

การพัฒนาระบบแม่เหล็กสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบอิเล็กทรอนิกส์โคตรอนโซโคตรอนเรโซแนนซ์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF MAGNETIC SYSTEM FOR ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE  
PLASMA GENERATOR

Mr. Kriengkai Puwadolkij



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบแม่เหล็กสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมา
	แบบอิเล็กทรอนิกส์โคเลตรอนเรโซแนนซ์
โดย	นายเกรียงไกร ภูวดลกิจ
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เพ่งวาณิชย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เพ่งวาณิชย์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปานทิพย์ อัมพรรัตน์)

เกรียงไกร ภูวดลกิจ : การพัฒนาระบบแม่เหล็กสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบ  
อิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ (DEVELOPMENT OF MAGNETIC SYSTEM FOR  
ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE PLASMA GENERATOR) อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์, หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเร  
โซแนนซ์ (ECR) เพื่อนำไปใช้เคลือบอนุภาคโลหะลงบนผิวชิ้นงานต่างๆ ซึ่งคุณสมบัติเด่นของเทคนิค  
อิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ คือมีการไอออนไนเซชันสูงและให้ความหนาแน่นพลาสมาสูง เป็น  
การพัฒนาต่อยอดจากเครื่องกำเนิดแบบไมโครเวฟอิเล็กตรอนที่มีอยู่ โดยออกแบบแม่เหล็กถาวร  
ชนิดนีโอดีเมียมเกรด N35 เพื่อติดตั้งกับกระบอกสุญญากาศส่วนบนซึ่งทำหน้าที่เป็นท่อนำคลื่น  
ทรงกระบอกโหมด TE11 มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 875 เกาส์อยู่ตรงจุดศูนย์กลาง ซึ่งอยู่  
ภายในขอบเขตที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟมากที่สุดสำหรับโหมด TE11 ผลการ  
ทดสอบเคลือบอนุภาคทองแดงลงบนชิ้นงานอลูมิเนียมเกรด 6061 ใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 700W  
นาน 15 นาที ที่ความดัน  $5 \times 10^{-1}$  Torr ปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสวัสดุเป้าหมายระหว่าง 500 ถึง 1200 โวลต์  
พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของทองแดงเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อทดลองโดยการใช้  
แรงดันไฟฟ้าไบอัสอย่างเดียวและใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมด้วยเปรียบเทียบกับการใช้อิเล็กตรอนไซโคลต  
รอนเรโซแนนซ์ พบว่าการใช้อิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ให้ผลการเคลือบและปริมาณ  
เปอร์เซ็นต์ของทองแดงดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558



# # 5670126921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: PLASMA GENERATOR / ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE / PERMANENT MAGNET

KRIENGKAI PUWADOLKIJ: DEVELOPMENT OF MAGNETIC SYSTEM FOR ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE PLASMA GENERATOR. ADVISOR: PHONGPHAETH PENGVANICH, Ph.D., pp.

This research is the development of an electron cyclotron resonance (ECR) plasma generator to be used for coating metal particles onto the surface of a substrate. The notable features of ECR include high ionization rate and high-density. This ECR is developed based on the existing microwave electron plasma generator. The neodymium permanent magnet grade N35 has been designed and installed on the upper cylinder chamber, which acts as a circular waveguide TE11 mode, such that the 875 gauss magnetic field line density lies at center of the chamber within area of highest electric field intensity for circular waveguide TE11 mode. The testing result of coating copper particles onto an aluminum substrate, using a 2.45GHz microwave 700W for 15 minutes at a pressure of  $5 \times 10^{-1}$  Torr, adjusting the target bias voltage between 500 and 1200 volts, found that the percentage of copper increases when the voltage increased. A comparison between DC glow discharge, Microwave and ECR discharge found that the ECR system had better performance and higher percentage of copper coating.

Department: Nuclear Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Nuclear Technology      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือ และความเอื้อเฟื้อจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่ง วาณิชย์ และ อ.ดร.ปานทิพย์ อัมพรรัตน์ ที่คอยให้คำปรึกษา ข้อคิด คำแนะนำ ทุนการวิจัย อุปกรณ์เครื่องมือและตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณสำหรับความอนุเคราะห์ด้านงบประมาณและเครื่องมือจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชั่น สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ และสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ขอขอบคุณทางหุ้นส่วนจำกัด นพเทค ที่ให้ความช่วยเหลือในงานกลึงและติดตั้งแม่เหล็กถาวร

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย .....	3
1.4.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	3
1.4.3 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์ .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	6
2.1 กระบวนการไอออนไนเซชัน .....	7
2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง .....	8
2.3 ปฏิกิริยาการสปัตเตอร์ริง (Sputtering).....	11
2.4.1 ประสิทธิภาพการสปัตเตอร์ (Sputter Yield).....	12
2.4.2 ความเร็วและ Mean free path ของสปัตเตอร์อะตอม.....	12
2.4.3 องค์ประกอบของระบบสปัตเตอร์ริง .....	15
2.5 การส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ.....	18

2.6 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก .....	24
บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอีซีอาร์สปัตเตอร์ริง.....	27
3.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอีซีอาร์สปัตเตอร์ริง .....	27
3.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ .....	27
3.1.2 กระจกเรโซแนนซ์ (Resonance Chamber).....	27
3.1.3 แม่เหล็กถาวร .....	28
3.1.4 กระจกสุญญากาศหลัก (Main Chamber) .....	28
3.1.5 ป้อนสุญญากาศ .....	29
3.1.6 ระบบจ่ายแก๊ส (Feed Gas System).....	29
3.1.7 ระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Power Supply) .....	30
3.2 ชุดกระจกสุญญากาศหลัก .....	30
3.3 กระจกเรโซแนนซ์.....	32
3.4 การออกแบบแม่เหล็กถาวร .....	34
3.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Power Supply).....	48
3.6 ระบบสุญญากาศ.....	50
3.7 ระบบจ่ายแก๊สอาร์กอน .....	50
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....	52
4.1 การทดสอบระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า .....	52
4.2 การทดสอบระบบสุญญากาศและระบบจ่ายแก๊ส .....	53
4.3 การเตรียมวัสดุชิ้นงาน .....	54
4.4 การทดลองการเคลือบ.....	54
4.4.1 ทดสอบการเกิดพลาสมาจากแรงดันดีซี.....	55
4.4.2 ทดสอบการเกิดพลาสมาจากคลื่นไมโครเวฟ .....	57

4.4.3 ทดสอบการเกิดพลาสมาจาก ECR.....	58
4.5 การวิเคราะห์.....	59
4.5.1 เทคนิคการวิเคราะห์ SEM-EDS.....	59
4.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface Morphology) .....	60
4.5.2.1 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X.....	62
4.5.2.2 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500X.....	63
4.5.2.3 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 1000X.....	64
4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Composition analysis).....	65
4.5.3.1 ตัวอย่าง Al6061 ชิ้นงานเปล่า.....	65
4.5.3.2 ตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยแรงดันดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V.....	66
4.5.4.3 ตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V.....	73
4.5.4.4 ตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR และแรงดันดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V.....	80
4.6 อภิปรายผลการทดลอง.....	89
4.6.1 ผลกระทบเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า.....	89
4.6.2 ผลกระทบเมื่อมีคลื่นไมโครเวฟ.....	90
4.6.3 ผลกระทบเมื่อใช้ระบบ ECR.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะและงานที่สามารถทำได้ .....	92
.....	94
รายการอ้างอิง .....	94

ญ

หน้า

ภาคผนวก..... 96

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 101



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 โหมดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 23

ตารางที่ 3.1 ค่า  $p'nm$  และความถี่คัทออฟในโหมด TE..... 33

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต ..... 52

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดลอง..... 55

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบธาตุของทั้ง 13 ชั้นงาน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล ..... 88



สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอม..... 8

รูปที่ 2.2 กระบวนการและเทคนิคต่างๆในการสร้างฟิล์มบาง ..... 10

รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาเมื่ออนุภาคพุ่งชนผิววัสดุ..... 11

รูปที่ 2.4 การแจกแจงพลังงานของสปีดเตอร์อะตอมเมื่อไอออนที่พุ่งชนมีพลังงานตั้งแต่ 80-1200eV ..... 12

รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายตัวของพลังงานสปีดเตอร์อะตอมขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่พุ่งเข้าชน . 13

รูปที่ 2.6 แสดงพลังงานของไอออนที่พุ่งเข้าชนและมุมปะทะมีผลต่อพลังงานของสปีดเตอร์อะตอม ..... 13

รูปที่ 2.7 ค่า mean free path, อัตราการพุ่งชน, เวลาในการสร้าง monolayer เทียบกับความดันแก๊ส..... 14

รูปที่ 2.8 โครงร่างของฐานวัสดุเป้าและ ground shield..... 15

รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมแก๊สที่พลังงานของอิเล็กตรอนต่างๆ ..... 16

รูปที่ 2.10 การจัดวางแบ่งวัสดุเป้าเป็นส่วนๆสำหรับสร้างฟิล์มที่เป็นสารประกอบหรือโลหะผสม..... 17

รูปที่ 2.11 การเตรียมวัสดุเป้าที่เป็นผงสารประกอบโดยใส่ลงบนจานเหล็กกล้าไร้สนิม..... 17

รูปที่ 2.12 แบบจำลองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 19

รูปที่ 2.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (k), E, B ในท่อนำคลื่นแต่ละโหมด ..... 20

รูปที่ 2.14 รูปท่อนำคลื่นทรงกลมในพิกัด xyz..... 20

รูปที่ 2.15 Right-Hand Polarization wave (R wave) ..... 23

รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ..... 25

รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของ **E** ตั้งฉากกับ **B**..... 25

รูปที่ 3.1 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรรูปร่างวงแหวนโดนัท ..... 28

รูปที่ 3.2 รูปโครงสร้างภายนอกและภาพตัดขวางของชุดกระบอกสุญญากาศ..... 29



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอีซีอาร์สปีดเตอร์ริง.....	30
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบต่างๆของกระบอกสุญญากาศหลัก.....	31
รูปที่ 3.5 รูปจำลองชุดวัสดุเป้าและชุดวางวัสดุชิ้นงาน .....	32
รูปที่ 3.6 รูปจำลองสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นทรงกระบอกโหมด TE <sub>11</sub> .....	34
รูปที่ 3.7 เครื่องมือในงานวิจัยของ D.T. Tran, T.A. Grotjohn, D.K. Reinhard, J. Asmussen ....	36
รูปที่ 3.8 เครื่องมือในงานวิจัยของ Akira Murai, Izumi Ohya, Toshiaki Yasui, Hirokazu Tahara, Takao Yoshikawa .....	37
รูปที่ 3.9 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกขนาด 50x50 มม. จำนวน 7 ก้อน.....	38
รูปที่ 3.10 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. จำนวน 6 ก้อน .....	40
รูปที่ 3.11 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกขนาด 20x55 มม. จำนวน 18 แท่ง .....	41
รูปที่ 3.12 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงสี่เหลี่ยมขนาด 45x25x15 มม. จำนวน 2 ชั้น ชั้นละ 12 แท่ง .....	42
รูปที่ 3.13 ขนาดและรูปทรงของแม่เหล็กครึ่งวงกลมสองชิ้น.....	43
รูปที่ 3.14 ภาพตัดขวางของกระบอกเรโซแนนซ์.....	44
รูปที่ 3.15 ติดตั้งแม่เหล็กเข้ากับกระบอกเรโซแนนซ์ .....	45
รูปที่ 3.16 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในระนาบ yz .....	45
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในเส้นแกน y ที่ x=0, z=0 .....	46
รูปที่ 3.18 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในระนาบ xz .....	46
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในเส้นแกน x ที่ y=0, z=0 .....	47
รูปที่ 3.20 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในระนาบ xy .....	47
รูปที่ 3.21 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง .....	48
รูปที่ 3.22 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น .....	49

รูปที่ 3.23 วงจรระบบแหล่งจ่ายไฟของเตาไมโครเวฟ.....	50
รูปที่ 3.24 ระบบจ่ายแก๊สและระบบสุญญากาศ .....	51
รูปที่ 4.1 สารประกอบของชิ้นงานอลูมิเนียม .....	54
รูปที่ 4.2 ชิ้นงานอลูมิเนียม ภาพด้านซ้ายหลังขัดผิว และขวาก่อนขัดผิว.....	54
รูปที่ 4.3 พลาสมาที่แรงดันดีซีลบ 800 V .....	56
รูปที่ 4.4 พลาสมาที่แรงดันดีซีลบ 500 V .....	56
รูปที่ 4.5 พลาสมาที่แรงดันลบ 500 V และไมโครเวฟ 700 W .....	57
รูปที่ 4.6 พลาสมาที่แรงดันลบ 800 V และไมโครเวฟ 700 W .....	57
รูปที่ 4.7 พลาสมาที่แรงดันลบ 1200 V และไมโครเวฟ 700 W .....	57
รูปที่ 4.8 พลาสมาอาร์กอนเมื่อเปิดไมโครเวฟแต่ยังไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้าดีซี .....	58
รูปที่ 4.9 พลาสมา ECR ที่แรงดันลบ 800 V .....	59
รูปที่ 4.10 พลาสมา ECR ที่แรงดันลบ 500 V .....	59
รูปที่ 4.11 พลาสมา ECR ที่แรงดันลบ 1200 V .....	59
รูปที่ 4.12 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X.....	62
รูปที่ 4.13 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500X.....	63
รูปที่ 4.14 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 1000X .....	64
รูปที่ 4.15 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่ยังไม่ได้ทดสอบ.....	65
รูปที่ 4.16 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้าดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V .....	72
รูปที่ 4.17 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและ แรงดันไฟฟ้าดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V.....	79
รูปที่ 4.18 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้าดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V.....	86
รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงองค์ประกอบธาตุของทั้ง 13 ชิ้นงานทดลอง .....	88

รูปที่ ก. 1 ข้อมูลทางเทคนิคของแก้ว Borosilicate.....	97
รูปที่ ก. 2 ข้อมูลแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมตามเกรดมาตรฐานจีน.....	98
รูปที่ ก. 3 ไบร่บรองผลิตภัณ์จากผู้ผลิตแผ่นอลูมิเนียม 6061 .....	99
รูปที่ ก. 4 ข้อมูลทางเทคนิคของ Pressure Regulator รุ่น 25GX-10 .....	100



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลาสมา (Plasma) มีคำจำกัดความว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร (อีกสามสถานะคือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส) คือเป็นแก๊สที่แตกตัวเป็น ไอออน มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก พลาสมาเกิดขึ้นได้เมื่อมีอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานเหมาะสมชนและทำให้อะตอมแก๊สที่เป็น กลาง (neutral gas) สูญเสียอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดไป ไอออนที่ได้อาจเกิดจาก single ionized หรือ multiple ionized ด้วยเหตุนี้พลาสมาจึงประกอบด้วยอะตอมที่เป็นกลาง, อิเล็กตรอนอิสระ, ไอออนบวกและลบ 99% ของสสารในจักรวาลอยู่ในสถานะที่เป็นพลาสมา แต่ดาวเคราะห์อย่าง โลกของเราเป็นเพียง 1% ที่ไม่มีพลาสมาเป็นปกติในธรรมชาติเนื่องจากชั้นบรรยากาศของโลกไม่มีอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ทำให้มีการแตกตัวเป็นประจุต่ำมาก อย่างไรก็ตามมีบ้างที่เกิดพลาสมาขึ้นในธรรมชาติบนพื้นโลก เช่น การเกิดฟ้าผ่าเมื่อชั้นบรรยากาศปลดปล่อยประจุไฟฟ้าลงมายังพื้นโลก การเกิด Polar light เมื่ออนุภาคที่มีประจุจากจักรวาลชนกับอะตอมของชั้นบรรยากาศ เป็นต้น พลาสมาสามารถประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้สนามไฟฟ้าหรือทำให้แก๊สมีพลังงานที่เหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้อะตอมแตกตัวเป็น ไอออนได้ ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นต้นกำเนิดพลาสมา ได้แก่ หลอดไฟฟ้า, พลังงานฟิวชัน, ที่ิวพลาสมา, Plasma-based surface processes เป็นต้น

ตลอด 50 ปีมาแล้วที่ได้มีการคิดค้นวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้าน Plasma-based surface processes ก่อให้เกิดเทคโนโลยีต่างๆ เช่น ion implantation, sputtering, etching, deposition และ plasma spray เทคโนโลยีเหล่านี้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถทำให้เกิดการเพิ่มหรือลดคุณสมบัติบางอย่างของวัสดุที่ต้องการได้โดยไม่ส่งผลต่อตัววัสดุโดยตรง จนกลายเป็นกระบวนการที่สำคัญของอุตสาหกรรมขนาดใหญ่หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการผลิตวงจรรีเลย์อินทิเกรต integrated circuits (ICs), อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์, เครื่องบินเหล็กกล้า และยานอวกาศ, อุตสาหกรรมการผลิตและแปรรูปเหล็กกล้าและโลหะ, วิชาการแพทย์, การจัดการของเสียที่เป็นพิษ เป็นต้น เทคโนโลยีพลาสมาสามารถจัดการกับโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุซึ่งไม่อาจทำได้โดยวิธีกระบวนการอื่น ตัวอย่างเช่น การทำรอยกว้าง  $0.2\mu\text{m}$  ลึก  $4\mu\text{m}$

บนแผ่นฟิล์มซิลิคอน ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผมของมนุษย์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 $\mu\text{m}$ , การสร้างวัสดุพิเศษอย่าง diamond film หรือ amorphous silicon สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, การเคลือบเสริมความแข็งแรงทนทานของกระดูกสะโพกเทียมและชิ้นส่วนเครื่องจักร ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานขึ้นอย่างมาก, การเคลือบเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสในเครื่องยนต์ หรือ ข้อต่ออวัยวะเทียม ฯลฯ

สำหรับงานวิจัยนี้ เกิดจากความคิดที่จะนำเทคโนโลยีพลาสมามาใช้เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุดังเช่นที่เกิดขึ้น ณ โรงไฟฟ้าฟูกูชิม่า ไดอิจิ ประเทศญี่ปุ่น [1] ซึ่งเกิดการระเบิดของแก๊สไฮโดรเจนขึ้น อันเนื่องมาจากการสะสมของแก๊สไฮโดรเจนที่มาจากโลหะผสมเซอร์โคเนียมทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไอน้ำในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงจนเกิดเป็นเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งยังอุณหภูมิสูงปฏิกิริยายังถูกเร่งให้มากขึ้น และเมื่อแก๊สไฮโดรเจนนี้มีปริมาณมากพอก็จะเกิดการระเบิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นจึงได้เริ่มศึกษาเพื่อช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะผสมเซอร์โคเนียม โดยการนำเทคโนโลยีพลาสมาเข้าไปปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการพ่นอนุภาคให้เกิดเป็นฟิล์มบาง

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการพัฒนาเครื่อง ECR (Electron Cyclotron Resonance) sputtering ซึ่งใช้เทคนิค Electron Cyclotron Resonance, Sputtering ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานด้วยการพ่นอนุภาคโลหะลงไป เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) ในงานวิจัยนี้ได้นำโลหะที่มีอยู่ภายในประเทศและราคาถูกมาทดสอบก่อนเนื่องจากโลหะผสมเซอร์โคเนียมเป็นวัสดุควบคุมและยากต่อการนำเข้ามาในประเทศ จึงได้ทำการทดลองการพ่นอนุภาคทองแดงลงบนชิ้นงานอูมิเนียม เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับในอนาคต โดยสามารถใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้เคลือบโลหะผสมเซอร์โคเนียม (Zirconium Alloy) เพื่อช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไอน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาระบบแม่เหล็กสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบอเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ออกแบบและคำนวณสนามแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กถาวร เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ของอิเล็กตรอนกับคลื่นไมโครเวฟสำหรับเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบ ECR พร้อมพัฒนาอุปกรณ์เคลื่อนโลหะทองแดงลงบนพื้นผิวของอลูมิเนียม
- 2) ทดสอบพื้นผิวของชิ้นงาน โดยการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไบอัสของวัสดุเป้าที่ใช้เวลาการเคลื่อนเท่ากัน

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1.4.1 ขั้นตอนการศึกษา

- 1) ศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มบาง
- 2) ศึกษาปรากฏการณ์สปีตเตอร์ริง
- 3) ศึกษาระบบและเทคนิคต่างๆที่ใช้สร้างฟิล์มบาง
- 4) ศึกษาเกี่ยวกับแม่เหล็กถาวร
- 5) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็ก

#### 1.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ออกแบบแม่เหล็กถาวรโดยใช้โปรแกรมจำลอง
- 2) จัดหาอุปกรณ์และประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบ ECR
- 3) ทดสอบการเคลื่อนอนุภาคลงบนพื้นผิววัสดุ
- 4) ตรวจสอบและวิเคราะห์ผล

#### 1.4.3 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) ได้เทคนิคการออกแบบระบบแม่เหล็กสำหรับเครื่อง ECR
- 2) ได้เครื่องเคลื่อนชิ้นงานด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ และสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมหรืออุตสาหกรรมได้

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจากการศึกษาการพัฒนาเครื่อง ECR ในงานวิจัยของ Yoshinobu Kawai, Kiichiro Uchino, Hiroshi Muta, Shinji Kawai, Tobias Rof [2] กล่าวถึงการพัฒนาเครื่องระบบ ECR ที่มีกระบอกสุญญากาศขนาดใหญ่รัศมี 400 มม. สูง 1200 มม. และวัดค่ากระแสไอออนอิ่มตัว (ion saturation current) ในแนวรัศมี ที่ความดันและกำลังไมโครเวฟต่างๆ พบว่ามีความสม่ำเสมอกระแสไอออนในรัศมีระยะ 0-300 มม. ที่ความดันมากกว่า 1 mTorr และอุณหภูมิของอิเล็กตรอนลดลงเมื่อเพิ่มความดัน และงานวิจัยของ Toyohisa Asaji, Hiroshi Sasaki, Hideyuki Furuki, Yushi Kato, Shigeyuki Ishii, Motoichi Kanazawa, Junji Saito [3] ออกแบบและพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ ECR ใช้แม่เหล็กถาวร และมีรัศมีของ cavity resonator 280 มม. สามารถปรับเลื่อนความสูงของ cavity ได้ คลื่นไมโครเวฟจะถูกส่งผ่านเสาอากาศรูปตัวแอล และทำการทดลองวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นนิ่งภายใน cavity ที่ขนาดของ cavity ต่างๆ พบว่าคลื่นในโหมด TE<sub>21</sub>, TE<sub>01</sub> ให้ความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุด และได้ค่าความหนาแน่นกระแสไอออนอิ่มตัวสูงสุด

G. Mohan Rao and S. B. Krupanidhi [4] กล่าวถึงการศึกษาเคลือบฟิล์มบางโบรอนไนไตรด์ด้วยเทคนิคอีซีอาร์สปีดเตอร์ริง ลงบนชิ้นงานซิลิกอน p-type ที่ไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้า RF และอุณหภูมิ 450°C เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โครงสร้างผลึก ความต้านทาน หน้าสัมผัสทางอิเล็กทรอนิกส์ ความหนาแน่นของฟิล์ม พบว่าให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ไม่ใช่อีซีอาร์

