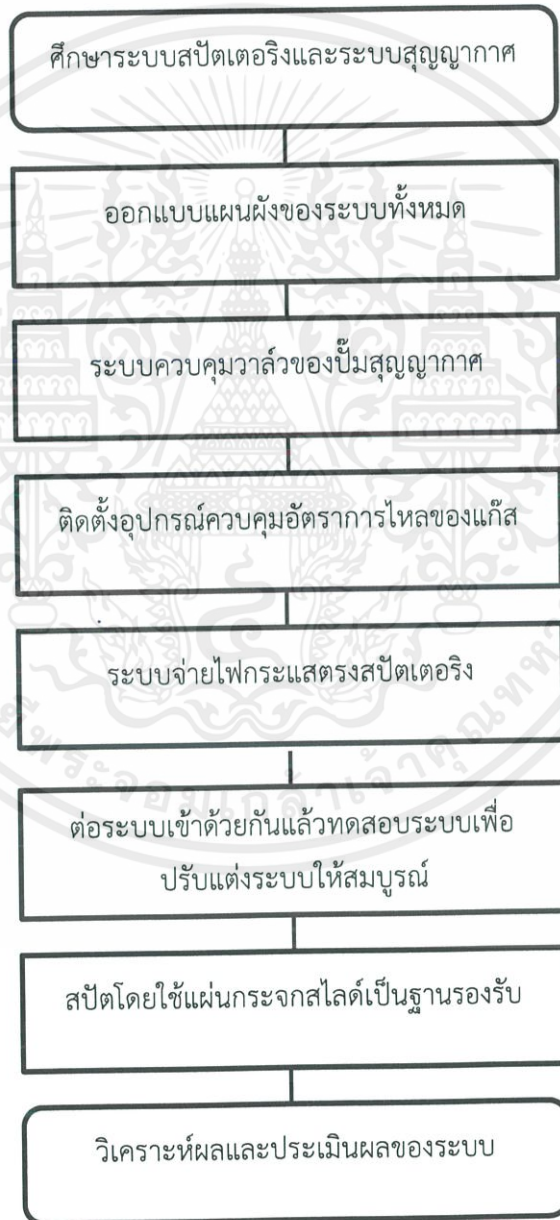
หลักการพื้นฐานของการทำสเปกโตรสโกปีคือ การใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางไฟฟ้าโดยให้เป้าเนื้อสารอยู่ที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทด (cathode) แล้วใช้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาอยู่ในช่วงโกลด์ดิสชาร์จ ไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วไฟฟ้าที่มีขั้วตรงข้ามกับตัวเองเพื่อให้เกิดการชนหน้าเป้าแล้วสารหลุดออกมาตกเคลือบลงบนฐานรองรับ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบหัวสเปกโตรสโกปีด้วยการเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนหน้าเป้าเพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาได้ง่ายขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนที่วิ่งบริเวณหน้าเป้าจะมีปริมาณขึ้นผลมาจากสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำไว้ แล้วทำให้อิเล็กตรอนวิ่งชนกับแก๊สอาร์กอนได้ง่ายขึ้น เพิ่มอัตราการชนหน้าเป้ามากขึ้นด้วย และเมื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหน้าเป้าที่ส่งผลให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาแล้วยังช่วยทำให้สามารถจุดพลาสมาติดได้ง่ายขึ้นที่ความดันต่ำลงได้ที่  $10^{-3}$  mbar เปรียบเทียบกับ  $10^{-2}$  mbar และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ -500 โวลต์ เปรียบเทียบกับ -2000 ถึง -3000 โวลต์ [13] องค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรสโกปีนอกจากเรื่องหัวแล้วจะมีเรื่องระดับความดัน และระยะห่างระหว่างหัวสเปกโตรสโกปีกับฐานรองรับ ระดับความดันจะสัมพันธ์กับปริมาณแก๊สในอากาศยิ่งความดันต่ำปริมาณแก๊สจะยิ่งน้อยลงแต่ถ้าในที่มีความดันสูงปริมาณแก๊สจะยิ่งสูงตาม ในกระบวนการสเปกโตรสโกปีจะทำการปั๊มสุญญากาศให้ถึงระดับสูง (high vacuum) เพื่อลดปริมาณแก๊สที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากับเป้าสารแล้วทำการสเปกโตรสโกปีระดับกลาง (medium vacuum) [16] และสามารถใช้ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับสามารถอยู่ภายในพลาสมาได้ในระยะที่ไม่เกิน 6 เซนติเมตร [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของบทที่ 3 นั้นผู้วิจัยจะกล่าวถึงแผนวงจรควบคุมวาล์วของระบบสุญญากาศ ระบบวาล์ว นิวเมติกเปิดปิดของระบบสุญญากาศ ระบบจ่ายไฟกระแสตรงสปีดเตอร์ริง อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน โรตารีปั๊ม การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธี DAMI และแผนการดำเนินงานเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1

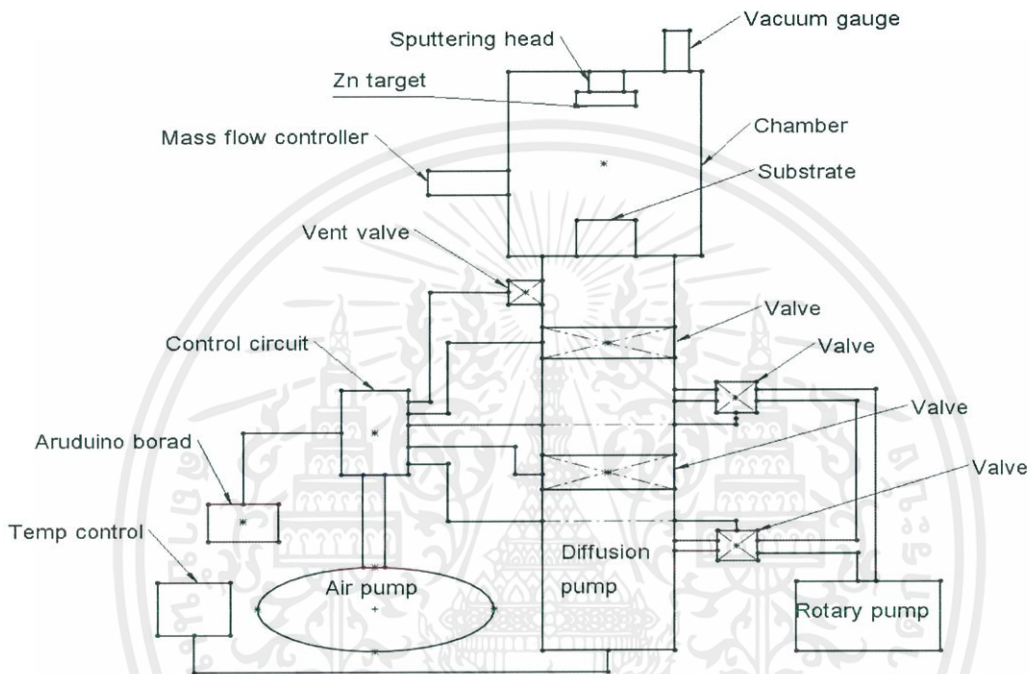


รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมแผนผังงานการดำเนินงานของผู้วิจัย