E. Camps, et. al. [5] ศึกษาลักษณะเฉพาะของอีซีอาร์ พลาสมาเกิดขึ้นจากการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz เข้าไปใน cavity ทรงกระบอก คลื่นจะมีการเคลื่อนที่เป็นโหมด TE<sub>11</sub> ทรงกระบอกภายนอกจะถูกพันด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าขดลวด โซลินอยด์ 3 ขด ที่ความดันภายใน 10<sup>-4</sup>-10<sup>-2</sup> Torr พบว่าระดับการดูดซับพลังงานของไมโครเวฟเกิดขึ้นสูงเมื่อลดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกลงไปที่เกือบครึ่งของตอนที่เกิดเรโซแนนซ์ ส่งผลให้ความหนาแน่นพลาสมาเกินระดับคริติคอล

L. Zhang, et. al. [6] ศึกษาการเคลือบฟิล์มไททานเนียมด้วยเทคนิคอีซีอาร์แมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงเปรียบเทียบกับเคลือบด้วยเทคนิคอีซีอาร์แมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ผลจากการตรวจด้วย SEM, AFM, XRD และ PAS พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยเทคนิคอีซีอาร์แมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงให้

คุณสมบัติที่ดีกว่าเคลือบด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงอย่างมาก เช่นความหนาแน่น ความเรียบสม่ำเสมอของฟิล์ม

Youl-Moon Sunga, Hee-Je Kimb [7] ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง TiN ที่สร้างด้วยเทคนิคอีซีอาร์สเปคโตรริง ในระบบสุญญากาศที่มีความดันต่ำ  $10^{-6}$  Torr ใช้วัสดุเป้าเป็นไททาเนียม ชั่งงานเป็นซิลิกอนและเหล็กกล้าไร้สนิม 304 คลื่นไมโครเวฟ 2.45GHz ถูกส่งผ่านโดยท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเข้าสู่กระบอกระบายสุญญากาศที่มีแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจนอยู่ ใช้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าสองชุดเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ใช้หัววัดลงมัวร์แบบหัวคู่วัดใกล้ชิ้นงาน ได้ความหนาแน่นอิเล็กตรอน  $10^{17}/\text{m}^3$  ที่ความดันปฏิบัติการ 1 mTorr กำลังคลื่นไมโครเวฟและRFที่ให้แก่วัสดุเป้าเป็น 500 W โดยทดลองปรับแรงดันดีซีไบอัสที่ให้แก่ชิ้นงาน แล้วตรวจวิเคราะห์การยึดติดของฟิล์มกับชิ้นงานด้วย acoustic emission scratch tester และตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์ม, ภาพตัดขวางของฟิล์มด้วยSEM พบว่าแรงดันดีซีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง -25 ถึง -50 V ได้อุณหภูมิอิเล็กตรอน 3-5 eV และกระแสไอออนอิมพัลส์ 1-1.5 mA/cm<sup>2</sup>

ถิรายุ สนทนา [8] พัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟดีซีสเปคโตรริง เพื่อเคลือบอนุภาคโลหะลงบนผิววัสดุ ทดลองโดยการเคลือบอนุภาคทองแดงลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ 0-1000 โวลต์ให้แก่วัสดุเป้า ความดันสุญญากาศ 0.045 Torr ตรวจวิเคราะห์ผลด้วย Scanning electron microscope (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS)

ซึ่งข้อมูลแต่ละงานวิจัยมีส่วนสำคัญในการช่วยออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้น

พลาสมา [9] เป็นแก๊สที่มีสภาพเป็นไอออนคือมีอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัว หลุดออกจากโมเลกุล เป็นประจุอิสระทำให้มีสภาพการนำไฟฟ้า พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก, อนุภาคที่มีประจุลบและอนุภาคที่เป็นกลาง ในสัดส่วนที่ทำให้ประจรรวมสุทธิเป็นศูนย์ โดยประมาณว่ามีความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุบวกและลบเท่ากัน ( $n_e = n_i$ ) พลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้โดย (1) ให้ความร้อนแก่แก๊สส่งผลให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลสูงเกินกว่าพลังงานไอออไนเซชัน อุณหภูมิที่ทำให้เกิดพลาสมาได้ตั้งแต่ 4000 K สำหรับธาตุที่ง่ายต่อการไอออไนเซชันซึ่งเชื่อมโยงไปจนถึง 20000 K อย่างฮีเลียม และอุณหภูมิของไอออนกับอิเล็กตรอนเท่ากัน ( $T_e = T_i$ ) หรือ (2) เกิดจากการชนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจรของอะตอม เกิดเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ในกรณีนี้  $T_e \gg T_i$  ความหนาแน่นไอออไนเซชันที่สภาวะคงตัวขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างการไอออไนเซชันและการกลับมารวมตัวกันอีกของอนุภาคที่มีประจุ เพื่อที่จะรักษาระดับการไอออไนเซชันให้สูงจะต้องมีการไอออไนเซชันมากและมีอัตราการรวมตัวกันใหม่ที่ต่ำ

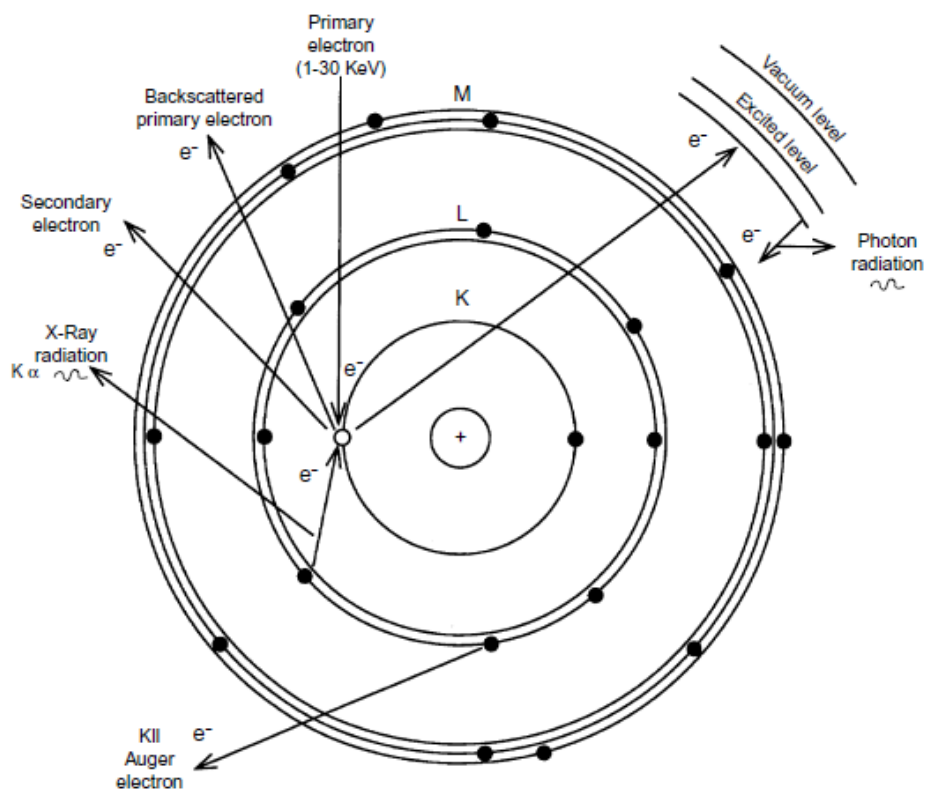
ช่วงท้ายของ 1980s ได้มีการประยุกต์ใหม่ๆทางด้านพลาสมาฟิสิกส์คือ เทคโนโลยีพลาสมาปรับปรุงเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุ (plasma processing) อย่างเช่นการผลิตวงจรรวมที่เล็กและซับซ้อนที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ นอกจากนี้ยังมีการคิดค้นอย่างต่อเนื่องทางด้านอุตสาหกรรมเช่น arcs, plasma torches และ laser plasma โดยเฉพาะอย่างยิ่งประมาณ 40% ของอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าในอเมริกา ได้ใช้ในการรีไซเคิลหลอมเศษเหล็กมากกว่า 100 ตันภายในเวลา 2-3 นาที

ในวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นความสนใจไปที่กระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมาปรับปรุงเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุ (Plasma processing) เพื่อสร้างชั้นฟิล์มบาง (Thin films) เคลือบพื้นผิววัสดุ โดยมีขั้นตอนหลักคือการทำให้อัตราการเป็นสารเคลือบ (target) แยกตัวเป็นอะตอมหรือไอออน และส่งผ่านอะตอมหรือไอออนนั้นไปยังชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ (substrate) ให้สะสมก่อตัวเป็นฟิล์มบาง ซึ่งระบบและกระบวนการสร้างฟิล์มบางก็แบ่งแยกออกเป็นหลายวิธีมากมายด้วยกัน แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาและพัฒนาโดยใช้วิธีการ Electron Cyclotron Resonance Sputtering

## 2.1 กระบวนการไอออไนเซชัน

การไอออไนเซชันเกิดจากการที่อิเล็กตรอนของอะตอมถูกกระตุ้น ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นเกิด โดยการให้ความร้อนแก่แก๊ส, การดูดซับพลังงานจากโฟตอน, เกิดจากการชนด้วยไอออนหรืออิเล็กตรอน แต่วิธีที่ใช้กันมากที่สุดคือการชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอม ดังรูปที่ 2.1 [10] เมื่ออิเล็กตรอนจากภายนอกที่มีพลังงานจลน์พุ่งเข้ากระทบกับอิเล็กตรอนของอะตอม อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนเกิดการกระเจิงเปลี่ยนทิศทางและพลังงานลดลงหลังจากการกระทบ

1. กระตุ้นให้อิเล็กตรอนของอะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้นเกิดการยกระดับพลังงานและลดระดับพลังงานโดยปลดปล่อยโฟตอนออกมา หรือ
2. กระตุ้นให้อิเล็กตรอนของอะตอมมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนหรือพลังงานไอออไนเซชัน(อาร์กอน 15.7596 eV) จนหลุดออกจากอะตอมเกิดการไอออไนเซชัน ทำให้เกิดที่ว่าง อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นอื่นจะเข้ามาแทนที่และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์หรือพลังงานนั้นถูกส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอื่น ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมาเรียกว่า ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะปลดปล่อยเป็นไอเจอิเล็กตรอนมากกว่า ส่วนธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำจะปลดปล่อยออกมาในรูปรังสีเอกซ์มากกว่า



รูปที่ 2.1 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอม

## 2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง

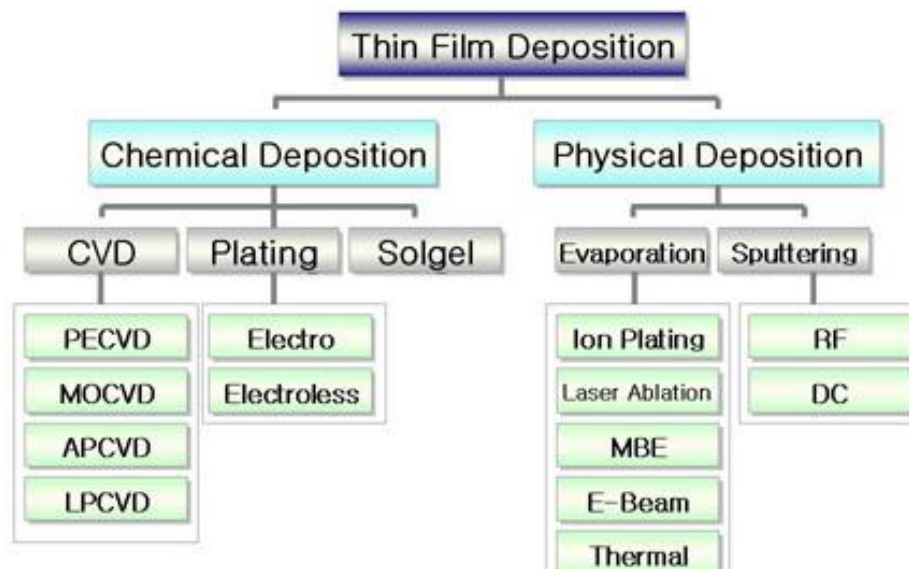
1. การกำเนิดของฟิล์มบาง [9] เริ่มจากการรวมตัวของอนุภาคเกิดเป็นนิวเคลียส (nucleation) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นแกนหรือส่วนที่เล็กที่สุดซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของเกรน ถูกดูดซับบนชิ้นงานและตามมาด้วยการรวมตัวของนิวเคลียสก่อตัวเป็นผลึกและเจริญเติบโต
2. ในช่วงของการก่อตัวเป็นผลึกและเติบโตนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายอย่างเช่น อุณหภูมิ อัตราการก่อตัวและเคมีพื้นผิวของชิ้นงาน
3. ในช่วงการเกิดนิวเคลียสผลึกสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขได้จากการปะทะจากอิเล็กตรอนและไอออน
4. โครงสร้างของฟิล์ม ข้อบกพร่องของฟิล์ม การเรียงตัวของผลึก และความเครียดของฟิล์มขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างดังข้อ 2

คุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางเช่นองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง ความหนา ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของการฝังตัว (deposition conditions) ซึ่งคุณสมบัติของฟิล์มบางเป็นเอกลักษณ์ที่ไม่มีในวัสดุเนื้อเดียว เนื่องจากฟิล์มบางเกิดจากอนุภาคขนาดเล็ก วัสดุผสมพิเศษอาจถูกสังเคราะห์จากการรวมกันของ adatom (อะตอมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว) ของหลายธาตุเกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน ทำให้มีความหลากหลายในการสร้างวัสดุที่มีองค์ประกอบของอะตอมหลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการ

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง

1. สภาพผิวของชิ้นงาน เช่น การทำความสะอาดพื้นผิว (cleaning), สัณฐานวิทยาของพื้นผิว (surface morphology), คุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิว, คุณสมบัติเชิงกล, ข้อบกพร่องของพื้นผิว, เสถียรภาพของพื้นผิว
2. ระบบเครื่องมือที่ใช้สร้างฟิล์มบาง มีผลต่อมุดตกกระทบของ adatom, อุณหภูมิของชิ้นงาน, อัตราการก่อตัวของอะตอม (deposition rate), ความปนเปื้อนของแก๊ส, พลังงาน มวล และความหนาแน่นของอนุภาคที่พุ่งชน
3. รายละเอียดในการก่อตัว เช่น การรวมตัวและก่อตัวของ adatom, รูปแบบพันธะ, การเกิดออกไซด์ชั้นระหว่างชั้น, ความสามารถในการเคลื่อนตัวของ adatom, สัณฐานวิทยาของฟิล์ม ฯลฯ
4. ปฏิกริยาหลังเสร็จสิ้นการก่อตัว เช่น ปฏิกริยาเคมีของฟิล์มกับสภาพแวดล้อมภายนอก, เกิดการย่อยสลายตัว, เกิดการกัดกร่อน

กระบวนการสร้างฟิล์มบาง (Thin film deposition) [11] สามารถแบ่งเป็นวิธีการหลักได้ 2 วิธีคือกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางฟิสิกส์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการและเทคนิคต่างๆในการสร้างฟิล์มบาง

1. กระบวนการทางเคมี (Chemical deposition) หลักการโดยทั่วไปคือใส่แก๊สเข้าไปในภาชนะที่มีความดันต่ำ บรรจุด้วยชิ้นงานที่ต้องการเคลือบซึ่งถูกทำให้ร้อนมีอุณหภูมิ 200-1600°C ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นใกล้ผิวที่ร้อนของชิ้นงานส่งผลให้มีการก่อตัวของฟิล์มบางบนพื้นผิว เรียกกระบวนการนี้ว่า Chemical vapor deposition (CVD) และมีหลายวิธีด้วยกันที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการก่อตัวของฟิล์ม เช่น การใช้เลเซอร์, พลาสมา, ไอออน, โฟตอน, ขดลวดความร้อน เป็นต้น
2. กระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical deposition) เป็นการทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุของแข็งหรือของเหลวหลุดออกมาโดยวิธีการทางฟิสิกส์ แบ่งเป็นวิธีหลัก 2 วิธีคือ การให้ความร้อนจนระเหยเป็นไอ (Evaporation, PVD) และการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

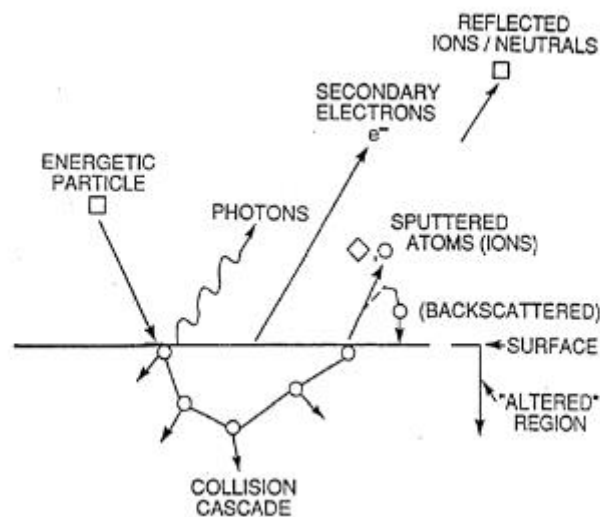
การให้ความร้อนก็สามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็น การให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจนหลอม, การให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงจนเกิดการอาร์ก, การใช้ลำอิเล็กตรอนพุ่งชน, การใช้เลเซอร์ เป็นต้น

การสปัตเตอร์ริง เกิดจากสิ่งที่พุ่งชนถ่ายเทโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกกระทบกระเด็นออกมา ซึ่งก็มีหลายวิธีเช่น ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วเวลาอันยาวนาน ไอออนวิ่งเข้ามาชน (DC sputtering), ใช้แรงดันกระแสสลับความถี่ระดับเมกะเฮิรตซ์ชั่วเวลาอันยาวนาน (RF

sputtering), ใช้ลำอนุภาคไอออนพุ่งชน, ใช้สนามแม่เหล็กวางใกล้วัสดุเป้าเพื่อเพิ่มการเกิดไอออนในเซชันพร้อมทั้งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้วัสดุเป้า (Magnetron sputtering) เป็นต้น

### 2.3 ปฏิกิริยาสปัตเตอริง (Sputtering)

ในปี 1852 Grove [12] ได้สังเกตว่าพื้นผิวแคโทดของ DC gas discharge tube ถูกพ่นออกมาโดยการปะทะจากไอออนที่มีพลังงานจลน์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สปัตเตอริง (Sputtering) และสสารแคโทดไปสะสมบนผนังด้านในของดิสชาร์จทิวบ์ ในสมัยนั้นปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการเนื่องจากทำให้แคโทดได้รับความเสียหายและผนังดิสชาร์จทิวบ์ปนเปื้อน แต่ในปัจจุบันสปัตเตอริงมีประโยชน์และใช้อย่างกว้างขวางในการทำมาสะอาดพื้นผิว, การเซาะร่อง, การสร้างฟิล์มบาง และการวิเคราะห์ชั้นผิว



รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาเมื่ออนุภาคพุ่งชนผิววัสดุ

กล่าวคือการสปัตเตอริง ดังรูปที่ 2.3 [12] เป็นกระบวนการที่พื้นผิวของแข็งถูกพุ่งชนโดยไอออนที่มีพลังงานจลน์เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัม ทำให้อะตอมบริเวณพื้นผิวกระเด็นออกมาเนื่องจากการถูกชน อีกทั้งยังก่อให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) หลุดออกมาจากวัสดุเป้าด้วยซึ่งช่วยให้มีการเกิดพลาสมาอย่างต่อเนื่อง

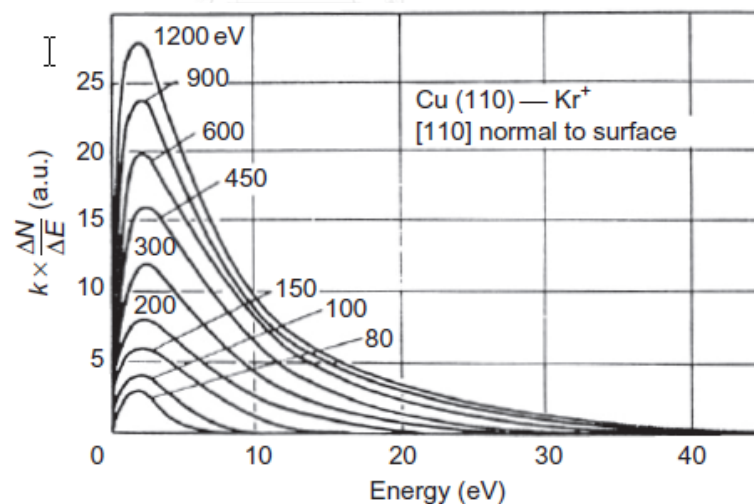
### 2.4.1 ประสิทธิภาพการสปัตเตอร์ (Sputter Yield)

เป็นอัตราส่วนของจำนวนอะตอมบริเวณพื้นผิวที่หลุดออกมาต่อจำนวนไอออนที่ตกกระทบ โดยค่า sputter yield ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ พลังงานของไอออน, วัสดุที่ใช้เป็นเป้า, มุมตกกระทบของไอออน และโครงสร้างผลึกของวัสดุเป้า

### 2.4.2 ความเร็วและ Mean free path ของสปัตเตอร์อะตอม

Wehner ได้ศึกษาและทำการทดลองหาความเร็วของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ ประมาณความเร็วเฉลี่ยของอะตอมแพลตตินัม ทองคำ นิกเกิล ที่ถูกสปัตเตอร์ด้วยไอออนปรอท 100-200 eV ได้เท่ากับ  $3-7 \times 10^5$  cm/s เทียบได้กับพลังงานจลน์ของอะตอม 10-30 eV ซึ่งมากกว่าพลังงานจลน์ของอะตอมที่ได้จากการระเหยเป็นไอ 100 เท่า

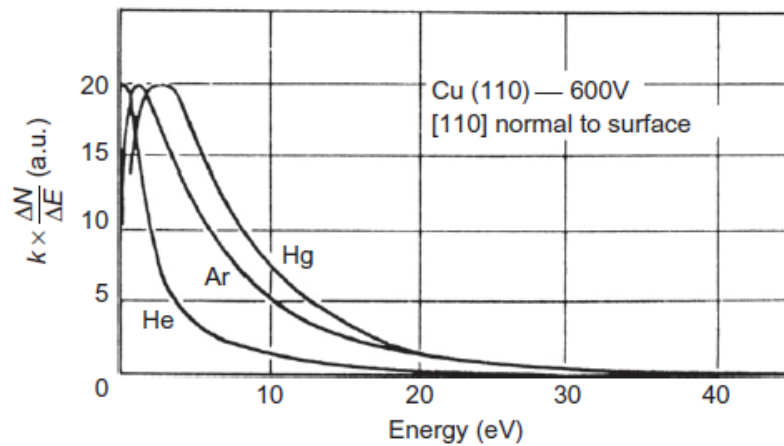
Stuart และ Wehner ได้ทำการวัดโดยใช้ระบบ Time-of-flight พบว่าวัสดุเป้าทองแดง(110) ที่ถูกสปัตเตอร์ด้วยไอออนคริปตอน 80-1200 eV มีพลังงานจลน์ของสปัตเตอร์อะตอมประมาณ 0-40 eV ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 2.4 [12]



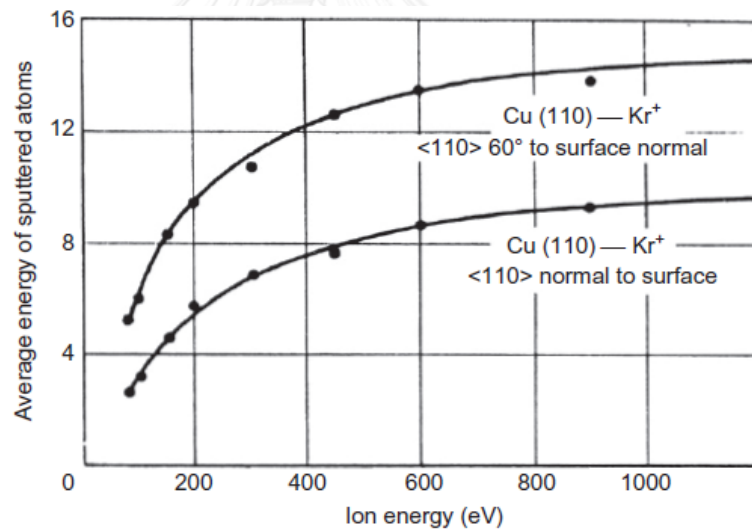
รูปที่ 2.4 การแจกแจงพลังงานของสปัตเตอร์อะตอมเมื่อไอออนที่พุ่งชนมีพลังงานตั้งแต่ 80-1200 eV

พลังงานของสปัตเตอร์อะตอมขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่พุ่งเข้าปะทะและมุมปะทะดังรูปที่ 2.5 [12] อย่างไรก็ตามพลังงานไอออนที่พุ่งชนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อพลังงานของสปัตเตอร์อะตอม แสดงว่าพลังงานไอออนสูญเสียให้แก่วัสดุเป้าหมายมากกว่าที่จะถ่ายเทพลังงานให้สปัตเตอร์

อะตอม ดังรูปที่ 2.6 [12] สำหรับไอออนของธาตุเบาจะเจาะลึกลงใต้พื้นผิวของวัสดุเป้าทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานแก่วัสดุเป้า อันมีผลทำให้สปีดเตอร์อะตอมมีพลังงานต่ำ



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายตัวของพลังงานสปีดเตอร์อะตอมขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่พุ่งเข้าชน



รูปที่ 2.6 แสดงพลังงานของไอออนที่พุ่งเข้าชนและมุมปะทะมีผลต่อพลังงานของสปีดเตอร์อะตอม

แต่ในกรณีของไอออนที่ถูกสปีดเตอร์ออกมาพลังงานเฉลี่ยจะสูงกว่าของสปีดเตอร์อะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าลบที่ให้แก่แคโทดมีแนวโน้มที่จะดึงดูดไอออนที่ถูกสปีดเตอร์กลับเข้าไปหาแคโทด ดังนั้นสปีดเตอร์ไอออนที่หลุดรอดออกมาได้จะต้องมีพลังงานสูงจากการทดลองปริมาณสปีดเตอร์ไอออนมีเพียง 1% ของนิวทรัลอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ออกมา



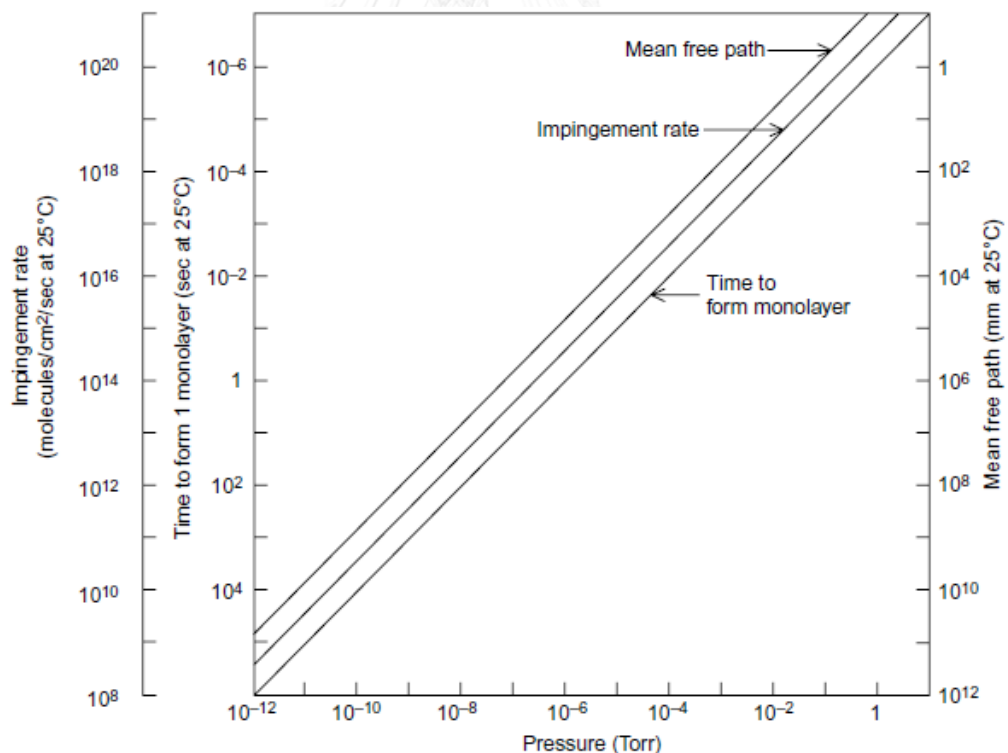
ค่า Mean free path ของสปัตเตอร์อะตอมคือระยะทางเคลื่อนที่เฉลี่ยก่อนที่จะชนกับ โมเลกุลของแก๊สดีสชาร์จหาได้จากสมการ

$$\lambda = 1/\pi(r_1+r_2)^2 n_2$$

โดยที่  $r_1$  และ  $r_2$  คือรัศมีอะตอมของสปัตเตอร์อะตอมและ โมเลกุลของแก๊สดีสชาร์จ ตามลำดับ

$n_2$  คือความหนาแน่นของแก๊สดีสชาร์จ

ดังรูปที่ 2.7 [10] ความดันแก๊สในระบบส่งผลต่อ mean free path, อัตราการพุ่งชนต่อ ชิ้นงาน และเวลาในการก่อตัวเป็นหนึ่งชั้นบางๆ ที่ความดันต่ำมีอัตราการพุ่งชนต่อชิ้นงานสูง ใช้ เวลาในการก่อตัวเป็นฟิล์มสั้น และระยะทางก่อนที่จะเกิดการกระเจิงยาวกว่า การกระเจิงส่งผลให้ พลังงานของสปัตเตอร์อะตอมลดลงและทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป ซึ่งมีความสำคัญต่อการก่อ ตัวของฟิล์ม

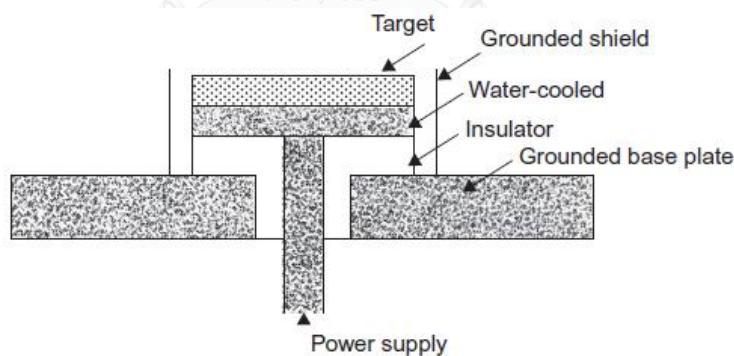


รูปที่ 2.7 ค่า mean free path, อัตราการพุ่งชน, เวลาในการสร้าง monolayer เทียบกับความดัน แก๊ส

### 2.4.3 องค์ประกอบของระบบสปัตเตอร์ริง

โดยทั่วไปของระบบพลาสมาสปัตเตอร์ริง (plasma-based sputtering) เมื่อเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา ไอออนบวกถูกเร่งเข้าหาวัสดุเป้าที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าพลาสมา ในระบบที่มีความดันต่ำไอออนที่ถูกเร่งเข้ากระทบผิววัสดุเป้าส่วนใหญ่จะมีพลังงานเท่ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างพื้นผิววัสดุเป้ากับจุดที่เกิดไอออนพลาสมาขึ้น แต่ในระบบที่มีความดันสูง ไอออนเกิดการชนและการกระเจิงกับโมเลกุลแก๊สทำให้มีการกระจายตัวของค่าพลังงานไอออนที่กระทบผิวเป้า เมื่อกระทบกับวัสดุเป้าเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมและพลังงานทำให้เกิดสปัตเตอร์อะตอมกระดอนออกมาและสปัตเตอร์อะตอมนั้นเคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานก่อตัวสะสมเป็นชั้นฟิล์มขึ้น โดยส่วนประกอบที่เป็นตัวแปรสำคัญในระบบสปัตเตอร์ริงมีดังนี้

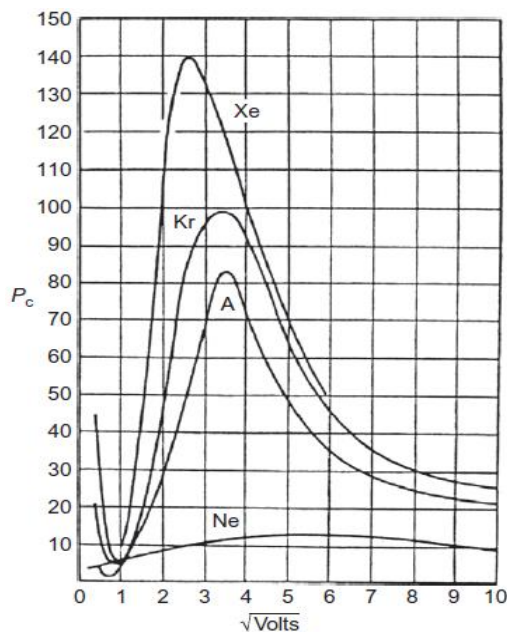
- ก) การจัดวางแคโทดและวัสดุที่ใช้เป็นเป้า ในกระบวนการสปัตเตอร์ริงพลังงานจลน์ของไอออนส่วนใหญ่จะสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนให้แก่วัสดุเป้า จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนให้แก่วัสดุเป้าและต้องต่อ ground shield ดังรูปที่ 2.8 [13] โดยที่ระยะห่างระหว่างเป้าและground shield จะต้องน้อยกว่าความหนาของคาร์คสเปซหรือ target sheath  $\lambda_0/p$  โดยที่  $p$  คือความดันของแก๊สดีสชาร์จ



รูปที่ 2.8 โครงร่างของฐานวัสดุเป้าและ ground shield

และ  $\lambda_0$  คือ mean free path ของอิเล็กตรอนในแก๊สดีสชาร์จ;  $\lambda_0 = 1/P_c$

$P_c$  คือ ความน่าจะเป็นในการเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (elastic-collision cross section) ของอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊ส โดยค่า  $P_c$  หาได้จากรูปที่ 2.9 [13]

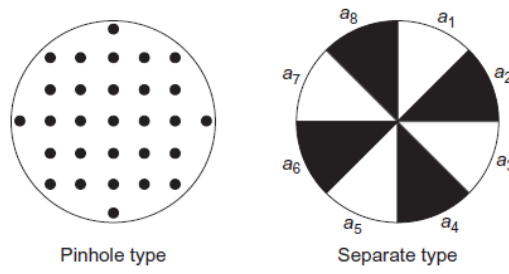


รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมแก๊สที่พลังงานของอิเล็กตรอนต่างๆ

#### Compound Target

ถ้าฟิล์มที่ต้องการสร้างเป็นสารประกอบ การจัดเตรียมวัสดุเป้าจะเป็นดังรูปที่ 2.10 [13] องค์กรประกอบของฟิล์มจะถูกควบคุมโดยอัตราส่วนพื้นที่ของแต่ละธาตุ ค่า sputtering yield และพื้นที่ของแต่ละธาตุแทนด้วย  $(s_1, a_1)$ ,  $(s_2, a_2)$ ,  $(s_3, a_3)$ , ...,  $(s_n, a_n)$  องค์กรประกอบของแต่ละส่วนจะเท่ากับ  $s_1 a_1 (A_1/N)$ ,  $s_2 a_2 (A_2/N)$ ,  $s_3 a_3 (A_3/N)$ , ...,  $s_n a_n (A_n/N)$  โดยที่  $A_1, A_2, A_3$  คือน้ำหนักอะตอมของแต่ละธาตุและ  $N$  คือเลขอะโวกราโดร

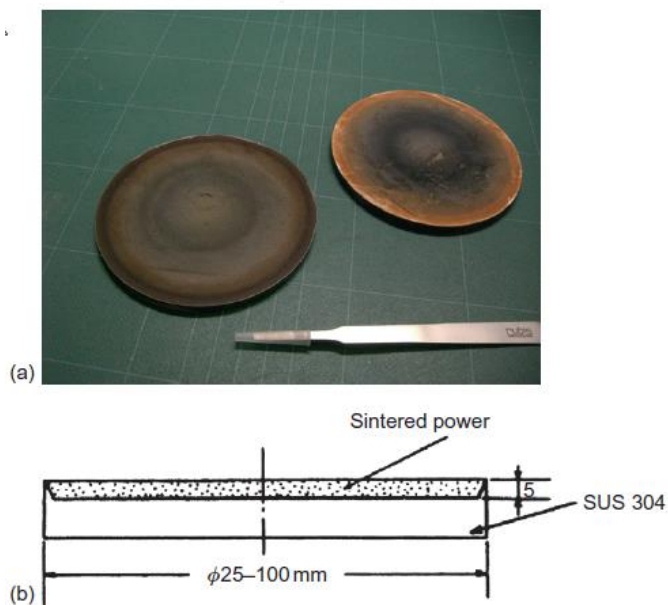
เมื่อมีการแบ่งเป็นแต่ละส่วนน้อย (low number of partitions) องค์กรประกอบของฟิล์มที่ได้จะมีสัดส่วนของแต่ละธาตุไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นการหมุนชิ้นงานจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้



รูปที่ 2.10 การจัดวางแบ่งวัสดุเป้าเป็นส่วนๆสำหรับสร้างฟิล์มที่เป็นสารประกอบหรือโลหะผสม

**Powder Target**

ฟิล์มบางของสารประกอบที่เป็นผงอย่างเช่น เมทัลออกไซด์, ไนไตรด และคาร์ไบด์ สามารถใช้กระบวนการสปัตเตอร์ริงสร้างได้ โดยเทผงลงในแผ่นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 2.11 [13]



รูปที่ 2.11 การเตรียมวัสดุเป้าที่เป็นผงสารประกอบโดยใส่ลงบนงานเหล็กกล้าไร้สนิม

ความบริสุทธิ์ของวัสดุเป่ามีความสำคัญควรจะสูงที่สุดเท่าที่จะสูงได้ เช่นเดียวกันความหนาแน่นสูงย่อมดีกว่า ที่ความหนาแน่นน้อยกว่า 96% วัสดุมีความพรุนทำให้มีสิ่งปนเปื้อนไปยึดเกาะ และวัสดุที่นำความร้อนได้ไม่ดีควรมีลักษณะบางเพื่อการระบายความร้อนที่ดีกว่า

ข) **สปีดเทอร์ริงแก๊ส** มีบทบาทสำคัญดังนี้

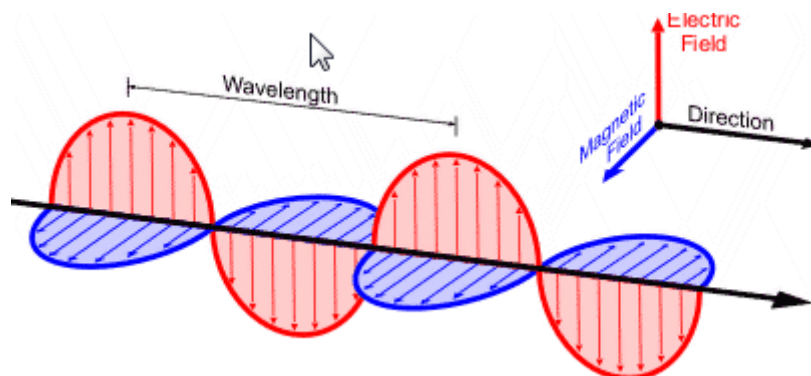
- เป็นตัวกลางของการติสซาร์จเป็นพลาสมา ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนปะทะกับอะตอม สปีดเทอร์ริงแก๊สเกิดการ ไอออไนเซชันแตกตัวเป็นประจุ และ ไอออนแก๊สถูกเร่งเข้ามาหาวัสดุเป่าด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า
- ทำให้ไอออนที่พุ่งเข้าหาวัสดุเป่าไม่ใช่พลังงานเดียว แต่มีการกระจายตัวของพลังงานเนื่องจากการกระเจิงกับอะตอมสปีดเทอร์ริงแก๊ส อันมีผลต่อพลังงานของสปีดเทอร์อะตอม
- ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่และพลังงานของสปีดเทอร์อะตอมเปลี่ยนไปเนื่องจากการกระเจิงกับอะตอมสปีดเทอร์ริงแก๊ส อาจทำให้ห้องค์ประกอบของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปได้เนื่องจากการกระเจิงหลายๆครั้ง

การใช้ Flow meter ควบคุมอัตราการจ่ายแก๊สให้คงที่มีความสำคัญในการทำให้แรงดันไฟฟ้าแคโทดคงที่และยังช่วยกวาดสิ่งปนเปื้อนออกไปจาก chamber

- ค) **อุณหภูมิของชิ้นงาน** จากผลการทดลองในหลายผลงาน พบว่าเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นทำให้การยึดเกาะของฟิล์มกับชิ้นงานดีขึ้น, ขนาดเกรนและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น, ความหยาบขรุขระของฟิล์มมากขึ้น ในขณะที่ความเครียดลดลง อุณหภูมิของชิ้นงานมีผลต่อโครงสร้างและคุณภาพของฟิล์ม ซึ่งอุณหภูมิของชิ้นงานที่สูงขึ้นมีสาเหตุมาจากการพุ่งชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิพลังงานสูงและขึ้นอยู่กับพลังงานของสปีดเทอร์อะตอม

## 2.5 การส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศทางการสั่น (polarization) ของเวกเตอร์ E และ B ตั้งฉากกัน ดังรูปที่ 2.12

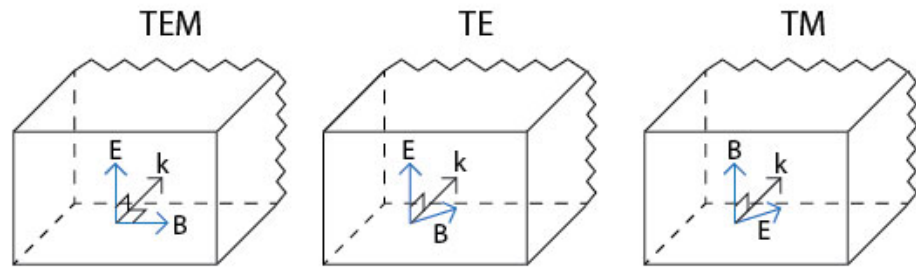


รูปที่ 2.12 แบบจำลองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นมีการกระจายตัวกว้างไปในทุกทิศทางและมีทิศทางการโพลาไรซ์ได้หลายแบบหลายทิศทาง เราไม่ทราบแน่ชัด จึงต้องมีท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งผ่านสัญญาณคลื่นทำหน้าที่กั้นคลื่นรบกวนและกรองให้เฉพาะคลื่นที่มีการโพลาไรเซชันในทิศทางที่ต้องการเท่านั้นที่ผ่านเข้ามาในท่อได้ นอกนั้นจะถูกบล็อกหรือถูกดูดคลื่นหายไป

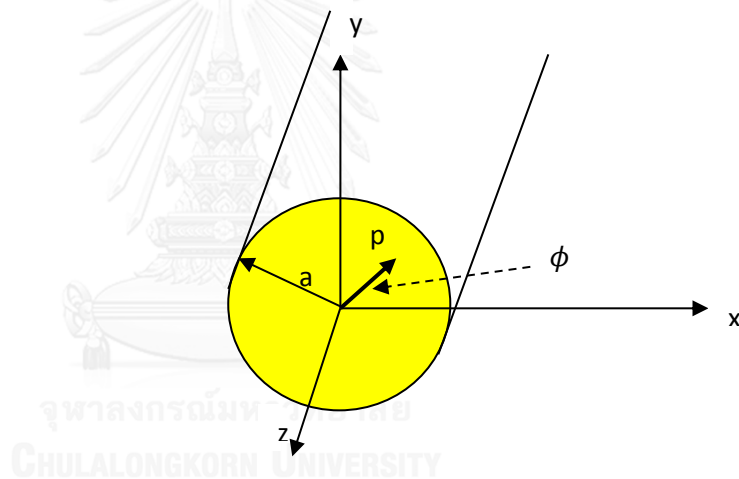
ท่อนำคลื่น [14] มีด้วยกันหลายรูปแบบ มีตั้งแต่แบบแผ่นสองแผ่นวางขนานกัน (Planar), ท่อรูปทรงเหลี่ยม (Rectangular), ทรงกลม (Circular) ซึ่งสามารถรองรับกำลังส่งได้สูงแต่ก็มีขนาดใหญ่และราคาสูง ไปจนถึงสาย coaxial ที่มีแบนด์วิทสูงแต่รองรับกำลังส่งได้ไม่สูงมากนักและขั้นตอนการสร้างก็ยุ่งยากกว่า ซึ่งท่อนำคลื่นแต่ละแบบก็มีความสามารถในการส่งผ่านคลื่นได้บางโหมดหรือได้ทั้งสามโหมด waveguide ที่ประกอบด้วยตัวนำตั้งแต่ 2 ตัวนำขึ้นไปสามารถส่งโหมด TEM, TE, TM ได้ แต่ waveguide ที่มีตัวนำเดียวส่งได้แค่โหมด TE, TM

โหมดการส่งผ่านมีด้วยกัน 3 โหมด TEM (Transverse Electromagnetic) ไม่มีการสั่นของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กตามแกนความยาวของท่อนำคลื่นหรือแกน z ( $E_z=0, H_z=0$ ), TE (Transverse Electric) ไม่มีการสั่นของสนามไฟฟ้าในแนวแกน z แต่มีสนามแม่เหล็กในแนวแกนความยาวของท่อนำคลื่น ( $E_z=0, H_z \neq 0$ ) และ TM (Transverse Magnetic) ไม่มีค่าสนามแม่เหล็กแต่มีสนามไฟฟ้าในแนวแกนความยาวของท่อนำคลื่น ( $H_z=0, E_z \neq 0$ ) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ( $k$ ),  $E$ ,  $B$  ในท่อนำคลื่นแต่ละโหมด

ท่อนำคลื่นที่สนใจสำหรับงานวิจัยนี้คือ Circular Waveguide ดังรูปที่ 2.14 เป็นท่อเรโซแนนซ์ทรงกลมทำจากตัวนำไฟฟ้าที่มีปลายเปิดทั้งสองด้าน ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องนำมาพิจารณาคือ ความถี่คutoffต่ำสุดที่สามารถส่งผ่านท่อนำคลื่นได้



รูปที่ 2.14 รูปท่อนำคลื่นทรงกลมในพิกัด xyz

สามารถออกแบบคำนวณหาความถี่คutoffของท่อนำคลื่นทรงกลมได้จากสมการดังนี้  
ความถี่คutoffของโหมด TE คือ

$$f_c = \frac{p'_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{p'_{nm} c}{2\pi a \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

ความถี่คutoffของโหมด TM คือ

$$f_c = \frac{p_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{p_{nm} c}{2\pi a \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