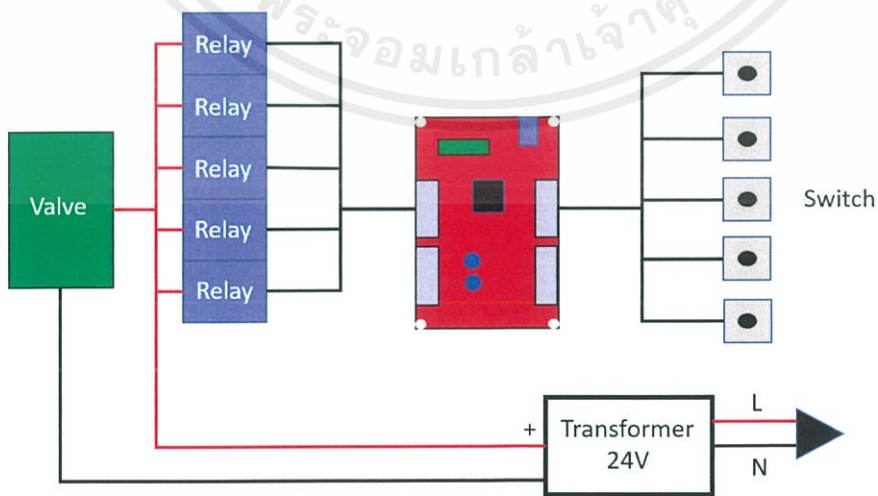
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 ออกแบบแผนผังของระบบทั้งหมด

ศึกษาการทำงานของระบบของปั๊มแรงดันไอแพร่ ปั๊มโรตารี และตัวของ chamber เข้าด้วยกันก่อน แล้วศึกษาการทำงานของวาล์วเพื่อที่จะควบคุมการทำงาน เนื่องจากวาล์วในระบบนี้เป็นวาล์วนิวเมติกส์ที่ใช้ลมในการทำงานของวาล์ว จึงต้องมีปั๊มลมในการใช้งาน แล้วจึงวางระบบตามแผนผังทั้งหมดตามรูปที่ 3.2



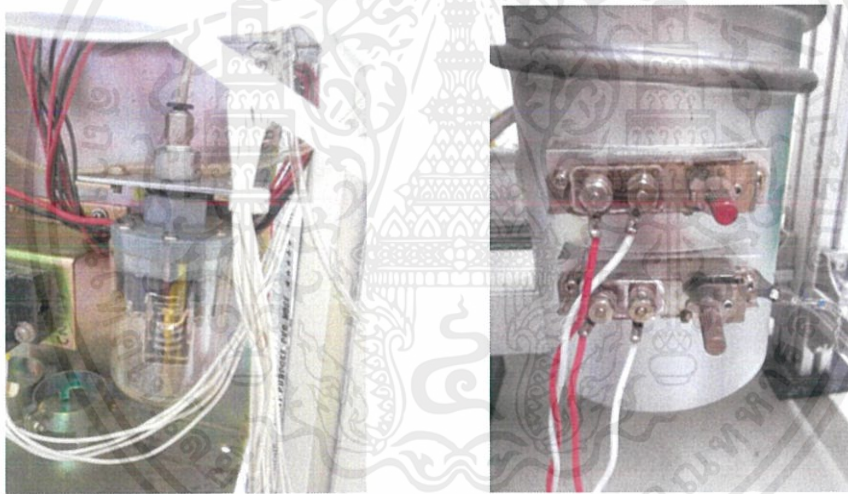
รูปที่ 3.2 แผนผังของระบบสเป็คเตอรืไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นประกอบไปด้วย แผงวงจรสวิทช์ หลอดไฟแอลอีดี รีเลย์ สวิตช์ ตัวแปลงไฟขนาด 24 โวลต์ และบอร์ดอาตูดูโน้สี้แดง ตามรูปที่ 3.3 ด้วยการทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะแบ่ง 2 ส่วนได้แก่ ส่วนรับค่า (Input) และส่วนแสดงผล (Output) ซึ่ง อุปกรณ์ในระบบที่ทำงานเป็นส่วนรับค่า (Input) คือ แผงวงจรสวิทช์ปุ่มกดทำหน้าที่สั่งการรีเลย์ สวิตช์ให้จ่ายไฟไปยังวาล์วควบคุมทิศทางที่ระบบสุญญากาศ สวิตช์เซ็นเซอร์วัดแรงดันลมตามรูปที่ 3.4 (ก.) ทำหน้าที่คอยตรวจวัดแรงดันลมต่อระบบการทำงานของวาล์วควบคุมทิศทางถ้าแรงดันลมไม่ถึง สวิตช์จะเปิดออกเพื่อให้บอร์ดอาตูดูโน้รู้ว่าแรงดันลมไม่ถึงจะทำการสั่งจ่ายไฟเพื่อเปิดปั๊มลมให้ทำงาน จนกว่าปั๊มจะเพิ่มแรงดันได้ถึงระดับที่พอต่อการทำงานของวาล์ว และสวิตช์เซ็นเซอร์วัดความร้อนตาม รูปที่ 3.4 (ข.) ทำหน้าที่ตรวจความร้อนในระบบของปั๊มแรงดันไอแพร์ตอนต้มน้ำมันเพื่อให้รู้ว่าพร้อมที่จะดำเนินการขั้นต่อไป ถ้าความร้อนถึงระดับที่พร้อมดำเนินการต่อสวิตช์จะเปิดออก ทำให้บอร์ดอาตูดูโน้สั่งจ่ายไฟไปที่หลอดไฟแอลอีดีสีเขียว ส่วนสีแดงคือบอกถึงความร้อนของปั๊มแรงดันไอแพร์ที่มากเกินไปจำเป็นต้องหยุดจ่ายไฟที่ฮีตเตอร์



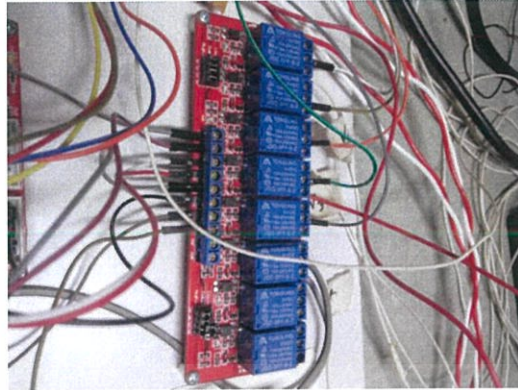
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) สวิตช์เซ็นเซอร์วัดแรงดันลม (ข) สวิตช์เซ็นเซอร์วัดความร้อน

ในส่วนของแสดงผล (Output) ของบอร์ดอาตูดูโน้ คือ รีเลย์สวิตช์ ทำหน้าที่คอยจ่ายและหยุดจ่ายไฟให้กับวาล์วควบคุมทิศทาง เครื่องปั๊มลม และหลอดไฟแอลอีดี ตามรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

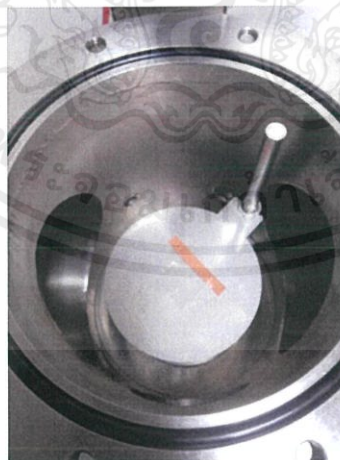


รูปที่ 3.5 รีเลย์สวิตช์

## 3.2 เตรียมแผ่นกระจกสไลด์

### 3.2.1 เตรียมแผ่นกระจกสไลด์ DAMI

1. ตัดกระจกขนาด 2x2 cm. แล้วล้างด้วยน้ำยาขจัดคราบสกปรก
2. แช่ด้วยน้ำ DI (Water-Deionized water) แล้วนำไปแช่ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
3. แช่ด้วยอะซิโตน (Acetone) แล้วนำไปแช่ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. แช่ด้วย IPA (Isopropanol) แล้วนำไปแช่ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ใส่แผ่นกระจกสไลด์บนฐานรองรับใน chamber ตามรูปที่ 3.6 โดยผู้วิจัยใช้ความสูงระหว่างเป้ากับฐานรองรับห่างกัน 2 เซนติเมตร



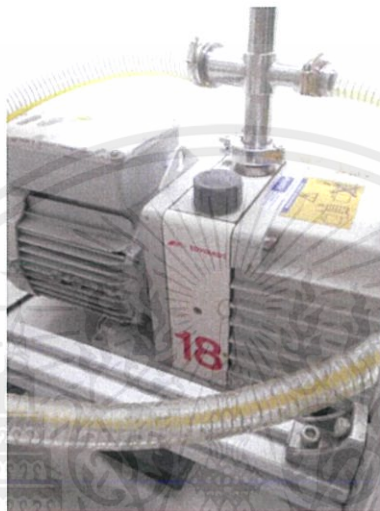
รูปที่ 3.6 แผ่นกระจกสไลด์และฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

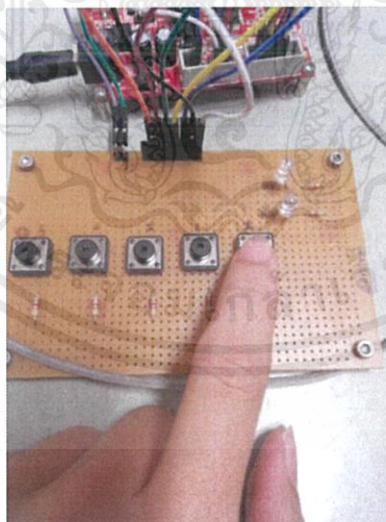
### 3.3 ระบบสุญญากาศ

#### 3.3.1 สุญญากาศระดับหยาบ

สุญญากาศระดับหยาบ (Roughing vacuum) อยู่ในช่วงความดันอากาศที่ 1013 mbar ถึง  $10^{-3}$  mbar โดยจะใช้ปั๊มโรตารี ยี่ห้อ Edward รุ่น 18 E1M18 ตามรูปที่ 3.7 ดูดอากาศออกก่อนเป็นระดับแรก เริ่มจากเปิดปั๊มโรตารี แล้วกดปุ่มหมายเลข 1 ทางขวาสุดบนแผงควบคุมเพื่อเปิดวาล์วเบอร์ 2 และ 4 ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ปั๊มโรตารี ยี่ห้อ Edward รุ่น 18 E1M18



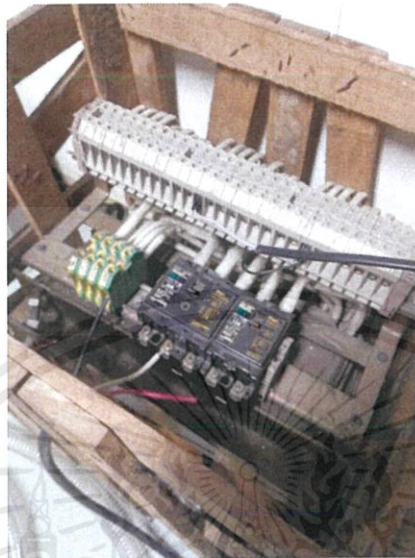
รูปที่ 3.8 กดปุ่มหมายเลข 1

#### 3.3.2 สุญญากาศระดับสูง

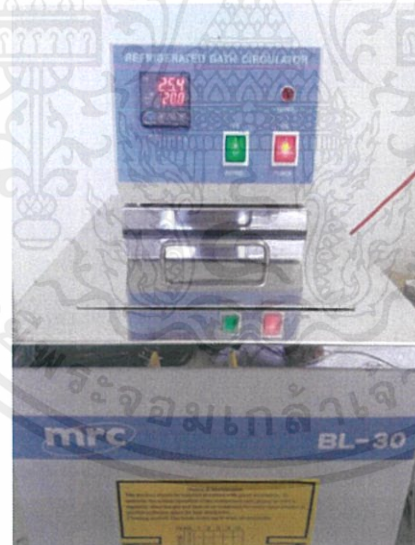
สุญญากาศระดับสูง (High vacuum) อยู่ในช่วงความดันอากาศที่  $10^{-3}$  mbar ถึง  $10^{-7}$  mbar จึงต้องใช้ปั๊มแรงดันไอแพร่เพื่อดันอากาศให้ลงต่ำกว่าเดิม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ปั๊มแรงดันไอแพร่ยี่ห้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAVAC LIMITED รุ่น DPF-4Z เริ่มจากเปิดสวิตช์หม้อแปลงไฟสวิตซ์ 30 แอมป์ และเครื่องหล่อเย็นตามรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 หม้อแปลง 3 เฟส 110 โวลต์



รูปที่ 3.10 เครื่องให้ความเย็น รุ่น BL-30

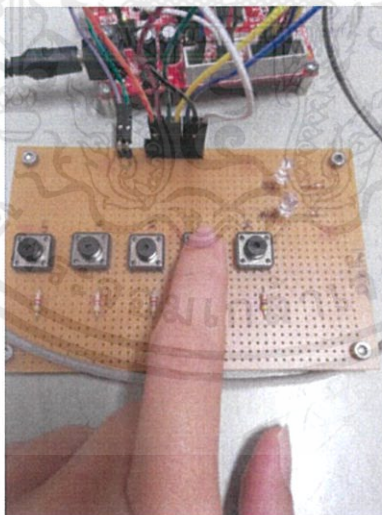
ซึ่งเครื่องให้ความเย็นจะตั้งความเย็นไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส ถัดไปต้มน้ำมันโดยกดปุ่มสีเขียวของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temp control) เพื่อการจ่ายไฟจากหม้อแปลงที่แปลงไฟบ้าน 220 โวลต์ เป็น 110 โวลต์ เข้าสู่ฮีตเตอร์เนื่องจากปั๊มรุ่นนี้ใช้ไฟ 110 โวลต์ ตามรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



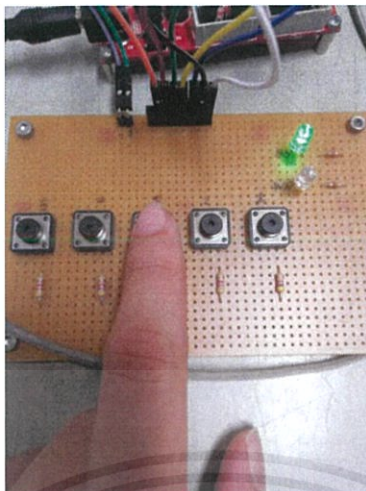
รูปที่ 3.11 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

กดไปให้กดปุ่มหมายเลข 2 เพื่อเปิดวาล์วเบอร์ 7 ตามรูปที่ 3.12 เพื่อทำให้ความดันอากาศในตัวปั๊มแรงดันไอแพร่ต่ำลงน้ำมันจะเดือดเร็วขึ้น เมื่อปล่อยเวลาให้ฮีทเตอร์ต้มน้ำมันแล้วเมื่อใดมีไฟสัญญาณสีเขียวติดบนแผงควบคุมนั้นเป็นสัญญาณบอกว่าน้ำมันเดือดพร้อมที่จะดำเนินการขั้นต่อไป แล้วให้ผู้ทดลองกดปุ่มหมายเลข 1 ของแผงควบคุมเพื่อดันอากาศให้ต่ำลงก่อน แล้วเมื่อความดันคงที่ ให้กดปุ่มหมายเลข 3 เพื่อเปิดวาล์วเบอร์ 1, 2 และ 7 เพื่อเข้าสู่สภาวะอากาศระดับสูง ตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 กดปุ่มหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 กดปุ่มหมายเลข 3