โดยที่  $c$  คือความเร็วแสงในสุญญากาศ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$\mu_r$  คือ relative permeability (ความสามารถในการดูดซับเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อเทียบกับสุญญากาศ) ของตัวกลางภายในโพรง มีหน่วยเป็น H/m วัสดุที่ดูดติดกับแม่เหล็กได้ดีจะมีค่า relative permeability สูง

$\epsilon_r$  คือ relative permittivity (ความสามารถในการดูดซับสนามไฟฟ้าเมื่อเทียบกับสุญญากาศ) ของตัวกลางภายในโพรง มีหน่วยเป็น F/m วัสดุที่เป็นสื่อไฟฟ้าได้ดีจะมีค่า relative permittivity สูง

a คือความยาวรัศมีของโพรงเรโซแนนซ์ มีหน่วยเป็น เมตร

ตารางค่า  $p'_{nm}$  สำหรับโหมด TE

n	$p'_{n1}$	$p'_{n2}$	$p'_{n3}$
0	3.832	7.016	10.174
1	1.841	5.331	8.536
2	3.054	6.706	9.970

ตารางค่า  $p_{nm}$  สำหรับโหมด TM

n	$p_{n1}$	$p_{n2}$	$p_{n3}$
0	2.405	5.520	8.654
1	3.832	7.016	10.174
2	5.135	8.417	11.620

สามารถคำนวณการลดทอนกำลังคลื่นอันเนื่องมาจากท่อนำคลื่นได้จากสมการ

$$dB = -20 \log e^{-(\alpha_c + \alpha_d)l}$$

ค่าคงที่การลดทอน (attenuation constant)  $\alpha_c = \frac{R_s}{ak\eta\beta} \left( k_c^2 + \frac{k^2}{p'_{nm}{}^2 - 1} \right)$  Np/m

โดยที่  $R_s = \text{surface resistance} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}$  ( $\Omega$ )

$\sigma$  คือความสามารถในการนำสัญญาณของวัสดุ (conductivity of material) S/m

$\mu_0$  คือ permeability ของสุญญากาศ =  $1.256637 \times 10^{-6}$  H/m



$$\beta \text{ คือค่าคงที่การส่งผ่าน (propagation constant)} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2} \quad (\text{m}^{-1})$$

$$k \text{ คือ wavenumber} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (\text{m}^{-1})$$

$$k_c \text{ คือ cutoff wavenumber} = \frac{p'_{nm}}{a} \quad (\text{m}^{-1})$$

$$\eta \text{ คือ wave impedance} = 376.73 \sqrt{\left(1 - \frac{f_c^2}{f^2}\right)}$$

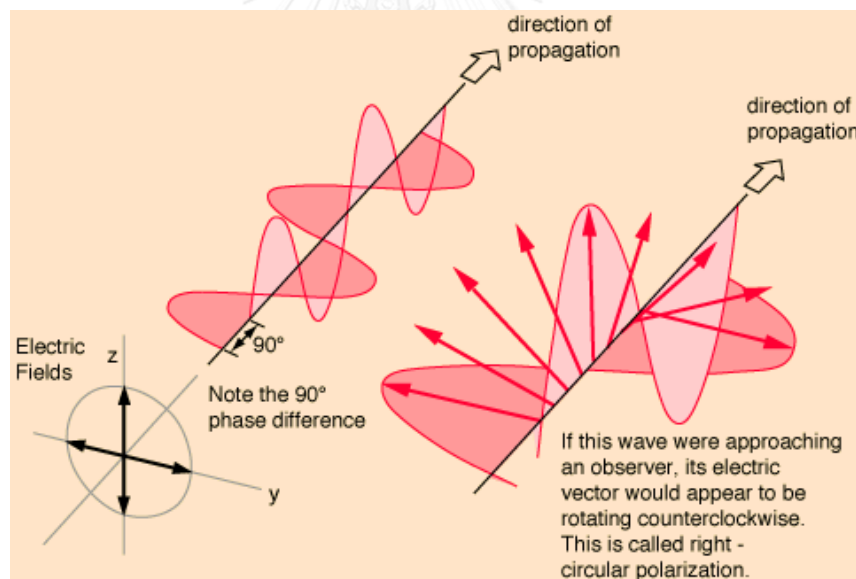
$$\text{ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากฉนวน} \quad \alpha_d = \frac{k^2 \tan \delta}{2\beta} \text{ Np/m}$$

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงในสุญญากาศ กรณีเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในพลาสมาที่ไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง (Unmagnetized plasma) เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุ (ความหนาแน่นพลาสมา) เพิ่มขึ้น ความเร็วกลุ่มของคลื่นจะลดลง จนกระทั่งความหนาแน่นพลาสมาถึงจุดๆหนึ่งที่คลื่นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปได้เรียกว่า critical density ซึ่งความหนาแน่นพลาสมาสัมพันธ์กับความถี่พลาสมา ( $\omega_{pe}$ ) เรียกความถี่พลาสมาที่จุดนั้นว่า ความถี่คัทออฟ (cut-off frequency) หรืออาจกล่าวได้ว่าคลื่นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้อีกต่อเมื่อความถี่เชิงมุมของคลื่นสูงกว่าความถี่พลาสมาหรือความถี่คัทออฟ ( $\omega > \omega_{pe}$ )

กรณีที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง (Magnetized plasma) [15-17] จะแยกแยะเป็น 4 โหมด และการพิจารณาความถี่คัทออฟจะซับซ้อนกว่า สรุปได้ดังตารางที่ 2.5 ค่า  $k$  คือทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น,  $B$  คือสนามแม่เหล็ก และ  $E$  คือสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 โหมดต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เงื่อนไข	ชื่อโหมด	ความถี่คัทออฟ ( $k=0$ )	ความถี่เรโซแนนซ์
$k \perp B, E \parallel B$	O wave	$\omega = \omega_{pe}$	None (in low B field)
$k \perp B, E \perp B$	X wave	$\omega = \frac{\pm \omega_{ce} \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2}$	$\omega_{UH}^2 \approx \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2$
$k \parallel B, E \perp B$ (หมุนวนขวาตามเข็มนาฬิกา)	R wave (Whistler mode)	$\omega = \frac{\omega_{ce} \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2}$	$\omega = \omega_{ce}$
$k \parallel B, E \perp B$ (หมุนวนซ้ายตามเข็มนาฬิกา)	L wave	$\omega = \frac{-\omega_{ce} \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2}$	None (in low B field)



รูปที่ 2.15 Right-Hand Polarization wave (R wave)

ในงานวิจัยนี้เราปล่อยคลื่นไมโครเวฟเข้าไปมีทิศทางเคลื่อนที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานเพิ่มเฉพาะในโหมด R wave เกิดการเรโซแนนซ์ที่  $\omega = \omega_{ce}$  เพราะ อิเล็กตรอนหมุนวนตามเข็มนาฬิกาหรือบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยความถี่ไซโคลตรอน ( $\omega_{ce}$ ) และ R

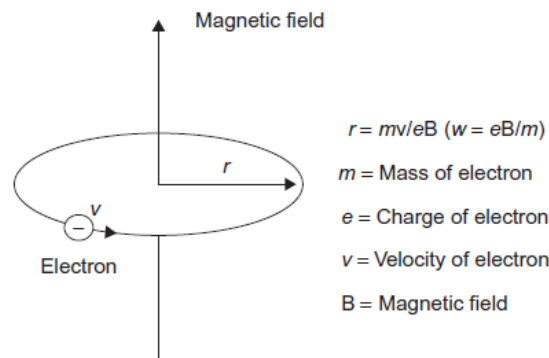
wave ก็มี E หมุนวนด้วยความถี่เชิงมุม  $\omega$  ไปในทางเดียวกันส่งผลให้พลังงานคลื่นส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ซึ่ง R wave มีลักษณะดังรูปที่ 2.15

Right-Hand Polarization wave (R wave) เกิดขึ้นเมื่อการสั่นของสนามไฟฟ้าสลับบวกและลบในแนวแกน x, y มีเฟสต่างกัน 90 องศา เหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลม แต่ถ้าเฟสต่างกันไม่เท่ากับ 90 องศา อิเล็กตรอนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมเป็นวงรี

## 2.6 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

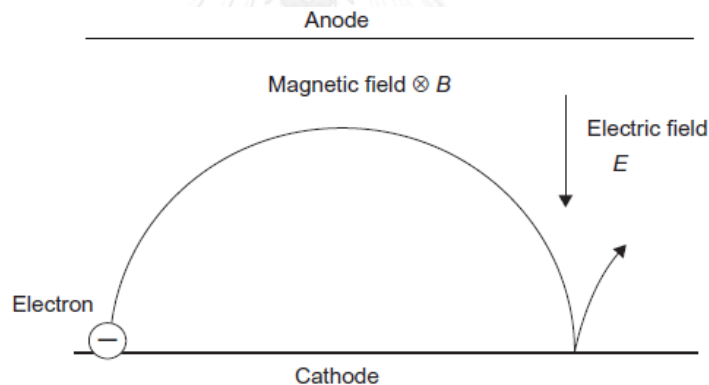
สนามแม่เหล็กมีอิทธิพลต่ออิเล็กตรอนคือทำให้อิเล็กตรอนที่เดิมอยู่นิ่งๆ ไม่มีความเร็วใดๆ เคลื่อนที่ โคจรรอบเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 2.16 โดยมีรัศมีวงโคจร (Lamour Radius)  $r = mv/eB$  และมีจำนวนรอบการหมุนวนภายในหนึ่งวินาที (Cyclotron Frequency)  $\omega_c = eB/m$  แต่ในความเป็นจริงภายในระบบดิสชาร์จ อิเล็กตรอนไม่ได้อยู่นิ่งๆ มีการเคลื่อนที่ที่มีความเร็ว ซึ่งถ้าอิเล็กตรอนมีทิศเคลื่อนที่ขนานกับเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ได้รับผลกระทบใดจากสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ทำมุมกับเส้นแรงแม่เหล็กจะหมุนเป็นเกลียวรอบเส้นแรงแม่เหล็ก ยิ่งความเร็วมากเท่าใดรัศมีการหมุนก็กว้างขึ้น หลังการชนกับอะตอมแก๊สในระบบสุญญากาศจะทำให้อิเล็กตรอนกระเจิงเปลี่ยนทิศทางและหมุนเป็นเกลียวใหม่เมื่อถูกกักโดยเส้นแรงแม่เหล็กเส้นอื่น ประโยชน์จากการใช้สนามแม่เหล็กนี้ช่วยกักอิเล็กตรอนไว้รอบเส้นแรงแม่เหล็กไม่ให้สูญเสียไปกับการชนกับผนัง ทำให้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากขึ้นเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลแก๊สเกิดการไอออไนเซชันมากขึ้น และยังช่วยให้สามารถลดความดันแก๊สได้

สำหรับไอออนจะไม่สามารถกักเก็บไว้โดยเส้นแรงแม่เหล็กภายในสนามแม่เหล็กที่มีค่าน้อย เนื่องจากมีมวลมากและมี Lamour Radius กว้างกว่าอิเล็กตรอนมาก



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

และถ้ามีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยและมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังที่ใช้ในแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง จะทำให้อิเล็กตรอนมีศูนย์กลางการหมุนเคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $\vec{E} \times \vec{B}$  ด้วยความเร็ว  $E/B$  และถ้าความเร็วการโคจรของอิเล็กตรอน  $v$  เท่ากับความเร็ว  $E/B$  จะมีทิศทางการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของ  $\vec{E}$  ตั้งฉากกับ  $\vec{B}$

สำหรับในงานวิจัยนี้ที่นำคลื่นจะใช้เป็นโหมด TE เพื่อต้องการให้สนามไฟฟ้าของคลื่นตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร จะได้เกิดการเรโซแนนซ์กันได้ เพื่อส่งผ่านพลังงานจากคลื่นให้แก่อิเล็กตรอนในช่วงที่จังหวะของคลื่นสอดคล้องสัมพันธ์กับการหมุนวนของอิเล็กตรอนเรียกว่า Electron Cyclotron Resonance (ECR) [15-17]

การเรโซแนนซ์เกิดขึ้นเมื่อความถี่เชิงมุมของคลื่นเท่ากับความถี่ไซโคลตรอน  $2\pi f = \omega_{ce}$   
 ดังนั้น  $f = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m}$  เมื่อเราใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz แทนค่าในสมการจะได้ว่าเกิดการเรโซแนนซ์เมื่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ 875 Gauss หรือเส้นแรงแม่เหล็ก 875 เส้นในหนึ่งตารางนิ้ว

ในระบบ ECR การไอออไนเซชันโดยหลักใหญ่เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ถูกกักไว้โดยเส้นแรงแม่เหล็ก จุดเด่นคือให้ความหนาแน่นพลาสมาสูงแม้จะมีความดันแก๊สต่ำ ยิ่งความดันแก๊สต่ำการกระเจิงก็น้อยซึ่งมีความสำคัญต่อคุณภาพของฟิล์ม



### บทที่ 3

#### การออกแบบและพัฒนาเครื่องฮีซีอาร์สปัตเตอร์ริง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเครื่องมือสำหรับการเคลือบฟิล์มบางลงบนพื้นผิววัสดุ โดยอาศัยวัสดุที่หาได้ภายในประเทศและมีราคาประหยัด ซึ่งได้นำเครื่องไมโครเวฟฮีซีอาร์สปัตเตอร์ริงที่พัฒนาขึ้นก่อนหน้านี้ [8] มาพัฒนาต่อเพื่อปรับปรุงให้เป็นเครื่องฮีซีอาร์สปัตเตอร์ริง โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไป เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาทำปฏิกิริยาไอออนไนเซชันกับอะตอมของแก๊สมากขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณการติสซาร์จและได้ความหนาแน่นของพลาสมาเพิ่มขึ้น

#### 3.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฮีซีอาร์สปัตเตอร์ริง

##### 3.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

ใช้หลอดแมกนีตรอนจากเตาไมโครเวฟ มีย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งสามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-700 W

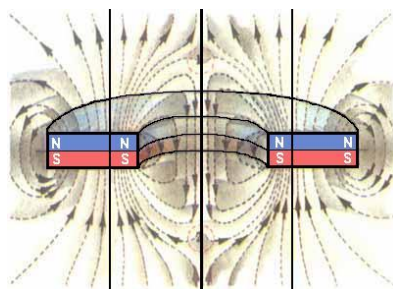
##### 3.1.2 กระจกเรโซแนนซ์ (Resonance Chamber)

เป็นบริเวณที่เกิดการเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟกับการโคจรของอิเล็กตรอนรอบเส้นแรงแม่เหล็ก และเนื่องจากรอบการโคจรมีความถี่เช่นเดียวกับคลื่นไมโครเวฟ จึงทำให้พลังงานของคลื่นสามารถถ่ายเทไปเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนได้สูงสุด และเมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงปะทะกับโมเลกุลแก๊สจะเกิดการไอออนไนเซชันเป็นพลาสมา

ตัวทรงกระจกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 136 มม. ความสูง 184 มม. และผนังหนา 3 มม. ปลายเปิดด้านบนเป็นช่องสำหรับใส่กระจก และปลายด้านล่างเปิดเข้าสู่กระจกสุญญากาศหลัก กระจกที่ใช้เป็นกระจก Borosilicate สามารถทนความร้อนได้สูง 200-400°C สามารถทนความดันได้ 10 bar และคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านได้ โดยเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มม. หนา 15 มม.

### 3.1.3 แม่เหล็กถาวร

เป็นแม่เหล็กนีโอดีเมียมเกรด N35 รูปร่างแหวนโดนัทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 136 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 216 มม. สูง 30 มม. วางไว้ด้านนอกรอบกระบอกเรโซแนนซ์ มีลักษณะขั้วเหนือใต้และทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 3.1 และมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในเนื้อแม่เหล็ก 11800 Gauss (11800 เส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งตารางนิ้ว)

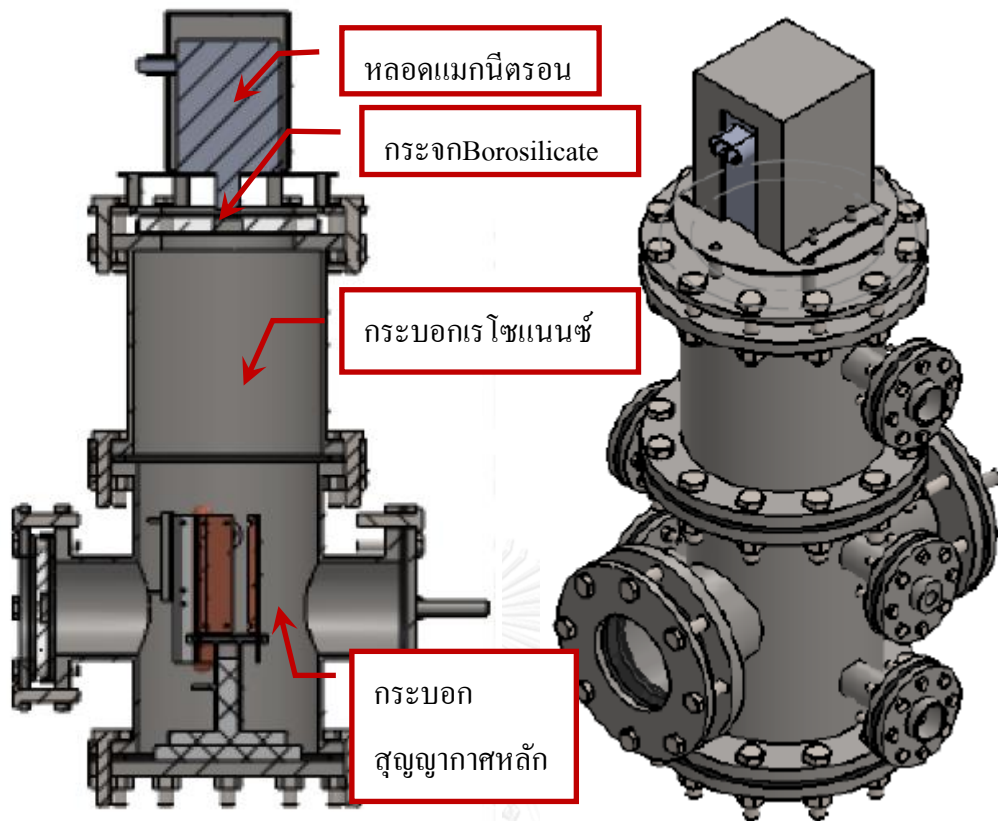


รูปที่ 3.1 ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรรูปร่างแหวนโดนัท

เนื่องจากตัวถังทรงกระบอกที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 304 มีค่า relative permeability (ค่า permeability เมื่อเทียบกับสุญญากาศ) ต่ำประมาณ 1.0037 คือเป็นวัสดุที่ไม่ดูดซับเส้นแรงแม่เหล็กไว้ จึงแทบไม่มีการลดทอนของสนามแม่เหล็กระหว่างภายนอกกับภายในทรงกระบอก

### 3.1.4 กระบอกสุญญากาศหลัก (Main Chamber)

เป็นส่วนที่ต่อกับกระบอกเรโซแนนซ์ พลาสมาที่เกิดจากกระบอกเรโซแนนซ์จะมาเกิดกระบวนการสเปคเตอร์และเกิดการสร้างชั้นฟิล์มภายในส่วนนี้ ภายในกระบอกถูกควบคุมให้มีความดันต่ำ ตัวกระบอกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 136 มม. สูง 200 มม. ผนังหนา 3 มม. ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งภายในประกอบด้วย ชุดวัสดุเป้า ชุดวัสดุชิ้นงาน



รูปที่ 3.2 รูปโครงสร้างภายนอกและภาพตัดขวางของชุดกระบอกระบายสุญญากาศ

### 3.1.5 บีบสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ใช้ปั๊มโรตารี Maruyama CP-150 ใช้ดูดอากาศออกเพื่อให้ภายในกระบอกระโซแนนซ์และกระบอกระบายสุญญากาศหลักมีสภาพใกล้สุญญากาศ ความดันต่ำ ตัวปั๊มจะต่อเข้ากับกระบอกระบายสุญญากาศหลักโดยมีบอลวาล์วกันไว้ และมีลิฟต์วาล์วสำหรับปล่อยให้อากาศเข้าไปได้ มีดิจิตอลมิเตอร์สำหรับวัดค่าความดันภายใน

### 3.1.6 ระบบจ่ายแก๊ส (Feed Gas System)

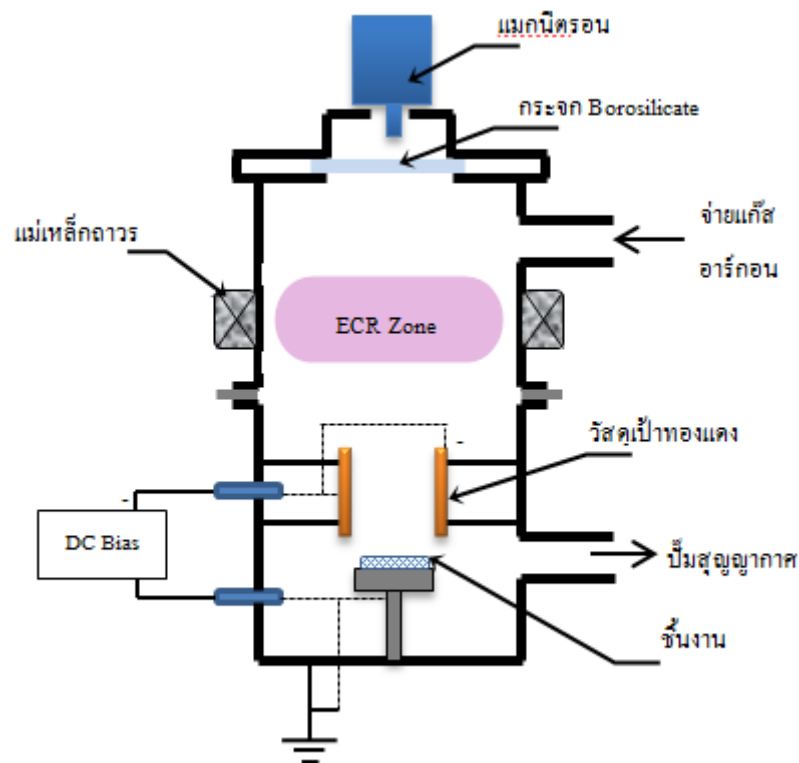
ทำหน้าที่จ่ายแก๊สเข้าไปในกระบอกระโซแนนซ์และกระบอกระบายสุญญากาศหลัก โดยมีตัวปรับลดความดันจากถังแก๊สให้ต่ำลงก่อนส่งเข้ากระบอกระโซแนนซ์ เนื่องจากไม่มี Flow controller ทำให้อัตราการจ่ายแก๊สไม่คงที่และส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าไบอัสของแคโทดหรือวัสดุเป้าไม่คงที่ เนื่องจากค่า Resistivity ของแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊ส ในการทดลองเลือกใช้แก๊สอาร์กอนเพราะเป็นแก๊สเฉื่อยที่มีค่าครอสเซชันต่ออิมแพคอิเล็กตรอนสูงรองจาก Krypton, Xenon แต่ราคาถูกกว่า ทั้งสองมาก มีค่าครอสเซชันสูงสุดที่พลังงานอิเล็กตรอน 70-100 eV



### 3.1.7 ระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Power Supply)

ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไปออสลอบให้แก่ชุดวัสดุเป้าเพื่อเร่งไอออนให้มาพุ่งชนวัสดุเป้าเกิดการสปีดเตอร์ริงขึ้น สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-2000 V