### 3.3.3 ระบบวาล์ว

- ระบบนิวเมติกส์ (Pneumatics system) คือ ระบบการขับเคลื่อนกำลังโดยใช้ความดันลม เป็นสื่อกลางในการขับเคลื่อน โดยอุปกรณ์จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมให้เป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนตัวอุปกรณ์ เช่น กระบอกลูกสูบและมอเตอร์ลม ซึ่งเหตุผลการนำระบบนิวเมติกส์มาใช้ในระบบควบคุมวาล์วของระบบสุญญากาศ เพราะใช้งานง่าย ทนทาน ราคาถูก และตัวสื่อกลางในการขับเคลื่อนเป็นแก๊สสามารถปล่อยสู่สภาพแวดล้อมปกติได้ตลอด ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย วาล์วควบคุมทิศทาง (Directional control valve) วาล์วควบคุมทิศทางเป็นวาล์วคอยสั่งการเปิดปิดได้ด้วยการกดปุ่มสั่งด้วยมือ หรือจ่ายไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมทิศทางของการไหลของแรงดันลมได้ เพื่อให้ไปยังกระบอกลูกสูบหรือส่วนทำงานหลักได้ตามรูปที่ 3.14 ในส่วนนี้จะป็นวาล์วควบคุมทิศทางการควบคุมทางตรงและวาล์วควบคุมทิศทางการควบคุมทางอ้อมแบบกระบอกลูกสูบสองทาง



รูปที่ 3.14 วาล์วควบคุมทิศทาง เครื่องกรองอากาศ และเซ็นเซอร์วัดแรงดันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องปั๊มลม เราใช้เครื่องปั๊มลมมาใช้ร่วมกับการทำงานของวาล์วเปิดปิดในระบบตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องปั๊มลมยี่ห้อ NORVAX

ที่ต้องใช้แรงดันลมในการทำงาน จึงต้องเปิดเครื่องปั๊มลมตลอดเวลาด้วยการดึงปุ่มสีแดงขึ้นเพื่อให้ปั๊มลมทำงาน และเปิดวาล์วปล่อยลมที่คันจับสีแดงตามรูปที่ 3.16

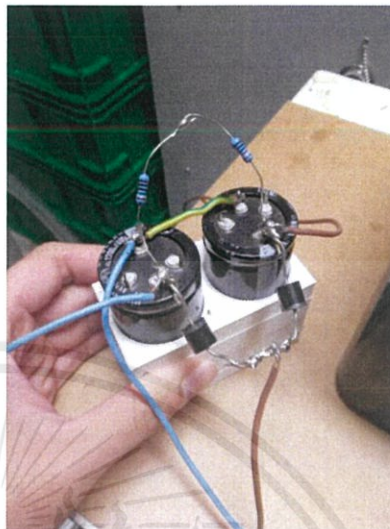
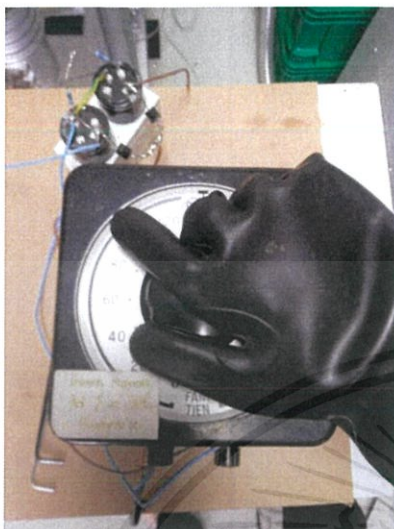


รูปที่ 3.16 สวิตช์เปิดปิดและวาล์วคันโยกมือของปั๊มลม

โดยระบบควบคุมของเครื่องจะมีเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดแรงดันของลมอยู่ตลอดเวลาและจะควบคุมการจ่ายไฟในการปั๊มลมด้วยบอร์ดอาดูโน่ ที่ทำงานสัมพันธ์กับเซ็นเซอร์ตรวจวัดแรงดันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ระบบจ่ายไฟกระแสตรงสปีดเตอร์ริง



(ก) ตัวปรับค่าแรงดัน (ข) วงจรดับเบิลโวลต์  
รูปที่ 3.17 (ก)ตัวปรับค่าแรงดัน (ข)วงจรดับเบิลโวลต์

งานวิจัยนี้ใช้การจ่ายไฟกระแสสลับแบบปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 220 โวลต์ ตามรูปที่ 3.17 (ก.) โดยมีวงจรดับเบิลโวลต์ในการเพิ่มแรงดันที่จ่ายเข้าไปให้ออกมาเป็นสองเท่าของที่จ่ายเข้าไป ตามรูปที่ 3.17 (ข.) เพราะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากในการทำให้เกิดพลาสมา หลักการทำงานของวงจรนี้คือ ใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวเก็บประจุและคายประจุในแต่ละฝั่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะในหนึ่งรอบของการจ่ายไฟกระแสสลับจะมีทั้งบวกและลบออกมาต่อหนึ่งของการจ่าย ส่วนไดโอดจะปรับกระแสตอนออกเป็นกระแสตรง

### 3.5 วิธีการปลูกฟิล์ม

1. เมื่อใส่แผ่นกระจกสไลด์บนฐานรองรับและเปิดระบบสุญญากาศจนความดันอยู่ที่ต่ำสุดที่โรตารีจะทำได้ ซึ่งของผู้วิจัยทำได้อยู่ที่  $1.2 \times 10^{-1}$  mbar และเปิดเครื่องหล่อเย็นให้ที่หัวสปีดเตอร์ริง
2. เปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนด้วยการจ่ายด้วยแหล่งจ่ายไฟ  $\pm 15$  โวลต์ และควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนด้วยการจ่ายไฟ 0 ถึง 5 โวลต์ ด้วยบอร์ดอาดิโนที่ใช้วิธี I<sup>2</sup>C microcontroller โดยจะแสดงค่าตามตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (โวลต์)	อัตราการไหล (SCCM)
0	0
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10

โดยตารางนี้แสดงค่าเป็นจำนวนเต็มไว้เพื่อการคำนวณที่ง่ายต่อการใช้งาน แต่แหล่งต้นไฟฟ้าสามารถจ่ายเป็นค่าทศนิยมได้เช่นกัน ส่วนค่าอัตราการไหลของแก๊สคำนวณได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้

3. ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลที่ 2 SCCM แล้วทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยวงจรดับเบิลโวลต์ โดยทำการหมุนที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้อย่างช้าๆตามรูปที่ 3.16 (ก) ไปที่ 198 โวลต์ โดยประมาณ ซึ่งจะให้ค่าออกมาอยู่ที่ 550 โวลต์ แล้วทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง

4. เมื่อครบเวลา 8 ชั่วโมงแล้ว ให้หมุนตัวปรับแรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้อย่างช้าๆลงมาที่ 0 โวลต์ แล้วรอน้อย 30 นาที เพื่อให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นได้มีการฟอร์มตัว และให้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ค้างอยู่คายประจุไปอยู่ที่ 0 โวลต์ แล้วทำการเก็บตัวอย่าง แล้วทำซ้ำกันแบบเดิมแต่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนไปที่ 2.5 และ 5 โวลต์ ตามลำดับ

## บทที่ 4

# วิเคราะห์และอภิปรายผล

### 4.1 การพัฒนาระบบและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

เมื่อระบบมีความพร้อมที่จะทำการสเปค จึงได้เริ่มทำการสเปคตามเงื่อนไข โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 550 โวลต์ ที่ความดัน  $1.2 \times 10^{-1}$  mbar ซึ่งระดับสุญญากาศจะต่ำกว่างานวิจัยที่ใช้อ้างอิง [16] ผลปรากฏว่า ไม่สามารถจุดพลาสมาได้ เนื่องจากภายใน chamber มีโมเลกุลของแก๊สอาร์กอนน้อยเกินกว่า ที่จะจุดพลาสมาติดได้ จึงได้ทำการพัฒนาระบบด้วยการเติมเครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊สอาร์กอนเข้าไปช่วยเพิ่มมวลโมเลกุลในตัว chamber เพราะว่าแก๊สอาร์กอนมีมวลหนักและเป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น

#### 4.1.1 เครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊สอาร์กอน

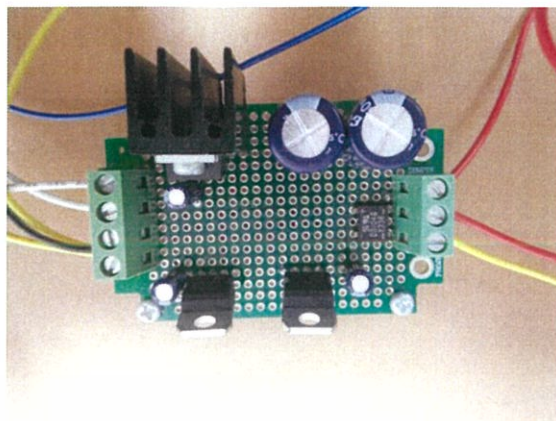
เครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (Mass flow controller) เป็นอุปกรณ์ที่คอยคุมแก๊สด้วยการคำนวณมวลน้ำหนักของแก๊สตัวที่ใช้ ซึ่งควบคุมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 0 ถึง 5 โวลต์ จากบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์อาดูโน่ ด้วย i2c ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ส่วนควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้า 0 ถึง 5 โวลต์ ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์อาดูโน่

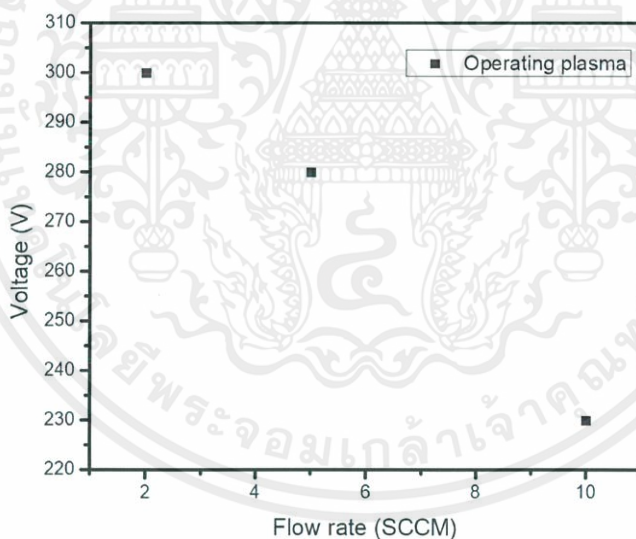
และระบบไฟที่ใช้เลี้ยงการทำงานของตัวเครื่องด้วยแรงจ่ายไฟฟ้า +15 และ -15 โวลต์ ที่มีสายดินร่วมกัน ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนจะช่วยควบคุมปริมาณของแก๊สอาร์กอนได้ด้วยการจ่ายแหล่งดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 ถึง 5 โวลต์ ในการปรับค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน มันจะช่วยในการควบคุมปริมาณมวลโมเลกุลแก๊สอาร์กอน ซึ่งช่วยในการทำให้เกิดพลาสมาและเพิ่มอัตราการชนหน้าเป้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า +15 และ -15 โวลต์ จากหม้อแปลง 220 โวลต์

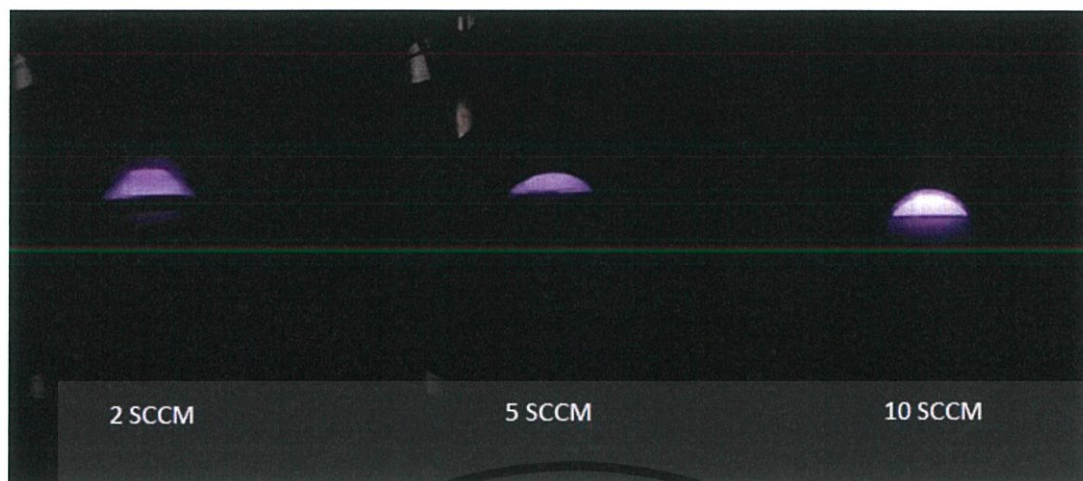
จากที่กล่าวมาจึงได้ทำการแบ่งเงื่อนไขการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเป็น 2, 5 และ 10 SCCM เพื่อทำการหาค่าของแรงดันไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ผลปรากฏว่าที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2, 5 และ 10 SCCM จุดพลาสมาติดที่ 300, 280 และ 230 โวลต์ ตามลำดับ และระดับสุญญากาศหลังจากฉีดแก๊สเข้าไปในตัว chamber อยู่ที่  $1.2 \times 10^{-1}$ ,  $1.3 \times 10^{-1}$  และ  $1.5 \times 10^{-1}$  mbar ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลของการเกิดพลาสมาที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการไหลของแก๊ส

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ายังมีมวลแก๊สอาร์กอนเพิ่มขึ้นสามารถจุดพลาสมาติดได้ในที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำลง และสีพลาสมาของแก๊สอาร์กอนมีสีชมพู แล้วเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าไปที่ 550 โวลต์ตามเงื่อนไขที่ใช้สปีด จะเห็นว่าสีของพลาสมาเข้มไม่เท่ากัน ตามรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยังมีมวลโมเลกุลของแก๊สมากยิ่งขึ้นทำให้มีความเข้มของพลาสมาเพิ่มขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สีของพลาสมาแรงดันไฟฟ้า 550 โวลต์ ที่อัตราการไหลแก๊สอาร์กอนต่างกัน