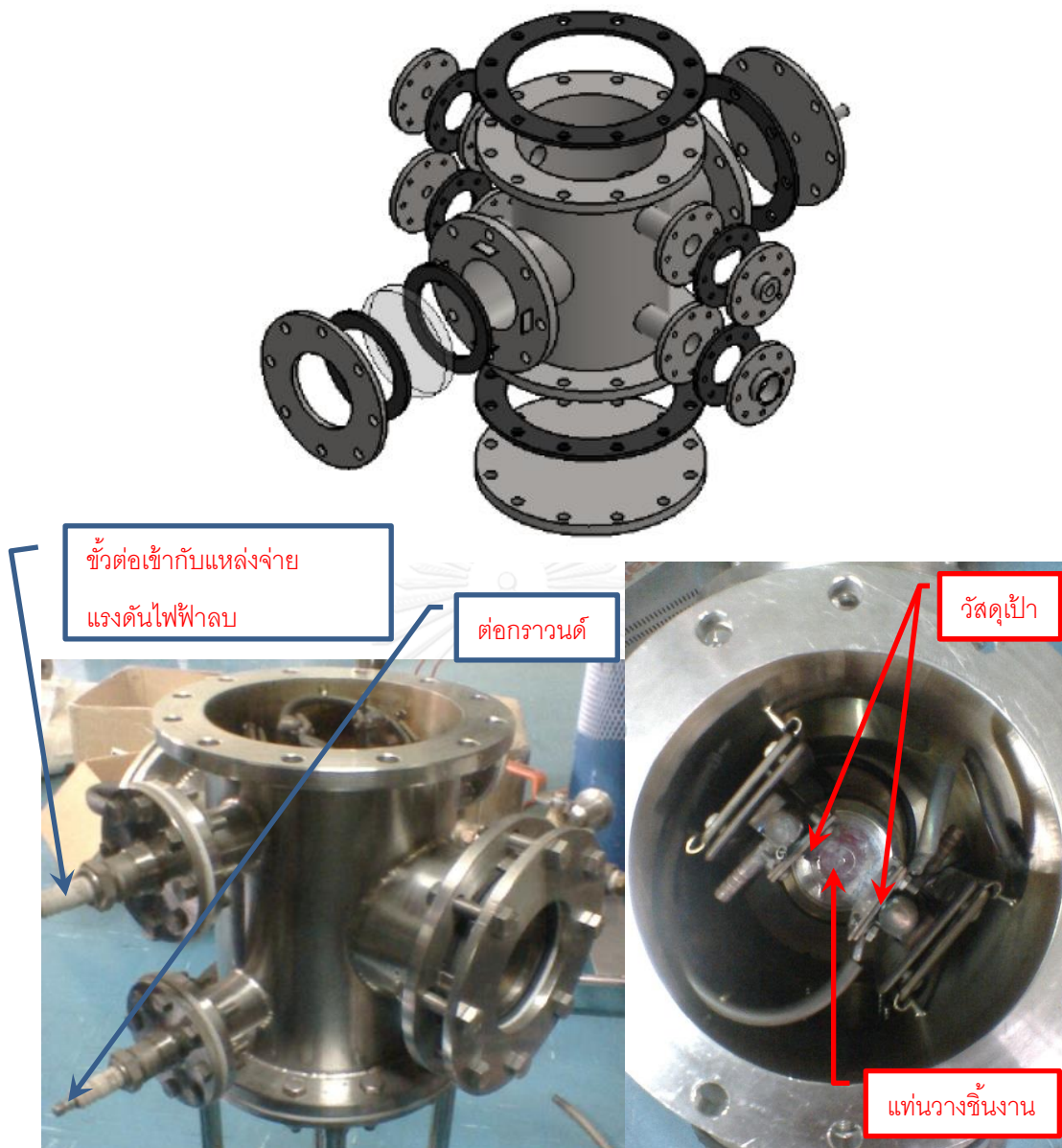
เมื่อนำระบบแต่ละส่วนมาประกอบกันจะได้เป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอีซีอาร์สปีดเตอร์ริง

### 3.2 ชุดกระบอกสุญญากาศหลัก

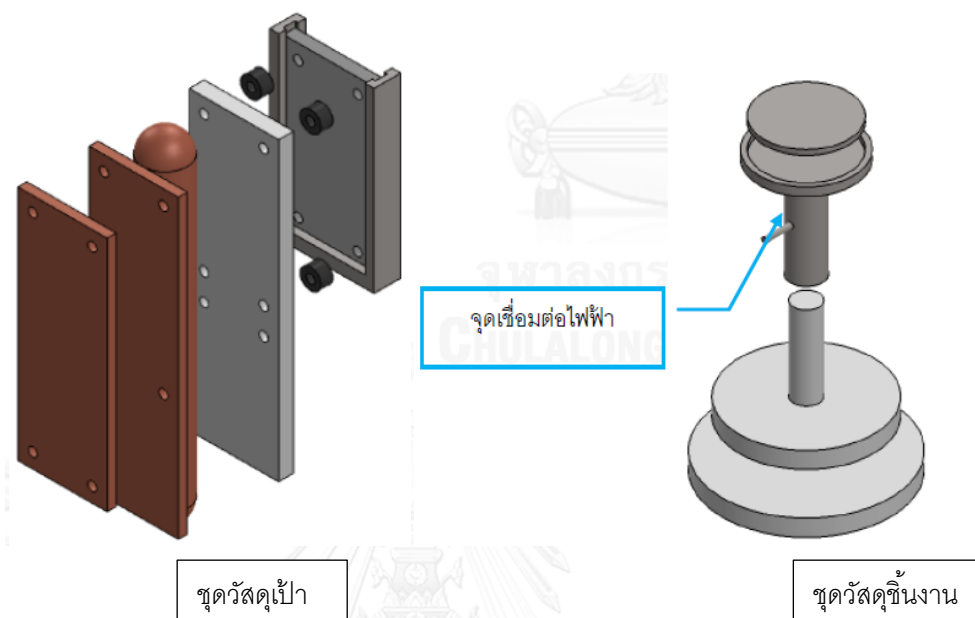
เป็นส่วนประกอบหลักที่จะเกิดกระบวนการสร้างฟิล์มในกระบอกนี้ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 อยู่ด้านล่างต่อจากกระบอกเรโซแนนซ์ พลาสมาจะเกิดขึ้นในบริเวณกระบอกเรโซแนนซ์จากนั้นไอออนของอาร์กอนจะถูกเหนี่ยวนำดึงดูดเข้ากระบอกสุญญากาศหลักด้วยแรงดันไฟฟ้าลบของชุดวัสดุเป้า ให้พุ่งชนวัสดุเป้าเกิดการสปีดเตอร์ได้อนุภาคโลหะของวัสดุเป้าตกลงบนชิ้นงานก่อตัวสะสมเป็นฟิล์มบางขึ้น ภายในกระบอกสุญญากาศหลักประกอบด้วยชุดวัสดุเป้าและชุดวัสดุชิ้นงาน มีลักษณะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบต่างๆของกระบอกสุญญากาศหลัก

**ชุดวัสดุเป่า** เป็นส่วนที่ยึดวัสดุเป่าและมีระบบระบายความร้อนที่ทำเพื่อไว้แต่ไม่ได้ใช้ เนื่องจากวัสดุเป่าสามารถทนความร้อนได้ โดยมีการจ่ายแรงดันไปออสลบให้เพื่อดึงไอออกมา สปีดเตอร์ริง มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.5 โดยวัสดุเป่าจะถูกยึดติดกับแผ่นทองแดง ที่เลือกใช้แผ่นทองแดงเพราะระบายความร้อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมและทนความร้อนได้ดีกว่าอลูมิเนียม และแผ่นทองแดงยึดติดกับระบบระบายความร้อน เนื่องจากไอออนพลังงานสูงพุ่งเข้าชนและสูญเสียพลังงานให้แก่วัสดุเป่าเกิดเป็นความร้อนสะสม อันอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ชุดวัสดุเป่าจะยึด

ติดอยู่ด้านข้างของกระบอกสุญญากาศโดยมีฉนวนกัน ในการทดลองจะใช้วัสดุเป่าที่เป็นแผ่นทองแดงสี่เหลี่ยมขนาด 80x30 มม. หนา 3 มม.



รูปที่ 3.5 รูปจำลองชุดวัสดุเป่าและชุดวางวัสดุขึ้นงาน

**ชุดวัสดุขึ้นงาน** เป็นชุดที่ใช้วางชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ โดยที่ชิ้นวางทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 56 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 มม. สามารถปรับความสูงได้ ต่อกับกราวด์ซึ่งเป็นตัวถังของกระบอกสุญญากาศ มีลักษณะดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เพื่อศึกษาเท่านั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ชิ้นงานขนาดใหญ่และมีความหนาไม่มาก เพราะสะดวกในการตัดไปตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นฟิล์ม ในการทดลองจะใช้ชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียมแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. หนา 2 มม.

### 3.3 กระบอกเรโซแนนซ์

เป็นส่วนที่กำเนิดพลาสมา และทำหน้าที่เป็นท่อนำคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะยอมให้คลื่นที่มีการสั้นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสอดคล้องกับโหมดของท่อเท่านั้นที่ผ่านเข้ามาได้ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานได้สูงสุด โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นทรงกระบอก (Circular Waveguide) ที่ปลายด้านบนทำเป็นช่องสำหรับใส่กระจก Borosilicate ซึ่งเป็นแก้วชนิด

พิเศษที่มีการเติมบอริกออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) ลงไป ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วชนิดนี้ลดลงมาก ส่งผลให้ทนทานต่อการแตกดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว สามารถทนความร้อนได้สูง  $200-400^\circ C$  สามารถทนความดันได้ 10 bar และคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านได้ ขนาดของกระจกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มม. หนา 15 มม. ส่วนปลายด้านล่างเปิดโล่งต่อเข้าสู่กระบอกสุญญากาศหลัก

การออกแบบเริ่มจากการคำนวณ โหมดเพื่อให้ทราบว่าจะภายในท่อนำคลื่นขนาดที่เราใช้อยู่นี้ คลื่นจะมีการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นแบบไหน ที่เราสนใจคือการให้ทิศทางสนามไฟฟ้าของคลื่นไปเรโซแนนซ์กับทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โหมดที่เราสนใจจึงเป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นเป็นโหมด TE (Transverse Electric wave) คือมีการโพลาไรเซชันหรือการสั่นขึ้นลงของสนามไฟฟ้าในระนาบ xy (ระนาบรัศมีของท่อ) แต่ไม่มีการสั่นในแนวแกน z (แกนตามความยาวท่อ) ซึ่งการสั่นนี้มีทิศทางตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่ออกแบบไว้สอดคลองและมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์เป็นแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน เสริมแรงให้มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น

จากสมการการคำนวณความถี่คัทออฟ [14] ของท่อนำคลื่นทรงกลมขนาดรัศมี 65 มม. ความสูง 184 มม. คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ค่า relative permeability ( $\mu_r$ ) ของแก้วอาร์กอน  $\sim 1$  และค่า relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) ของแก้วอาร์กอน  $\sim 1$

$$f_c = \frac{p'_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{p'_{nm} c}{2\pi a \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

จากตารางค่า  $p'_{nm}$  ด้านล่างซ้าย สำหรับโหมด TE สามารถคำนวณความถี่คัทออฟ (ความถี่ต่ำสุดที่จะผ่านได้) ของแต่ละโหมดได้ผลดังตารางที่ 3.1

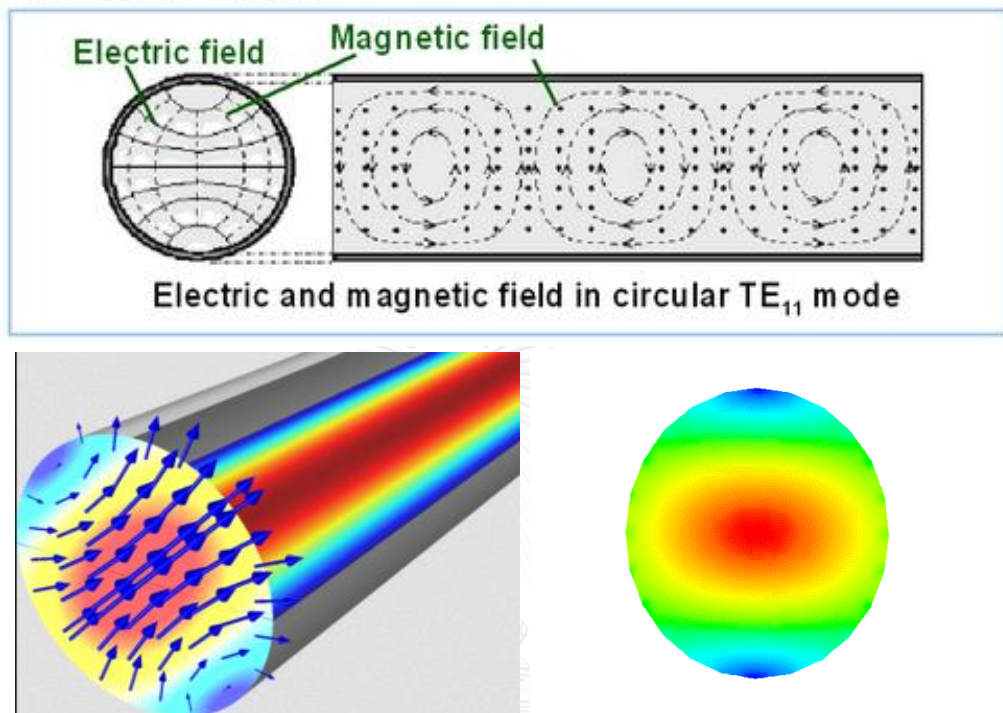
ตารางที่ 3.1 ค่า  $p'_{nm}$  และความถี่คัทออฟในโหมด TE

n	$p'_{n1}$	$p'_{n2}$	$p'_{n3}$	n	$f_{c_{n1}}$ (GHz)	$f_{c_{n2}}$ (GHz)	$f_{c_{n3}}$ (GHz)
0	3.832	7.016	10.1	0	2.814	5.153	7.473
1	1.841	5.331	8.536	1	1.352	3.916	6.270
2	3.054	6.706	9.9'	2	2.243	4.926	7.323

สำหรับความถี่ 2.45 GHz โหมดที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นคือ TE<sub>11</sub> และ TE<sub>21</sub> ซึ่งมีความถี่คutoff ต่ำกว่า 2.45 GHz โหมด TE<sub>11</sub> มีรูปแบบการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังรูปที่

3.6

TE mode:  $E_z = 0, H_z \neq 0$



รูปที่ 3.6 รูปจำลองสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นทรงกระบอกโหมด TE<sub>11</sub>

เมื่อเกิดพลาสมาขึ้นภายในกระบอกเรโซแนนซ์แล้ว คลื่นจะยังคงสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในพลาสมาได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของคลื่นมากกว่าความถี่พลาสมา ( $f_{pe}$ ) ซึ่งความถี่พลาสมาขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) ดังสมการ

$$f_{pe} \approx 8980\sqrt{n_e} \quad (\text{Hz})$$

สำหรับคลื่นความถี่ 2.45 GHz ความหนาแน่นพลาสมาอิเล็กตรอน (critical density) จะต้องไม่เกิน  $7.44 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  คลื่นจึงจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาเข้าไปเรโซแนนซ์ได้

### 3.4 การออกแบบแม่เหล็กถาวร

ในงานนี้ใช้เป็นแม่เหล็กถาวรแทนที่จะใช้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าและสะดวกกว่า ไม่ต้องมีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงที่ป้อนให้ขดลวด ไม่ต้องมีระบบระบายความ

ร้อนแก่ขดลวด แต่แม่เหล็กถาวรก็ยุ่งยากกว่าในการปรับเพิ่มลดค่าสนามแม่เหล็ก การออกแบบเริ่มจากต้องรู้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ คือความถี่การโคจรของอิเล็กตรอนรอบเส้นแรงแม่เหล็ก ( $f_{ce}$ ) ตรงกับความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz โดยใช้สมการ

$$2.45 * 10^9 = f_{ce} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m_e}$$

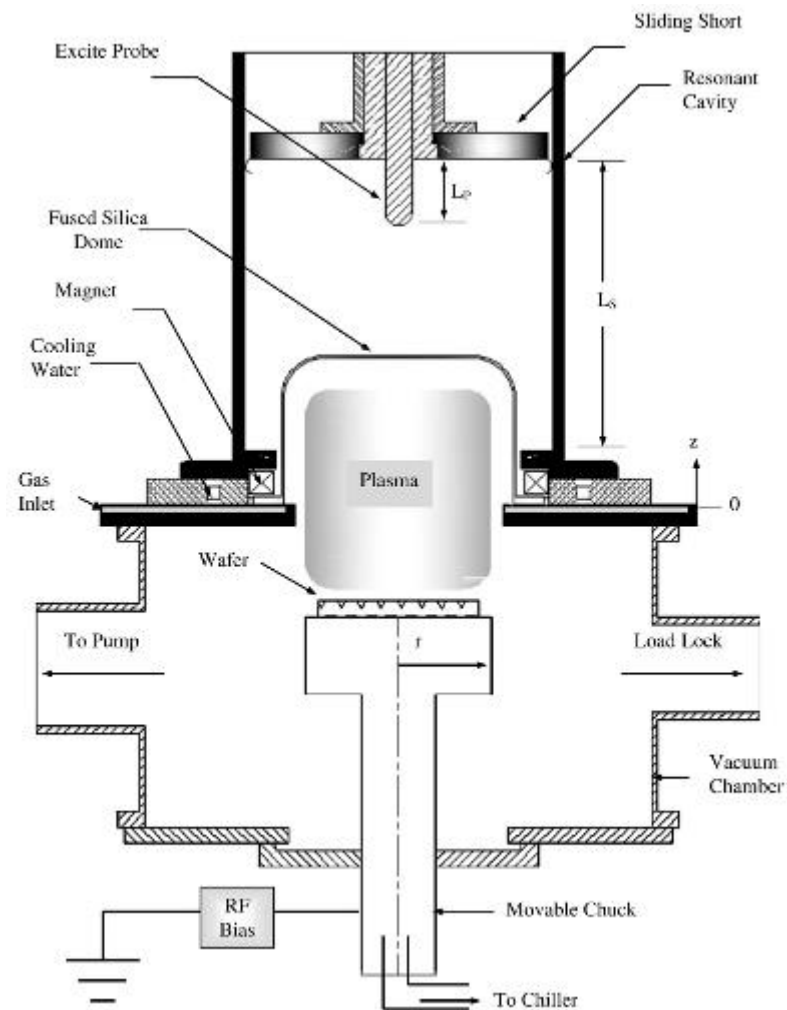
$m_e$  คือมวลอิเล็กตรอน  $\approx 9.109 \times 10^{-31}$  kg

$e$  คือประจุอิเล็กตรอน  $\approx 1.602 \times 10^{-19}$  C

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ค่า  $B \approx 0.087529$  Tesla = 875.29 Gauss

การออกแบบต้องคำนึงถึงทิศทางสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่นด้วย โดยต้องให้สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟมีเฟสตรงกันกับการหมุนของอิเล็กตรอนรอบเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อจะได้เกิดการเรโซแนนซ์ส่งผ่านพลังงานของคลื่นไปเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่อิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้คลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่นในโหมด TE มีการโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้าในระนาบ xy ( $E_x \neq 0, E_y \neq 0, E_z = 0$ ) ดังนั้นต้องออกแบบให้สนามแม่เหล็ก (B) มีทิศตามแนวยาวแกน z จะได้ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (k) และตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งจะทำให้ E ของคลื่นหมุนวนขวาตามเข็มนาฬิกา (right hand polarization) หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับอิเล็กตรอน จึงได้เลือกใช้แม่เหล็กถาวรรูปทรงวงแหวนโดนัทที่มีเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 3.1 และตัวระบอกระโซแนนซ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ซึ่งมีค่า relative permeability  $\approx 1$  คือมีคุณสมบัติการดูดซับเส้นแรงแม่เหล็กต่ำเทียบเท่ากับสุญญากาศ ดังนั้นจึงแทบไม่ดูดซับเส้นแรงแม่เหล็กไว้กับตัวเอง ค่า  $B = 875$  G จึงส่งผ่านจากภายนอกทรงระบอกรได้โดยไม่ถูกลดทอนลง

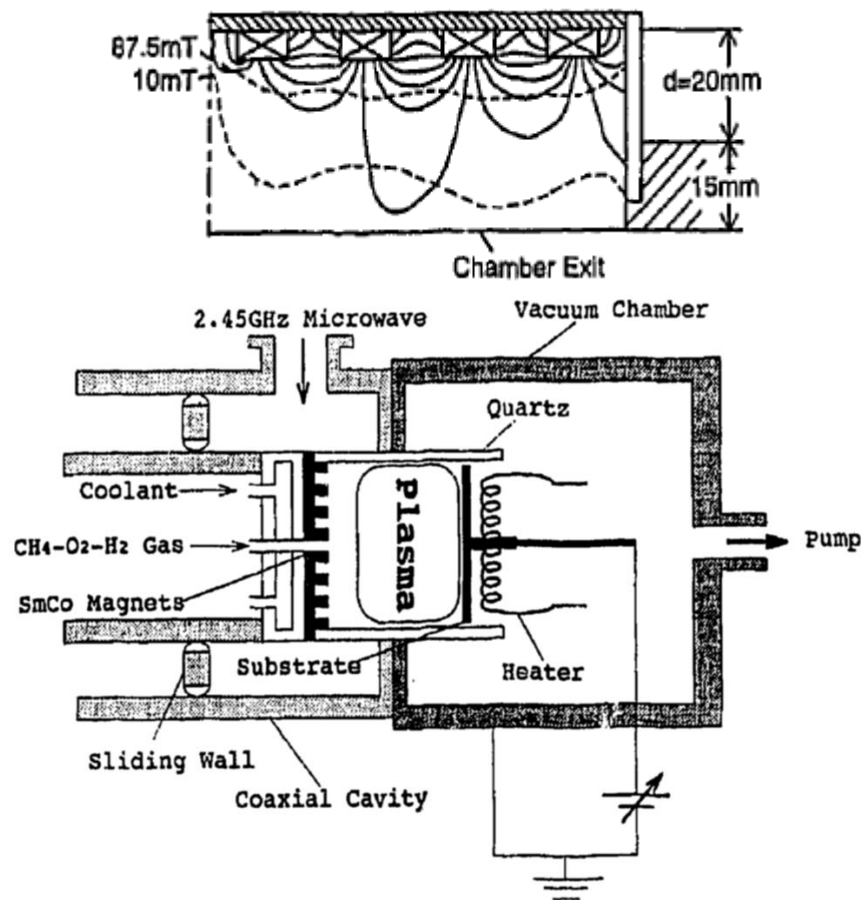
ทั้งนี้ได้ศึกษางานวิจัยต่างๆเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดพลาสมาที่ใช้แม่เหล็กถาวร อย่างเช่นงานวิจัยของ D.T. Tran, T.A. Grotjohn, D.K. Reinhard, J. Asmussen [18] เป็นเครื่อง ECR ที่ส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านเสาอากาศเข้าไปภายใน cavity ที่สามารถปรับเลื่อนความสูงได้และใช้แม่เหล็กถาวรวัสดุโพลา 12 ชั้นวางสลับชั้นเหนือใต้ล้อมรอบโดมแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มม. ดังรูปที่



รูปที่ 3.7 เครื่องมือในงานวิจัยของ D.T. Tran, T.A. Grotjohn, D.K. Reinhard, J. Asmussen

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฟลักซ์แม่เหล็ก 875 gauss มีทิศของเส้นแรงแม่เหล็กไปตามเส้นรอบวงและอยู่ใกล้ๆผนังทรงกระบอกเข้าไปไม่ถึงตรงกลาง หรืองานวิจัยของ Akira Murai, Izumi Ohya, Toshiaki Yasui, Hirokazu Tahara, Takao Yoshikawa [19] ดังรูปที่ 3.8 ไข่แม่เหล็กถาวร SmCo ขนาดสี่เหลี่ยม 10x5x20 มม. หลายก้อนวางเรียงกันเป็นวงแหวนจำนวน 4 วงซ้อนกัน ฟลักซ์แม่เหล็ก 87.5 mT ห่างจากแม่เหล็ก 5 มม.



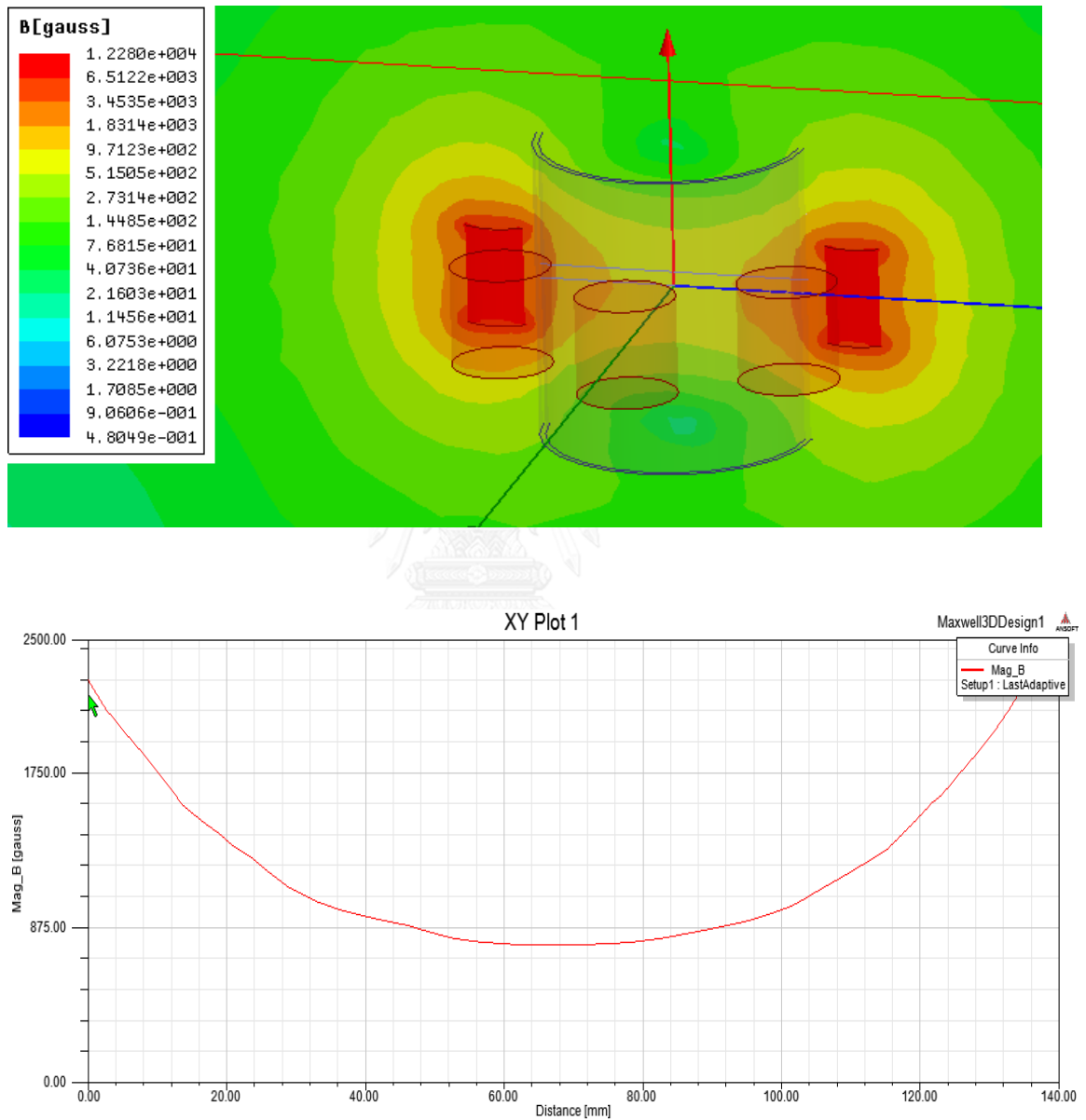
รูปที่ 3.8 เครื่องมือในงานวิจัยของ Akira Murai, Izumi Ohya, Toshiaki Yasui, Hirokazu Tahara, Takao Yoshikawa

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Ansys Maxwell® [20] เวอร์ชัน 14 ช่วยในการออกแบบแม่เหล็กถาวร โดยจะเลือกใช้แม่เหล็กถาวรที่ทำจากวัสดุนีโอดีเมียม (NdFeB) เพราะมีความแรงแม่เหล็กสูงที่สุดในบรรดาแม่เหล็กถาวรทุกชนิด แต่ก็มีข้อเสียคือทนความร้อนได้ต่ำประมาณ 80°C และไม่ทนต่อการกัดกร่อน เพราะแตกหักง่าย จากรูปที่ 3.6 สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟภายในกระบอกระโซแนนซ์มีความเข้มมากที่สุดบริเวณตรงกลางเป็นรูปวงรี จึงออกแบบให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 875 gauss อยู่ใกล้บริเวณตรงกลางท่อด้วย

ได้ใช้โปรแกรมทำการออกแบบแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมหลากหลายรูปทรง หลายขนาด และจัดวางหลากหลายรูปแบบไว้ด้วยกัน ดังต่อไปนี้



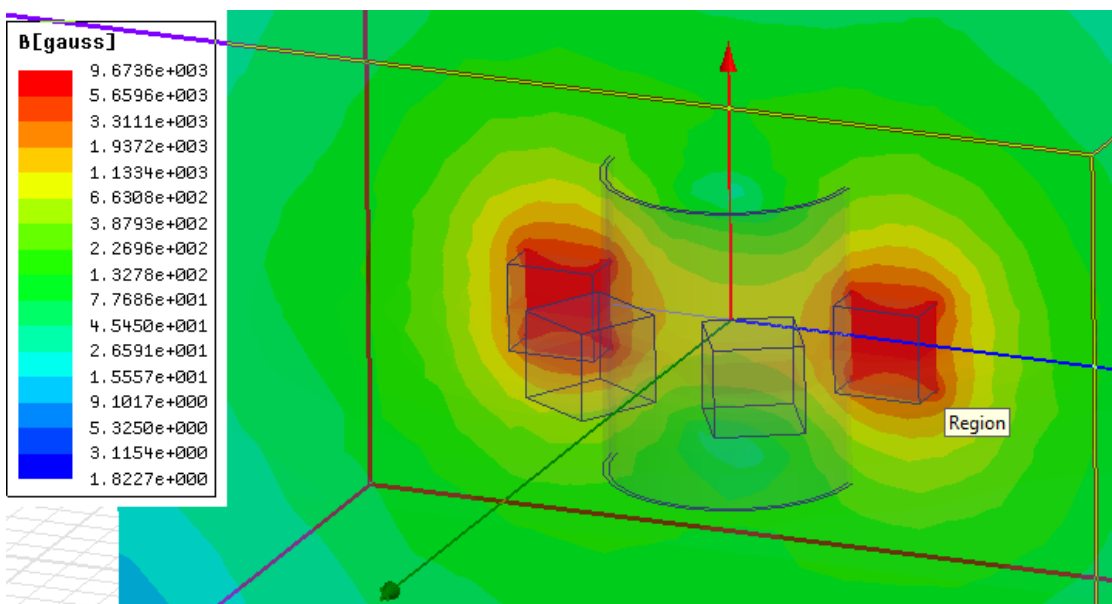
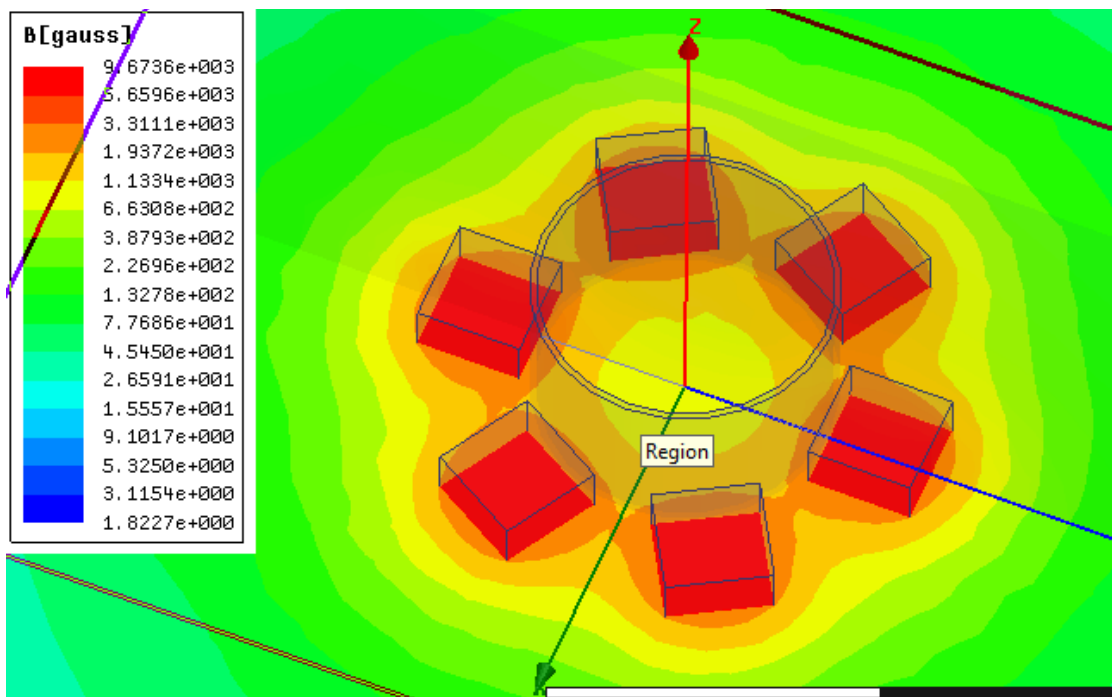
- แม่เหล็กถาวร NdFeB เกรด N35 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในเนื้อแม่เหล็ก ( $B_r$ ) 11800 gauss ทรงกระบอกขนาด 50x50 มม. จำนวน 7 ก้อน มีทิศทางการ magnetization ตามแกน z

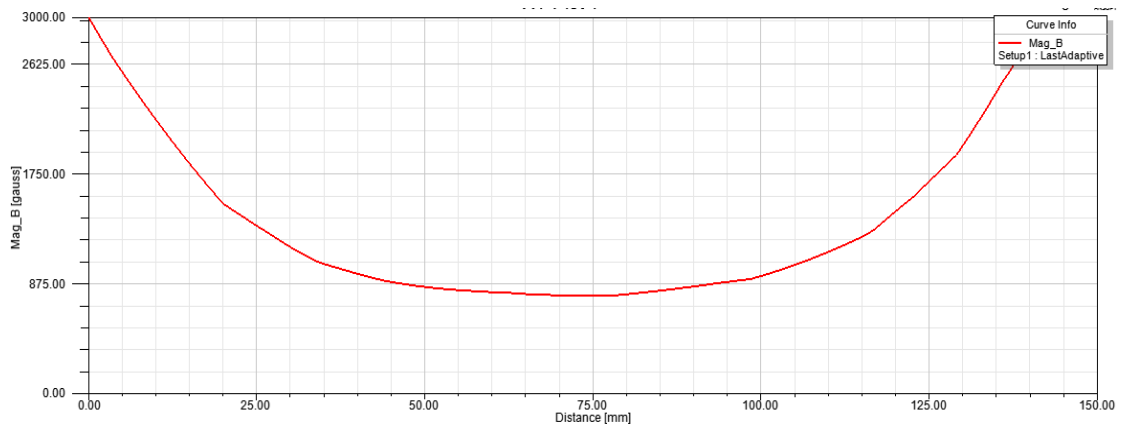


รูปที่ 3.9 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกขนาด 50x50 มม. จำนวน 7 ก้อน

จากกราฟจุดศูนย์กลางทรงกระบอกอยู่ที่ 68 มม. วัตถุที่ตำแหน่งกึ่งกลางก้อนแม่เหล็ก  $z = 0$  สนามแม่เหล็กที่ 875gauss อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกระบอก 20 มม.

- แม่เหล็กถาวร NdFeB เกรด N35 ทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม.  $B_r = 11800$  gauss  
จำนวน 6 ก้อน ทิศทางการ magnetization ตามแกน z

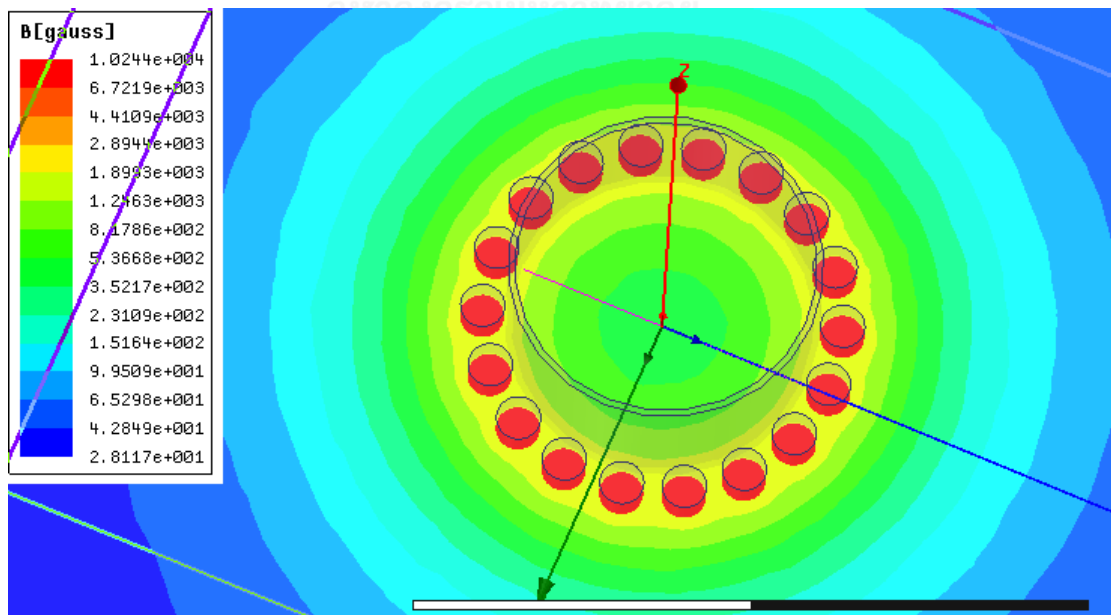


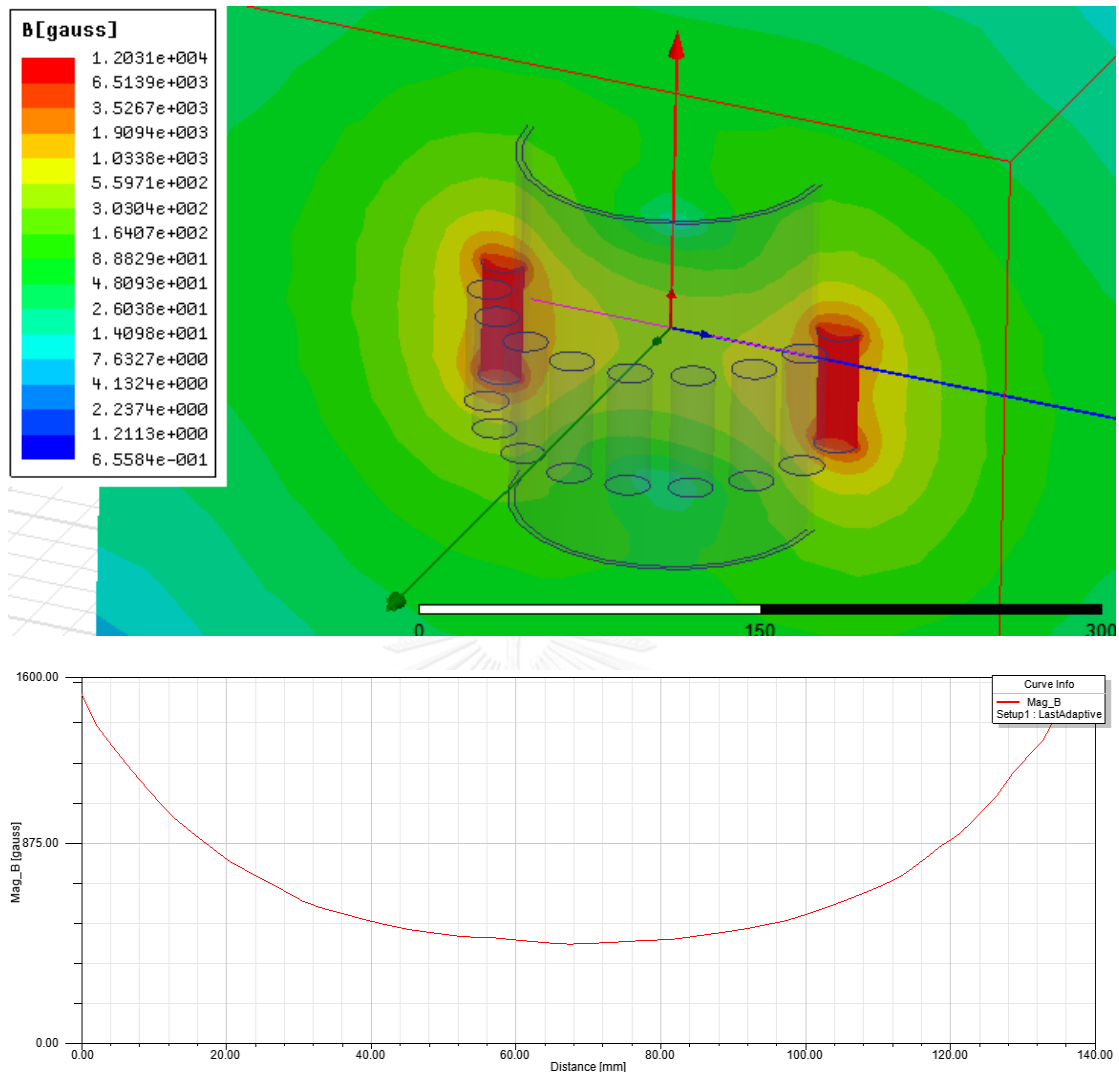


รูปที่ 3.10 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟพล็อตแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. จำนวน 6 ก้อน

จากกราฟจุดศูนย์กลางทรงกระบอกอยู่ที่ 71 มม. วัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางก้อนแม่เหล็ก  $z = 0$  สนามแม่เหล็กที่ 875gauss อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกระบอก 24 มม.

- แม่เหล็กถาวร NdFeB เกรด N35 ทรงกระบอกขนาด 20x55 มม.  $B_r = 11800$  gauss จำนวน 18 แท่ง ทิศทางการ magnetization ตามแกน z

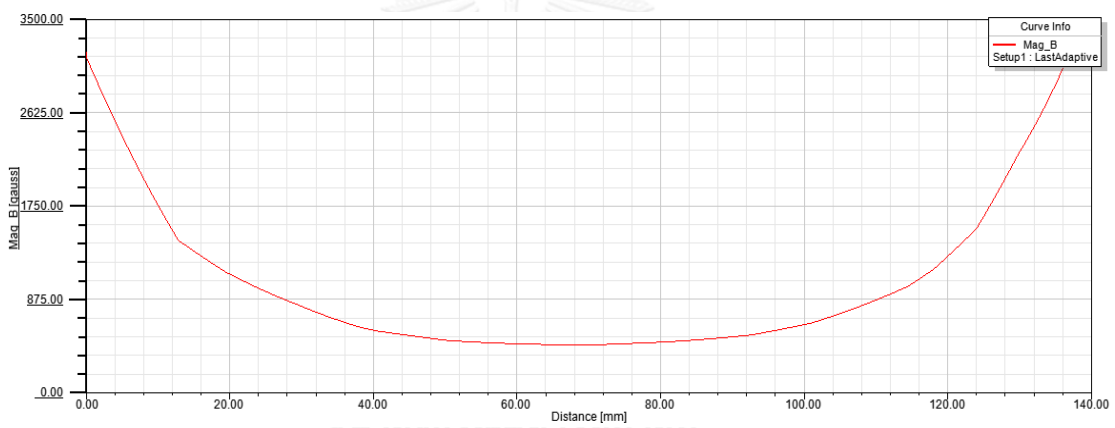
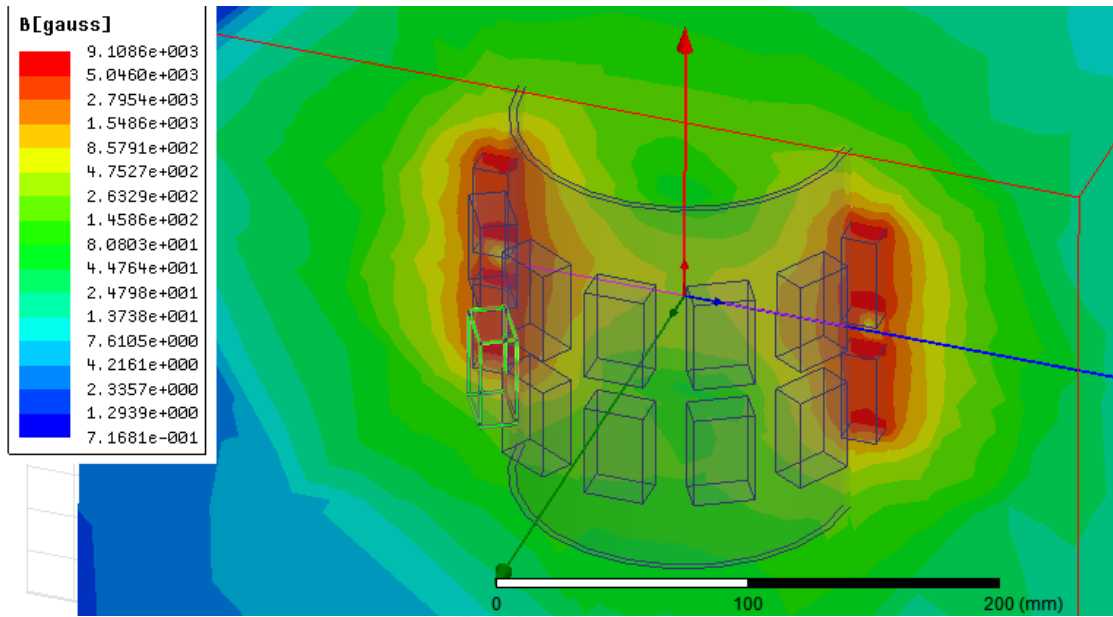




รูปที่ 3.11 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกขนาด 20x55 มม. จำนวน 18 แท่ง

จากกราฟจุดศูนย์กลางทรงกระบอกอยู่ที่ 68 มม. วัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางก้อนแม่เหล็ก  $z = 0$  สนามแม่เหล็กที่ 875gauss อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกระบอก 50 มม.