## 4.2 ผลของฟิล์มบาง

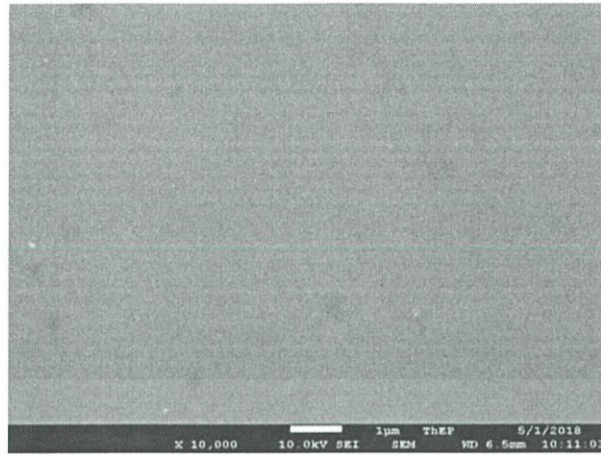
ผลการทดลองที่ได้จากการทำวิจัยนั้นคือแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยผู้วิจัยจะทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) จากทางด้านบน (Top-view) ของแผ่นฟิล์มเพื่อดูการพอร์มตัวของเนื้อฟิล์มที่เกิดขึ้นและดูแบบภาพตัดขวาง (Cross-section) ของแผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ เพื่อดูความหนาของเนื้อฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในอัตราการไหลของแก๊สที่ 2, 5 และ 10 SCCM และเครื่อง X-ray diffraction (XRD) เพื่อดูโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เกิดขึ้น



(ก)

รูปที่ 4.5 (ก)ภาพ SEM แบบ Top-view ของฟิล์มในอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM, (ข) 5 SCCM และ(ค) 10 SCCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

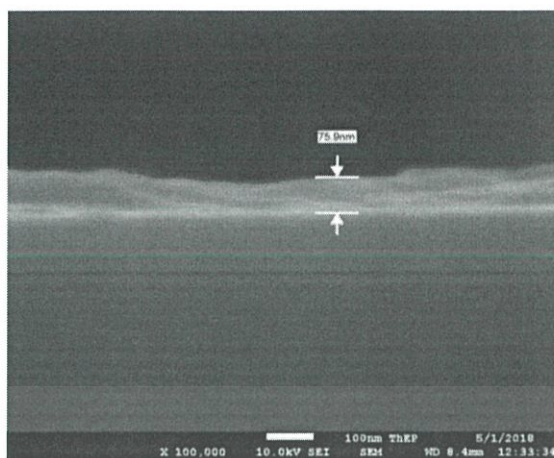


(ค)

รูปที่ 4.5 (ต่อ) (ก)ภาพ SEM แบบ Top-view ของฟิล์มในอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM, (ข) 5 SCCM และ(ค) 10 SCCM

จากรูปที่ 4.5 เป็นภาพที่ได้จากเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) จากด้านบน (Top-view) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นได้ว่าเนื้อฟิล์มที่มีอัตราการไหลของแก๊สที่ 2, 5 และ 10 SCCM ตามลำดับ มีการฟอร์มตัวกันเป็นระเบียบ ซึ่งสังเกตจากการที่ไม่พบเนื้อฟิล์มเป็นกลุ่มเป็นก้อน แต่จะเห็นว่าตั้งแต่ภาพของเนื้อฟิล์มที่มีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนตั้งแต่ 2, 5 และ 10 ตามลำดับ จะมีลักษณะจุดสีดำจางๆใหญ่ไปจนไม่มีจุดสีดำจางๆบนหน้าฟิล์มตามลำดับของอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ซึ่งเกิดจากการที่ชั้นเนื้อฟิล์มขณะทำการสปัตนั้นยังไม่เต็มชั้นดีพอ จึงทำให้เกิดช่องว่างเป็นลักษณะจุดสีดำจางๆบนแผ่นของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

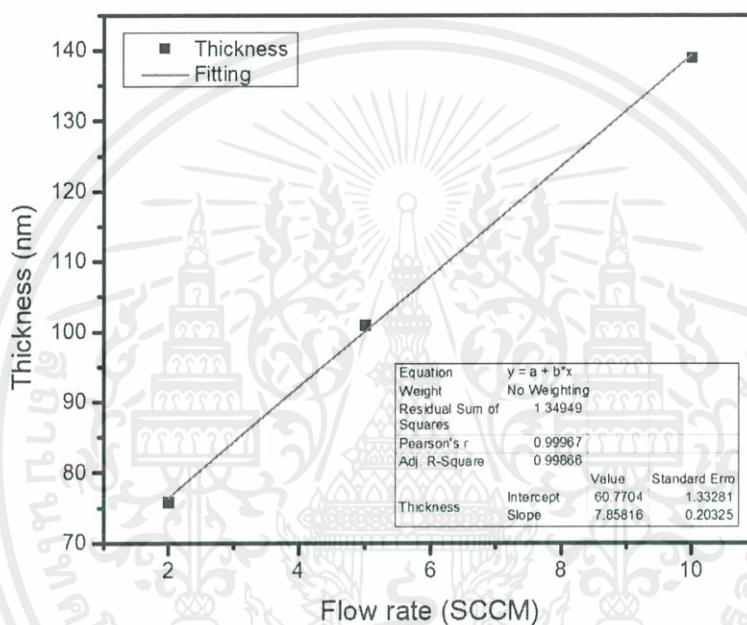


(ค)

รูปที่ 4.6 ภาพ SEM แบบภาพตัดขวางของฟิล์มในอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ (ก) 2 SCCM  
(ข) 5 SCCM (ค) 10 SCCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

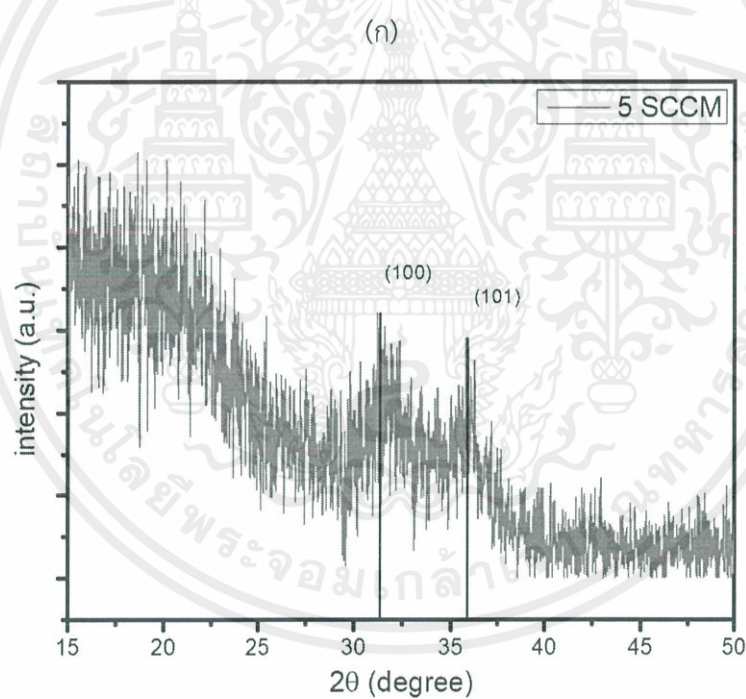
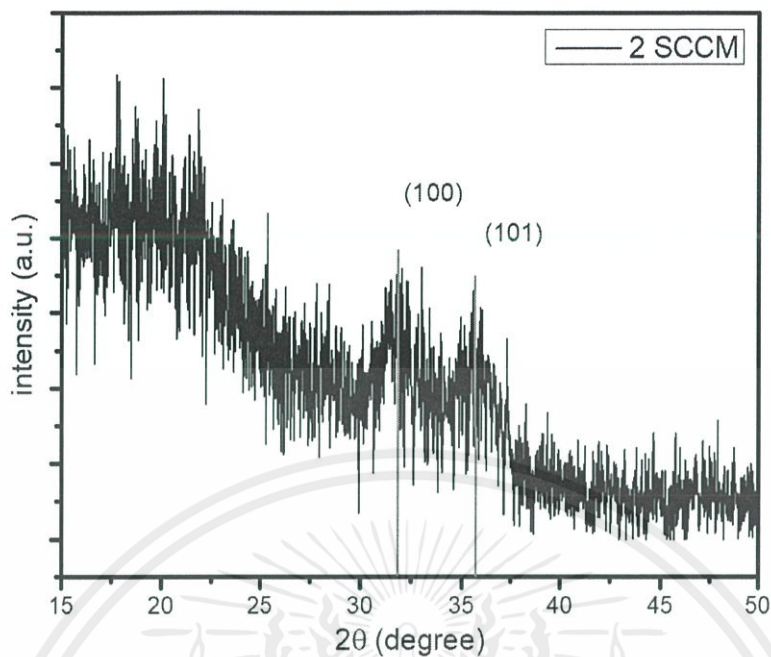
จากผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง Scanning electron microscope(SEM) แบบภาพตัดขวาง ตามรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเวลาในการทำสเปตเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ความหนาของเนื้อฟิล์มที่มีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2 5 และ 10 SCCM ตามลำดับ มีความหนาอยู่ที่ 76 101 และ 139 nm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายิ่งมีปริมาณของแก๊สอาร์กอนมากขึ้น จะยิ่งทำให้ฟิล์มบางมีความหนามากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่แก๊สอาร์กอนที่แตกตัวเป็นพลาสมาแล้วเกิดการชนที่เป้าเนื้อสารเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า bombardment โดยปริมาณของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มจะส่งผลทำให้มีโอกาสชนเป้าเนื้อสารมากขึ้น [14]