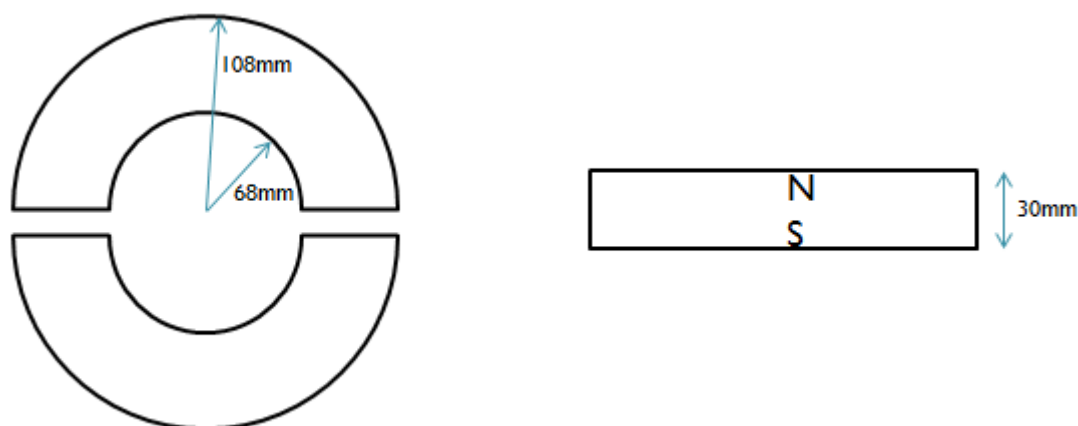
- แม่เหล็กถาวร NdFeB เกรด N35 ทรงสี่เหลี่ยมขนาด 45x25x15 มม.  $B_r = 11800$  gauss จำนวน 2 ชั้น ชั้นละ 12 แท่ง ชั้นบนมีทิศทางการ magnetization ตามทิศ  $-R$  ของทรงกระบอก และชั้นล่างมีทิศทางการ magnetization ตามทิศ  $R$  ของทรงกระบอก



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองสนามแม่เหล็กและกราฟฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $45 \times 25 \times 15$  มม. จำนวน 2 ชั้น ชั้นละ 12 แท่ง

จากกราฟจุดศูนย์กลางทรงกระบอกอยู่ที่ 68 มม. วัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางก้อนแม่เหล็ก  $z = 0$  สนามแม่เหล็กที่ 875 gauss อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกระบอก 40 มม.

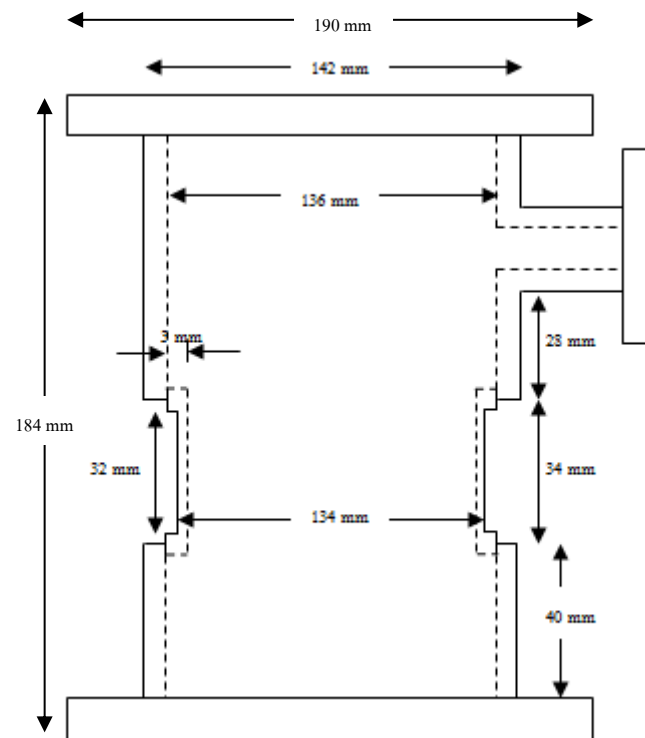
และสุดท้ายเป็นรูปทรงวงแหวน มีรัศมีภายใน 68 มม. รัศมีภายนอก 108 มม. ความสูง 30 มม. พบว่าให้ความสม่ำเสมอ ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กเหมาะสม และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 875 gauss ใกล้จุดศูนย์กลางตรงกับที่ต้องการที่สุด แต่เนื่องจากกระบอกเรโซแนนซ์ของเครื่อง ECR มี flange ทั้งด้านบนและล่างซึ่งใหญ่กว่าขนาดของตัวทรงกระบอก



รูปที่ 3.13 ขนาดและรูปทรงของแม่เหล็กครึ่งวงกลมสองชิ้น

ถ้าจะใช้แม่เหล็กวงแหวนมาสวมต้องมีขนาดรัศมีภายในอย่างต่ำ 95 มม. แต่ตัวกระบอกมีรัศมีภายนอกเพียง 68 มม. ซึ่งทำให้แม่เหล็กมีขนาดใหญ่และราคาที่สูงเกินจำเป็นและเพิ่มระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของทรงกระบอกกับแม่เหล็กไปโดยไม่สมควรกับที่เราต้องการ คือให้ตรงกลางมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 875 gauss

จึงออกแบบโดยใช้แม่เหล็กรูปครึ่งวงกลมมีรัศมีภายใน 68 มม. รัศมีภายนอก 108 มม. ความสูง 30 มม. จำนวน 2 ชิ้น ดังรูปที่ 3.13 เป็นแม่เหล็กแร่หายาก (Rare earth magnet) นีโอดีเมียมเกรด N35 [21] มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในเนื้อแม่เหล็กสูงสุด (Residual flux density, Br) 11800 gauss ทนอุณหภูมิสูงสุดที่ 80°C นำมาประกบกัน น้ำหนักแม่เหล็กโดยรวม 5.2 kg ซึ่งแต่ละชิ้นมี magnetized direction ตามแกน z มาประกบเข้าด้วยกันลงในร่องที่ทำรอยบากไว้เข้าไปในทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.14 แล้วล็อกด้วยแผ่นอลูมิเนียม โค้งและน็อตดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ภาพตัดขวางของกระบอกเรโซแนนซ์

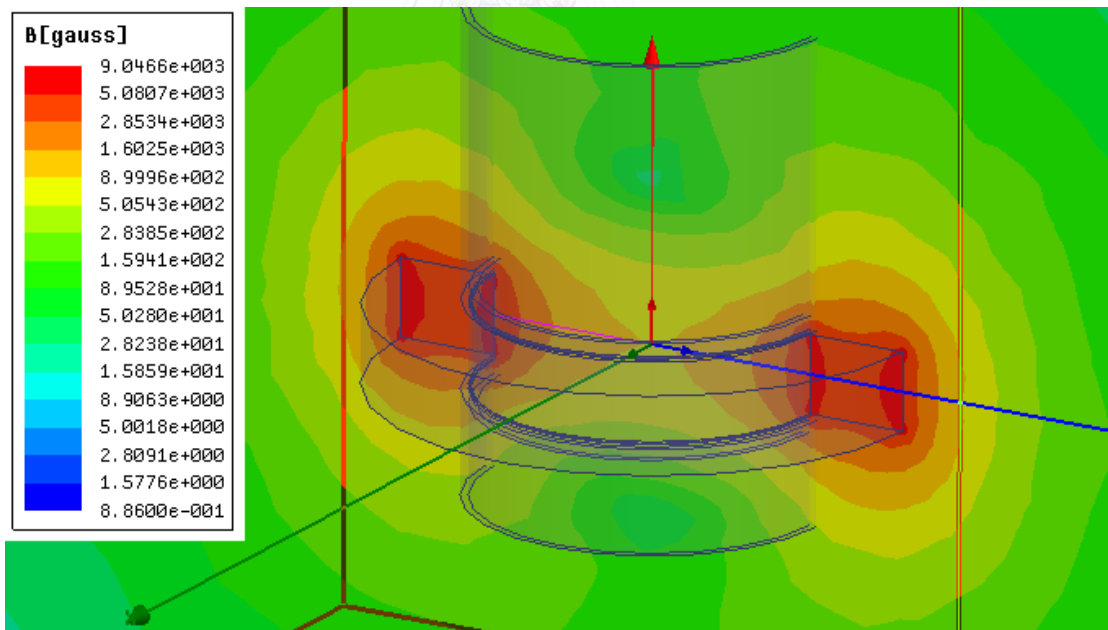




รูปที่ 3.15 ติดตั้งแม่เหล็กเข้ากับกระบอกเรโซแนนซ์

ผลของการใช้โปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในกระบอกเรโซแนนซ์ได้ผลดัง

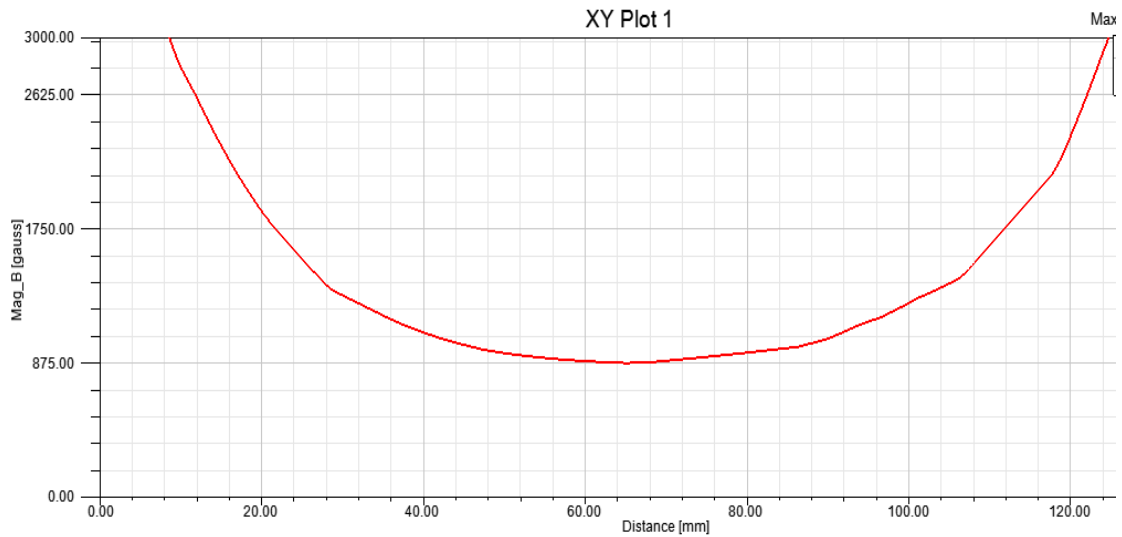
รูปที่ 3.16



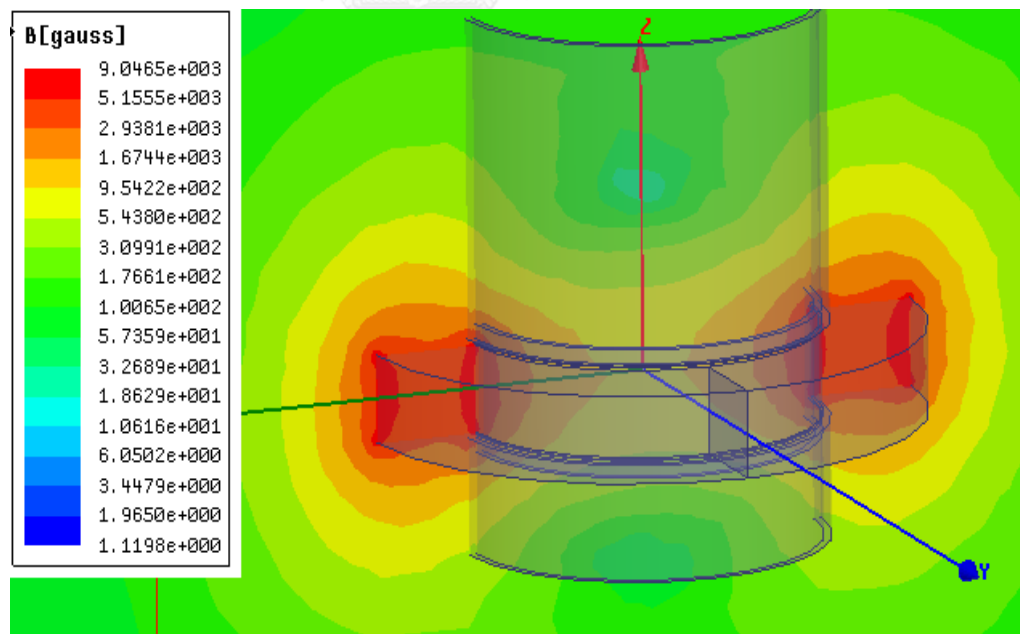
รูปที่ 3.16 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในระนาบ yz



จากรูปที่ 3.16 แสดงผลเป็นกราฟตัดขวางได้ดังรูปที่ 3.17 แสดงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของเส้นแกน  $y$  วัดที่  $x=0, z=0$  จุดศูนย์กลางทรงกระบอกอยู่ที่ 68 มม. สนามแม่เหล็ก 875 gauss อยู่ที่จุดศูนย์กลางทรงกระบอก

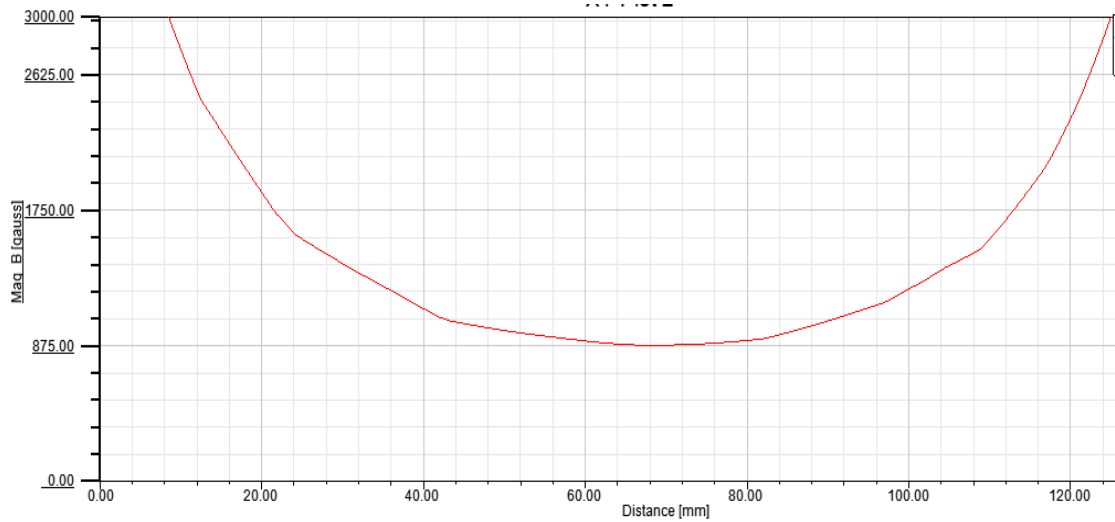


รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในเส้นแกน  $y$  ที่  $x=0, z=0$

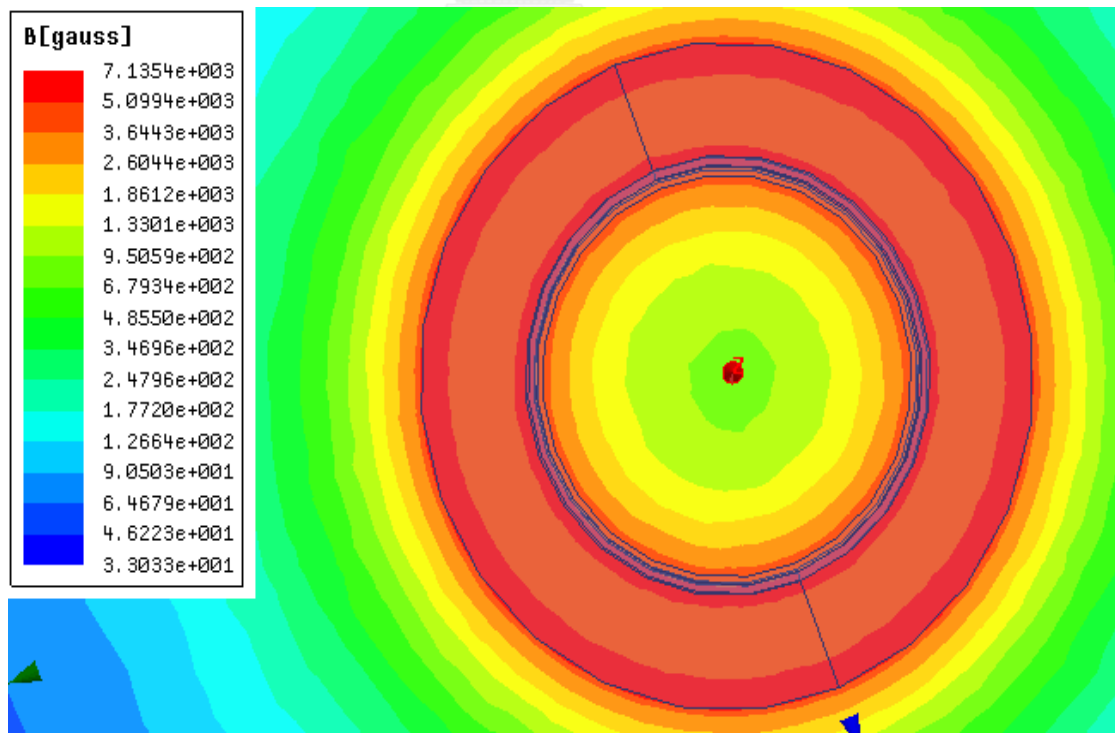


รูปที่ 3.18 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในระนาบ  $xz$

และรูปที่ 3.18 แสดงผลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.19 แสดงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของเส้นแกน x วัดที่  $y=0, z=0$  จุดศูนย์กลางทรงกระบอกอยู่ที่ 68 มม. สนามแม่เหล็ก 875 gauss อยู่ตรงจุดศูนย์กลางทรงกระบอก



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในเส้นแกน x ที่  $y=0, z=0$

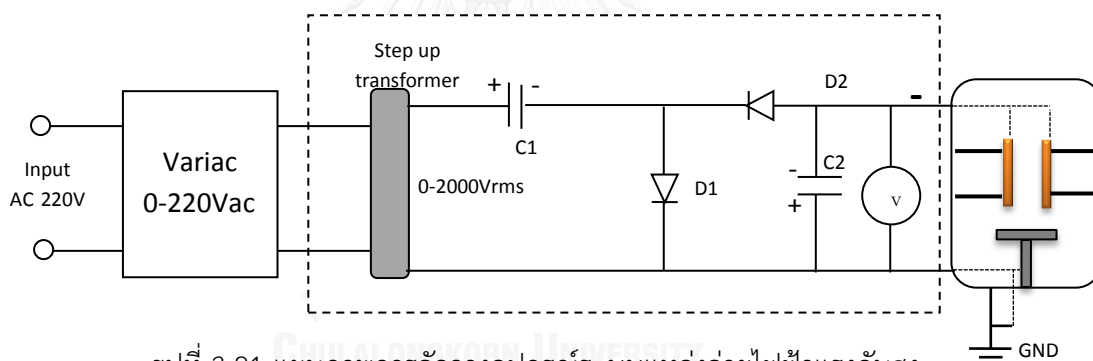


รูปที่ 3.20 แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในระนาบ xy

และรูปที่ 3.20 แสดงผลความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบนระนาบ xy ตรงตำแหน่งที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 875 gauss มีรูปร่างเป็นวงกลมในสุดเมื่อมองจากด้านบน สอดคล้องกับคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz เคลื่อนที่ในกระบอกเรโซแนนซ์เป็นโหมด TE<sub>11</sub> ซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.6

### 3.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (High Voltage Power Supply)

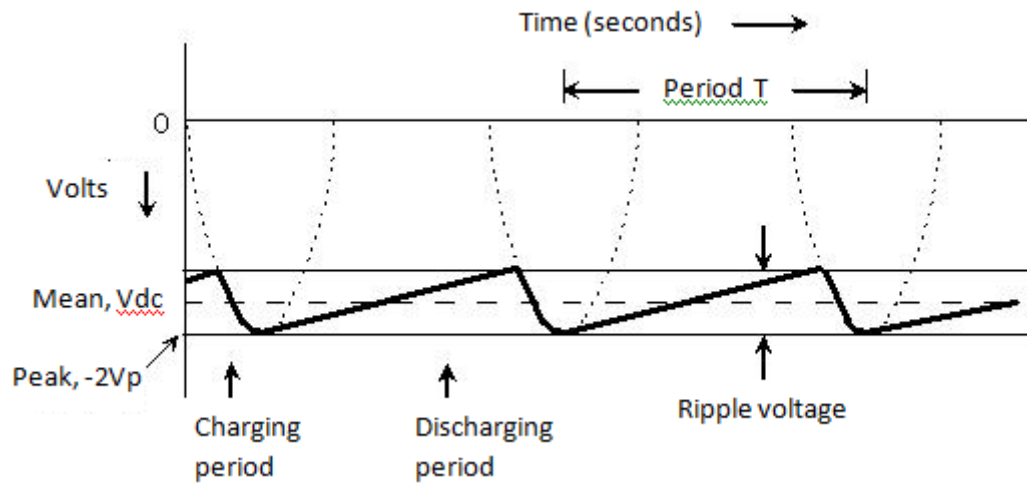
1) ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบบเพื่อป้องกันแก้ววัสดุเป่า มีแผนภาพดังรูปที่ 3.21 ออกแบบโดยใช้หม้อแปลงปรับแรงดันได้ (variable autotransformer) 0-220V<sub>ac</sub> 4kVA ต่อเข้ากับหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน (step up transformer) ให้แรงดันเอาต์พุตสูงสุด ( $V_{rms}$ ) ที่ 2000 V<sub>ac</sub> จากหม้อแปลงต่อเข้ากับวงจรทวีแรงดันแบบครึ่งคลื่นด้านลบ [22] เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าลบบกระแสตรงแรงดันไฟฟ้าพีคเอาต์พุตที่ได้มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง -5656 V<sub>dc</sub> ขึ้นอยู่กับการปรับแรงดันอินพุต 0-220 V<sub>ac</sub>



รูปที่ 3.21 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

วงจรทวีแรงดันแบบครึ่งคลื่นด้านลบ (Negative half-wave voltage doubler) ใช้ตัวเก็บประจุและไดโอดอย่างละสองตัว ต่อกันดังแผนภาพในเส้นประของรูปที่ 3.21 มีหลักการทำงานคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุตจาก step up transformer เป็นครึ่งคลื่นด้านบวก ไดโอด D1 เป็นฟอร์เวิร์ดไบอัส ไดโอด D2 เป็นรีเวิร์ดไบอัส ตัวเก็บประจุ C1 ชาร์จเก็บประจุจนเต็มสุดที่แรงดันพีค ( $V_p = V_{rms} * \sqrt{2}$ ) เมื่อแรงดันเอาต์พุตจาก step up transformer เป็นครึ่งคลื่นด้านลบ ไดโอด D2 เป็นฟอร์เวิร์ดไบอัส ไดโอด D1 เป็นรีเวิร์ดไบอัส ตัวเก็บประจุ C1 ไม่สามารถดิสชาร์จได้ ดังนั้นแรงดันของ C1 รวมกับแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงคือแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C2 ชาร์จเก็บไว้จนเต็มเท่ากับ  $-2V_p$  แรงดันเอาต์พุตที่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในกรณีเมื่อไม่มีโหลด แรงดัน C2 ก็ยังคงที่ตลอดไป แต่เมื่อมีการต่อ