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาและปริมาณของแก๊สอาร์กอน

จากรูปที่ 4.7 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ความหนาและปริมาณของแก๊สอาร์กอนที่มีอัตราการไหลต่างกันโดยจะนำผลรูปที่ 4.6 มาประมวลผล ซึ่งกราฟนี้จะใช้วิธีคำนวณหาค่ากำลังสองน้อยสุด (Least square) เพื่อหาแนวโน้มของการเกิดฟิล์มที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาและอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เพราะว่าหลักการสเปตนั้นจะให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวเป็นพลาสมาภายในสนามไฟฟ้า แล้วให้อิออนอาร์กอนไปชนเป้าเนื้อสาร เพื่อให้สารตกลงมาก่อตัวบนฐานรับรอง โดยงานวิจัยนี้ใช้เวลา 8 ชั่วโมง ในการทำสเปตทุกการทดลอง เพื่อดูความหนาที่เกิดจากอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ต่างกัน ซึ่งจำนวนอิออนของอาร์กอนจะแปรผันตรงตามอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน จากผลการทดลองจะเห็นว่า อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2, 5 และ 10 SCCM ตามลำดับ มีความหนา 76, 101 และ 139 nm ตามลำดับ เท่ากับว่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนยิ่งสูง ความหนายิ่งเพิ่มตาม แต่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 0 SCCM เมื่อทำการทดลองผลที่ได้คือ พลาสมาจุดไม่ติด จึงไม่เกิดการสเปตความหนาของเนื้อฟิล์มจึงไม่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

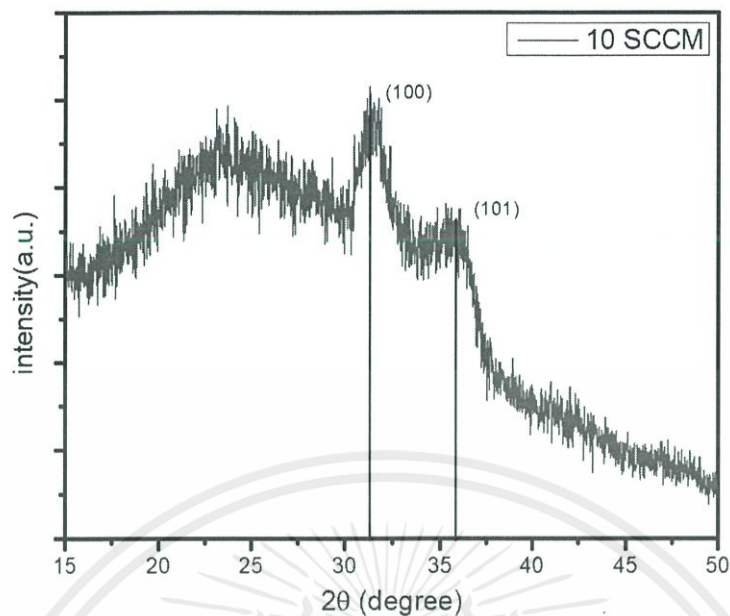


(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) กราฟ X-Ray Diffraction ของฟิล์มที่มีอัตราการไหลแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM

(ข) 5 SCCM (ค) 10 SCCM

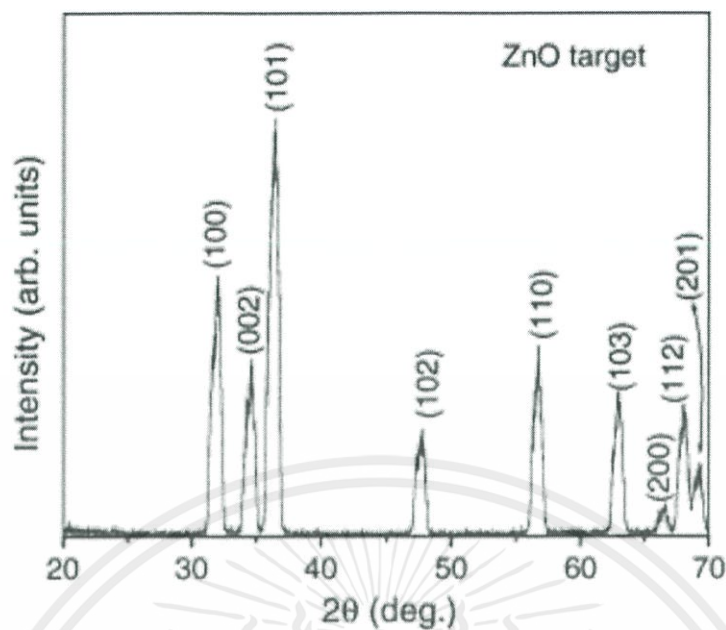
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.8 (ต่อ) (ก) กราฟ X-Ray Diffraction ของฟิล์มที่มีอัตราการไหลแก๊สอาร์กอนที่ 2 SCCM  
(ข) 5 SCCM (ค) 10 SCCM

จากรูปที่ 4.8 เป็นภาพจากเครื่อง X-Ray Diffraction ที่ใช้หาและวิเคราะห์ความเป็นผลึกและขนาดของธาตุหรือสารประกอบ ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่า อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2, 5 และ 10 SCCM มีระนาบ (100) และ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 และ 10 SCCM มีระนาบ (101) ซึ่งเป็นระนาบของ ซิงค์ออกไซด์โดยอ้างอิงจาก (JCPDS Powder Diffraction File Card No. 05-0664) ตามรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้หาความเป็นผลึกในการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นเป้าหมายในการทำสเปกโตรสโกปีแบบไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้แก๊สอาร์กอนในการทำพลาสมา จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 2 และ 5 SCCM จะมีค่าความหนาฟิล์มที่ต่ำกว่าที่ 10 SCCM แต่ให้กราฟความเป็นผลึกได้ดีกว่าที่ 10 SCCM แสดงให้เห็นว่ายิ่งเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนถึงแม้จะให้ความหนาที่หนากว่าในเวลาเท่ากัน แต่การฟอร์มตัวของโครงสร้างแยกกว่าอัตราการไหลของแก๊สที่ 2 และ 5 SCCM



รูปที่ 4.9 ผล X-Ray Diffraction ที่ใช้เปรียบเทียบกับผลฟิล์มบาง[16]

จากผลของเครื่อง X-Ray Diffraction จะแสดงพีคที่เด่นชัดคือพีคที่ 31 และ 36 องศา ทำให้รู้ว่าฟิล์มบางที่เกิดขึ้นคือ ซิงค์ออกไซด์ โดยเปรียบเทียบจากงานวิจัย[16] ซึ่งผิดพลาดจากผลที่ตั้งไว้ ที่ควรจะเป็นซิงค์อย่างเดียว แต่ทำให้รู้ว่าเครื่องดีซีสปีดเตอร์ริงสามารถสร้างฟิล์มได้ แต่ยังมีคุณสมบัติของฟิล์มน้อยเกินไป โดยเป็นผลมาจากระดับความดันสุญญากาศของระบบ และรอยร้าวของตัวระบบนั่นเอง

## บทที่ 5

# สรุปผลการดำเนินงาน

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การพัฒนาาระบบเครื่องสเปตโตริงไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเป็นเพิ่มเติมระบบควบคุมอัตราการไหลของแก๊สที่จะเข้าไปในระบบ โดยสามารถควบคุมด้วยตัวเครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊สซึ่งตัวเครื่องควบคุมจะคำนวณมวลที่ไหลผ่านเข้ามาแล้วควบคุมปริมาณการไหลด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 ถึง 5 โวลต์ โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้า  $\pm 15$  โวลต์และบอร์ดเอาต์พุตควบคุมการจ่ายแหล่งดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 ถึง 5 โวลต์ สามารถทำให้ระบบสเปตโตริงสามารถจุดพลาสมาติดได้ง่ายขึ้น ในที่มีระดับความดันต่ำลง และยังทำให้เพิ่มโอกาสของการชนเนื้อเป้าสารด้วยอะตอมไอออนของอาร์กอน โดยสังเกตความหนาจากผลของฟิล์มในความแตกต่างของระดับอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ต่างกัน

### 5.2 แนวทางในการพัฒนาระบบสเปตโตริง

#### 5.2.1 ระบบอัตราการไหลแก๊สแบบผสม

ระบบอัตราการไหลแก๊สแบบผสม คือ การควบคุมแก๊สที่เป็นปัจจัยในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเพื่อให้การทดลองเป็นไปในแนวทางที่กำหนดและมีความเสถียรโดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างเนื้อสารที่หลุดออกจากเป้ากับแก๊สที่ปล่อยเข้าไป (reactive gases) ซึ่งในทางดำเนินการจะต้องใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊ส (Mass flow controller) มากกว่าหนึ่งตัวในการดำเนินงาน

#### 5.2.2 เครื่องสเปตโตริงแมกนีตรอนไฟฟ้ากระแสตรงแบบจั้งหะ

เครื่องสเปตโตริงแมกนีตรอนไฟฟ้ากระแสตรงแบบจั้งหะ (Pulsed DC Sputtering) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปกติแต่จะใช้แหล่งจ่ายสองตัวที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขั้วต่างกัน เพื่อเอาไว้ใช้ไล่ประจุบนหน้าเป้าของสารในเวลาทำการสเปต ซึ่งสามารถสเปตเป้าเนื้อสารที่เป็นออกไซด์หรือสารที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าได้

## บรรณานุกรม

- [1] P. Martin, Handbook of deposition technologies for films and coatings. Amsterdam: Elsevier, 2010.
- [2] D. Smith, Thin-film deposition. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [3] "2. ปั๊มประเภทโรตารี (Rotary pump type)", Industrialpumps-tsy.blogspot.com, 2017. [Online]. Available: <http://industrialpumps-tsy.blogspot.com/2013/07/2-rotary-pump-type.html>. [Accessed: 05- Oct- 2017].
- [4] "Cite a Website - Cite This For Me", Mte.kmutt.ac.th, 2017. [Online]. Available:[http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Bicycle\\_Air\\_Engine/lesson1\\_2.html](http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Bicycle_Air_Engine/lesson1_2.html). [Accessed: 05- Oct- 2017].
- [5] "PVD Hard Film Coater & Equipments supplier in Thailand ,TiN TiAlN , Arc Ion Evaporator, Ion Source, Plasma filtering system", Nanoshield-pvd.com, 2017. [Online]. Available: [http://www.nanoshield-pvd.com/pvd\\_thai.html](http://www.nanoshield-pvd.com/pvd_thai.html). [Accessed: 05- Oct- 2017].
- [6] "Thin film deposition process", Vt-sun.com, 2017. [Online]. Available: [http://www.vtsun.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=10&Itemid=9&lang=th](http://www.vtsun.com/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=9&lang=th). [Accessed: 05- Oct- 2017].
- [7] "พลาสมา (สถานะของสสาร)", Th.wikipedia.org, 2017. [Online]. Available: [https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%B2\\_\(%E0%B8%AA%E0%B8%96%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B0%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3\)](https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%B2_(%E0%B8%AA%E0%B8%96%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%B0%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3)). [Accessed: 08- Sep- 2017].
- [8] "X-ray Diffractometer XRD", Web2.mfu.ac.th, 2017. [Online]. Available: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B9%8C%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B9%89%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%9A%E0%B8%99%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%8B%E0%B9%8C-xrd.html>. [Accessed: 17- Sep- 2017].
- [10] "UV/VIS Spectroscopy – ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC)",

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www2.nanotec.or.th, 2017. [Online]. Available:

[https://www2.nanotec.or.th/th/?page\\_id=575](https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=575). [Accessed: 17- Sep- 2017].

[11] "Electron microscope ", il.mahidol.ac.th, 2017. [Online]. Available:

<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. [Accessed: 17- Sep- 2017].

[12] "การแบ่งประเภทของปั๊ม (Classification of Pumps)", Industrialpumps-  
tsy.blogspot.com, 2017. [Online]. Available: <http://industrialpumps->

[tsy.blogspot.com/2013/06/classifications-of-pumps.html](http://industrialpumps-). [Accessed: 06- Aug- 2017].

[13] Kelly,P.J. and Arnell, R.D., Magnetron sputtering: a review of recent  
developments and applications, Vacuum, Vol. 56, pp.52, 2000.

[14] Huatang Cao, Jeff Th.M.De Hosson and Yutao Pei, Effect of carbon concentration  
and argon flow rate on the microstructure and triboperformance of magnetron  
pp.142-152, 2017.

[15] Sree Harsha, K.S., Principles of Vapor Deposition of Thin Films, 2006.

[16] Banerjee A.N., Ghosh C.K., Chattopadhyay K.K., Minoura Hideki, Sarrkar Ajay K.,  
Akiba Atsuya, Kamiya Atsushi, Endo Tamio, Low-temperure deposition of ZnO  
thin films on PET and glass substrates by DC- sputtering technique,  
Thin Solid Films, Vol. 496, Issue. 1, pp. 112-116, 2006.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายจิรพัฒน์ กฤษฎาเรืองชัย

วัน เดือน ปีเกิด อาทิตย์ที่ 10 กันยายน พ.ศ.2538

ที่อยู่ปัจจุบัน 1334/109 ถ.ปราจีนอนุสรณ์ ต.หน้าเมือง อ.เมือง จ.ปราจีนบุรี 25000

ประวัติการศึกษา จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ชลบุรี  
จบระดับอุดมศึกษาปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้