โหลดเข้าไป ตัวเก็บประจุ C2 จะดิสชาร์จให้แก่โหลดเฉพาะในช่วงที่แรงดันจากหม้อแปลงเป็นครึ่งคลื่นด้านบวก และทำการชาร์จใหม่เมื่อเป็นครึ่งคลื่นด้านลบ ได้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

ส่วนความเรียบของแรงดันระหว่างขดฟลักซ์ขึ้นอยู่กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสโหลดด้วย เราสามารถประมาณกระแสโหลดได้จาก ข้อมูลความหนาแน่นไอออนในเครื่อง ECR ทั่วไปประมาณ  $10^{10}$  ion/cm<sup>3</sup> ความหนาแน่นกระแสไอออนที่วัสดุเป้าประมาณ 1 mA/cm<sup>2</sup> เป้าทองแดงมีขนาด 8 cm x 3 cm พื้นที่ 24 cm<sup>2</sup> คิดเป็นกระแสโหลดคร่าวๆได้เท่ากับ 24 mA สามารถหาขนาดความจุของตัวเก็บประจุได้จากสมการ

$$\text{สำหรับแบบครึ่งคลื่น} \quad C = \frac{Q}{V_{\text{ripple}}} = \frac{I_{\text{load}}}{f * V_{\text{ripple}}}$$

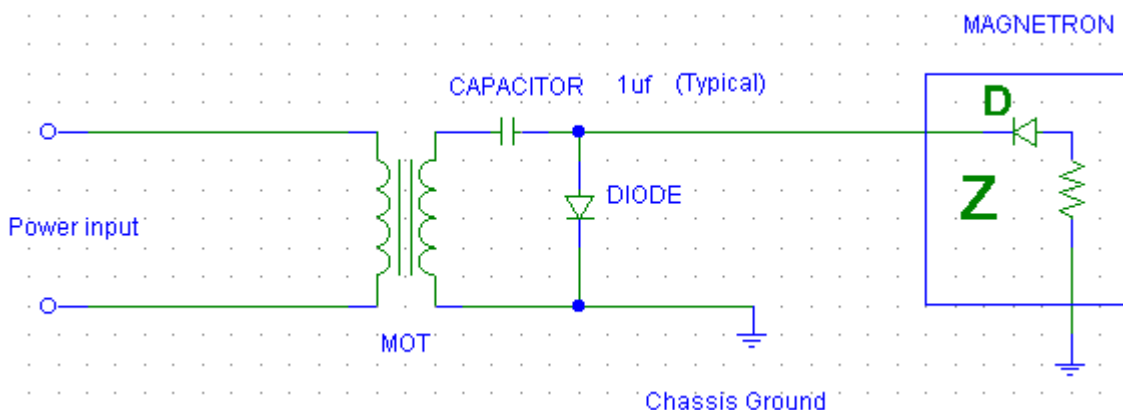
$$\text{สำหรับแบบเต็มคลื่น} \quad C = \frac{Q}{V_{\text{ripple}}} = \frac{I_{\text{load}}}{2f * V_{\text{ripple}}}$$

โดยที่  $V_{\text{ripple}}$  คือผลต่างของแรงดันระหว่างขดคลื่น อันเกิดจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.18

$f$  คือความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต

$I_{\text{load}}$  คือกระแสที่โหลดต้องใช้ ซึ่งโหลดใช้กระแสมาก ประจุที่คายจากตัวเก็บประจุก็ลดลงเร็วตามไปด้วย จึงต้องใช้ตัวเก็บประจุที่สามารถเก็บประจุได้มากขึ้นเพื่อให้แรงดันรีปเปิลน้อยๆ

2) ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบเพื่อป้อนให้แก่แมกนีตรอน จะใช้วงจรของเตาไมโครเวฟซึ่งมีใช้ทั่วไปตามบ้านเรือน มีโคอะแกรมดังรูปที่ 3.23



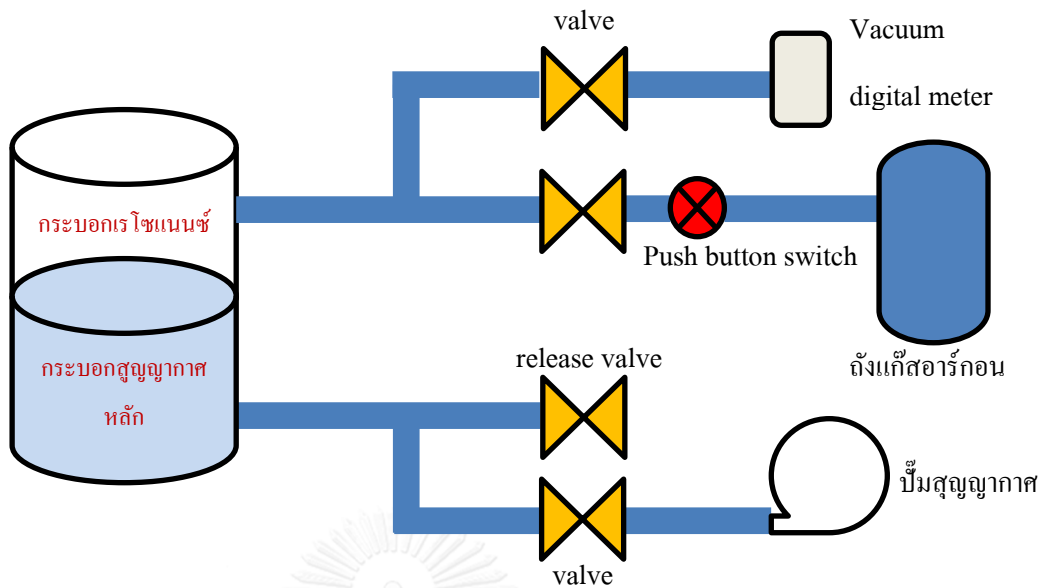
รูปที่ 3.23 วงจรระบบแหล่งจ่ายไฟของเตาไมโครเวฟ

### 3.6 ระบบสุญญากาศ

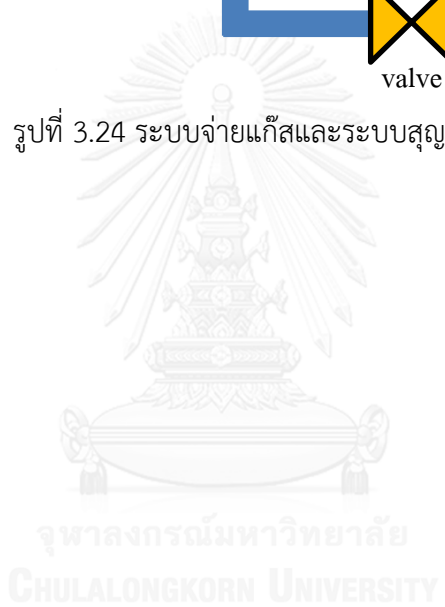
ภายในกระบอกสุญญากาศจำเป็นต้องให้มีโมเลกุลของสิ่งต่าง ๆ น้อยที่สุดจนใกล้เคียงสุญญากาศ เพื่อลดอัตราการชนและหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนจากอะตอมที่ไม่ต้องการ อันส่งผลต่อการเกิดพลาสมาและฟิล์ม จึงได้ใช้ปั๊มสุญญากาศโรตารี Maruyama CP-150 เพื่อสูบล้างอากาศออกจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าระดับความดันที่เหมาะสมสำหรับระบบอีซีอาร์ประมาณ  $10^{-4}$  Torr โดยปั๊มสุญญากาศจะต่อเข้ากับกระบอกสุญญากาศหลักโดยมีวาล์วกันไว้ มีแผนภาพดังรูปที่ 3.24

### 3.7 ระบบจ่ายแก๊สอาร์กอน

แก๊สอาร์กอนเป็นตัวกลางสำคัญที่ทำให้เกิดพลาสมา โดยอาศัยการชนจากอิเล็กตรอนทำให้อะตอมแก๊สเกิดการไอออไนเซชันแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน และไอออนของอาร์กอนจะถูกเหนี่ยวนำพุ่งเข้าชนวัสดุเป้าเกิดการสปัตเตอร์ทำให้อะตอมของวัสดุเป้ากระเด็นออกมา และก่อตัวสะสมฝังตัวเป็นชั้นฟิล์มบางบนวัสดุชิ้นงาน ในงานวิจัยใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% จากถังแก๊สที่มีความดัน 140 bar ต่อเข้ากับตัวปรับลดความดันให้เหลือ 0-10 bar ก่อนที่จะต่อเข้ากับกระบอกเรโซแนนซ์โดยมีวาล์วสวิตซ์ไฟฟ้ากันไว้เพื่อควบคุมการจ่ายแก๊ส มีแผนภาพดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ระบบจ่ายแก๊สและระบบสุญญากาศ



## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

เครื่องอิเล็กทรอนิกส์โซลิดสเตตเรโซแนนซ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบไปด้วยระบบต่างๆหลายส่วนด้วยกันคือ ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้า ระบบสุญญากาศ ระบบจ่ายแก๊สอาร์กอน และระบบไมโครเวฟ จึงต้องมีการทดสอบการทำงานของแต่ละส่วน ก่อนที่จะนำมาประกอบกัน จากนั้นทำการทดลองเคลือบอนุภาคลงบนผิววัสดุ หลังจาการทดลองนำชิ้นงานไปตรวจสอบหาอนุภาคทองแดงด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) และส่องดูสภาพผิวหน้าของชิ้นงานด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

#### 4.1 การทดสอบระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบบกระแสดตรงที่จะจ่ายให้แก่วัสดุเป้า มีวงจรดังรูปที่ 3.17 ทดสอบโดยปรับแรงดันกระแสกลับด้านอินพุตของหม้อแปลงปรับแรงดันได้ (Variable autotransformer) และวัดแรงดันลบบกระแสดตรงที่คร่อมตัวเก็บประจุ C2 คือแรงดันเอาต์พุต ในกรณีที่ไม่มีโหลด ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต

แรงดันกระแสกลับอินพุต ( $V_{in}$ )	แรงดันลบบกระแสดตรงเอาต์พุต ( $V_{out}$ )
1.75	50
3.28	100
10	300
15	500
25.5	800
32	1000
38	1200
47.8	1500
64	1800
67	2000

ผลจากตารางข้างบนสอดคล้องกับการคำนวณคร่าวๆดังนี้ แรงดันอินพุตกระแสสลับ ( $V_{in}$ ) เป็นค่า  $V_{rms}$  ต่อเข้าหม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในอัตราส่วนประมาณ 1:11 ได้แรงดันเอาต์พุตกระแสสลับจากหม้อแปลงเป็นค่า  $V_{rms}$  สูงขึ้น 11 เท่า จากนั้นต่อเข้าสู่วงจรทวิแรงดันเป็น 2 เท่าได้แรงดันลบกระแสตรงเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) ซึ่งเป็นแรงดันพีค ( $V_p$ ) โดยที่แปลงจากแรงดัน Root mean square (rms) เป็นแรงดันพีคได้จากสมการ  $V_p = V_{rms} * \sqrt{2}$  ทำให้ได้สมการ  $V_{out} = V_{in} * 11 * 2 * \sqrt{2}$

เมื่อต่อขั้วแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับโหนด โดยขั้วลบต่อเข้ากับวัสดุเป่าและขั้วบวกต่อเข้ากับแท่นวางชิ้นงานและตัวถังทรงกระบอกซึ่งเชื่อมต่อกับกราวด์ ในการทดลองเคลือบเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าค่าเกินไปจะไม่เกิดพลาสมา แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไปความดันภายในกระบอกสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเร็วเนื่องจากความร้อนและเกิดการสปาร์ก พบว่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่เหมาะสมคือ 500-1200 V เมื่อจ่ายแก๊สอาร์กอนค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตกลงไปอยู่ที่ 300-400 V อันเนื่องมาจากค่า Resistivity ของแก๊สซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สด้วย

#### 4.2 การทดสอบระบบสุญญากาศและระบบจ่ายแก๊ส

ในการทดสอบระบบสุญญากาศตั้งแผนภาพรูปที่ 3.20 ให้ปิดวาล์วทั้งหมด เปิดเฉพาะวาล์วที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศและดิจิตอลแวกคัมมิเตอร์ ใช้ปั๊มสุญญากาศ Maruyama CP-150 ดูดอากาศภายในกระบอกสุญญากาศออก ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงครึ่ง จนมีความดัน  $5 \times 10^{-2}$  Torr ซึ่งเป็นขีดจำกัดของโรตารีปั๊ม โดยอ่านค่าได้จากดิจิตอลแวกคัมมิเตอร์ จากนั้นปิดวาล์วที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ ค่าความดันภายในกระบอกสุญญากาศค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงว่ามีอากาศรั่วเข้ามาได้

ทดสอบระบบจ่ายแก๊สโดยเปิดวาล์วที่ต่อกับถังแก๊สอาร์กอน โดยหมุนวาล์วให้เปิดน้อยที่สุด กดปุ่มสวิทช์เพื่อจ่ายแก๊สอาร์กอนเข้ามาในกระบอกสุญญากาศ จนกระทั่งความดันภายในกระบอกสุญญากาศได้ประมาณ  $5 \times 10^{-1}$  Torr จึงปิดวาล์วที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ แล้วจึงเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าทำการทดลอง



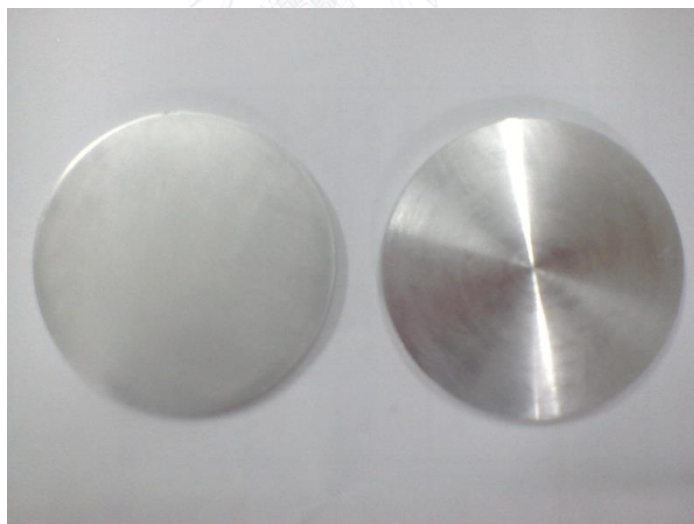
### 4.3 การเตรียมวัสดุชิ้นงาน

วัสดุชิ้นงานที่จะใช้ในการทดลองนี้คืออลูมิเนียมเกรด 6061 ซึ่งมีใบรับรองส่วนประกอบจากผู้ผลิต มีอัตราส่วนสารประกอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลดังรูปที่ 4.1

Chemical Composition												
熔炼号 Melt No	元素 Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	----	Al
	标准值 Standard Value	0.40-0.80	≤0.70	0.15-0.40	≤0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	----	≤0.25	≤0.15	----	余量
E011901	实测值 Actual Value	0.74	0.2	0.27	0.04	0.9	0.14	----	0.03	0.02		Remainder

รูปที่ 4.1 สารประกอบของชิ้นงานอลูมิเนียม

ก่อนทำการทดลองจะต้องทำการปรับสภาพผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบที่สุดก่อน โดยใช้เครื่องขัดผิว Buehler รุ่น Metaserv 250 เริ่ม โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ที่หยาบที่สุดคือเบอร์ 600 ขัดจนเรียบแล้วจึงเปลี่ยนเป็นเบอร์ 1200 และเบอร์ 4000 ตามลำดับ หลังจากการขัดจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานอลูมิเนียม ภาพด้านซ้ายหลังขัดผิว และขวาก่อนขัดผิว

### 4.4 การทดลองการเคลือบ

นำชิ้นงานที่ได้ผ่านการขัดผิวหน้าแล้ววางลงบนภาควัสดุชิ้นงานภายในกระบอกสุญญากาศ โดยปรับระยะให้ชิ้นงานมีระยะห่างจากขอบล่างของวัสดุเป้า 2 เซนติเมตรและปิดกระบอก หลังจาก

ที่จ่ายแก๊สอาร์กอนและปรับความดันภายในกระบอกสุญญากาศเป็น  $5 \times 10^{-1}$  Torr แล้วเริ่มทำการทดลองกระบวนการเคลือบ โดยจะแบ่งแยกการทดลองเป็นสองแบบคือไม่ใช้ไมโครเวฟเกิดพลาสมาจากแรงดันดีซี และใช้ไมโครเวฟร่วมกับแม่เหล็กทำให้เกิดเรโซแนนซ์แบบ ECR ใช้วัสดุเป้าเป็นทองแดงและวัสดุชิ้นงานเป็นอลูมิเนียมเกรด 6061 กำหนดให้เวลาคงที่ 15 นาที ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงคือแรงดันไฟฟ้าลบ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดลอง

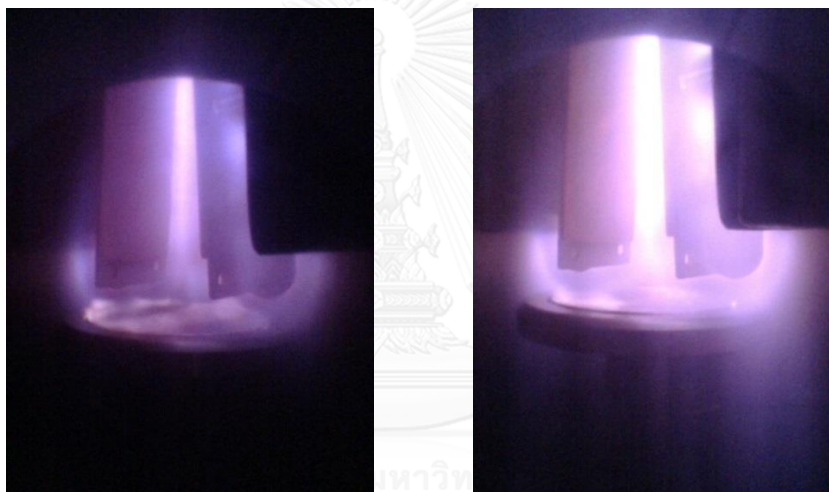
ชิ้นงานที่	วัสดุ	เวลา (นาที)	แรงดันดีซีลบ (V)	ไมโครเวฟ	สนามแม่เหล็ก	การวิเคราะห์ SEM-EDS
1	Al 6061	-	-	-	-	✓
2	Al 6061	15	500	-	-	✓
3	Al 6061	15	800	-	-	✓
4	Al 6061	15	1200	-	-	✓
5	Al6061	15	1400	-	-	✓
6	Al6061	15	500	✓	-	✓
7	Al6061	15	800	✓	-	✓
8	Al6061	15	1200	✓	-	✓
9	Al6061	15	1400	✓	-	✓
10	Al 6061	15	500	✓	✓	✓
11	Al 6061	15	800	✓	✓	✓
12	Al 6061	15	1200	✓	✓	✓
13	Al 6061	15	1400	✓	✓	✓

#### 4.4.1 ทดสอบการเกิดพลาสมาจากแรงดันดีซี

ทดลองที่เงื่อนไขของชิ้นงาน 2-5 โดยคงความดันปฏิบัติการสำหรับการทดลอง  $5 \times 10^{-1}$  Torr ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับวัสดุเป้าโดยยังไม่ใช้ไมโครเวฟ เริ่มเกิดพลาสมาสีม่วงจางๆที่แรงดัน -300 V และที่แรงดัน -500 V บันทึกรูปได้ผลดังรูปที่ 4.3 ตอนที่เริ่มการทดลองแรงดันที่จ่ายให้ -500 V ตกลงมาเป็น -300 V เป็นเพราะมีปริมาณแก๊สอาร์กอนมาก ค่า resistivity ของแก๊สทำให้

แรงดันตกลง และเมื่อปริมาณแก๊สลดลงแรงดันไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นความดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกจแสดงค่าความดันถึง  $9 \times 10^{-1}$  Torr จึงเปิดวาล์วที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศเพื่อลดความดัน แก๊สอาร์กอนก็จะถูกดูดออกไปด้วย ทำให้แรงดันไฟฟ้าค่อยๆเพิ่มขึ้น และต้องคอยกดสวิตช์จ่ายแก๊สอาร์กอนด้วยเมื่อสีม่วงของพลาสมาเริ่มจาง แรงดันไฟฟ้าก็จะตกลงไปใหม่ที่  $-300$  V จนความดันลดลงจนถึง  $5 \times 10^{-1}$  Torr จึงปิดวาล์วปั๊มสุญญากาศ และ ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆจนครบเวลาการทดลอง 15 นาที

หมายเหตุ เนื่องจากไม่มี flow controller ทำให้อัตราการจ่ายแก๊สไม่คงที่และไม่เที่ยงตรง อีกทั้งความเป็นสุญญากาศยังไม่สมบูรณ์ จึงต้องใช้วิธีการดังกล่าว



รูปที่ 4.4 พลาสมาที่แรงดันดีซีลบ 500 V      รูปที่ 4.3 พลาสมาที่แรงดันดีซีลบ 800 V

จากนั้นเปิดฝากระบอกระบายสุญญากาศและเปลี่ยนชิ้นงาน ทำการทดสอบที่ความดันเดิม  $5 \times 10^{-1}$  Torr โดยปรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับวัสดุเป้าหมายเป็น  $-800$  V สังเกตมีความเข้มการเรืองแสงของพลาสมาเพิ่มขึ้น บันทึกรูปได้ผลดังรูปที่ 4.4 เช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มแรงดันเป็น  $-1200$  V และ  $-1400$  V จะมีความเข้มการเรืองแสงของพลาสมามากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

#### 4.4.2 ทดสอบการเกิดพลาสมาจากคลื่นไมโครเวฟ

ทดลองที่เงื่อนไขของชิ้นงาน 6-9 ทำการทดลองที่ความดันปฏิบัติการเดิมคือ  $5 \times 10^{-1}$  Torr เปิดสวิตซ์หลอดแมกนีตรอนซึ่งให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟกำลัง 700 W ส่งผ่านลงมายังกระบอกสุญญากาศส่วนบน พร้อมทั้งจ่ายไฟดีซีลบ ตั้งแต่ -500 V ถึง -1400 V บันทึกภาพพลาสมาที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.5 พลาสมาที่แรงดันลบ 500 V  
และไมโครเวฟ 700 W



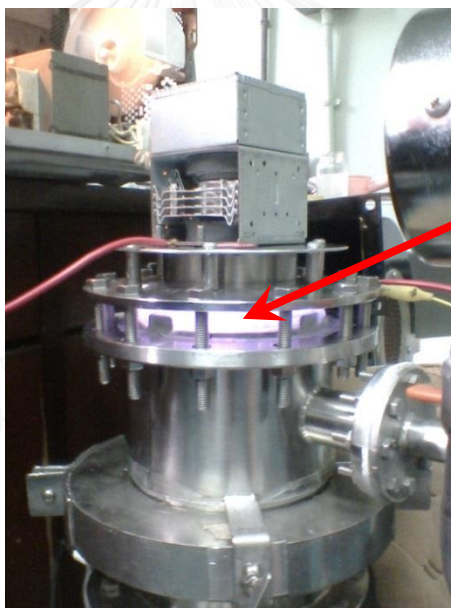
รูปที่ 4.6 พลาสมาที่แรงดันลบ 800 V  
และไมโครเวฟ 700 W



รูปที่ 4.7 พลาสมาที่แรงดันลบ 1200 V และ  
ไมโครเวฟ 700 W

#### 4.4.3 ทดสอบการเกิดพลาสมาจาก ECR

ทดลองที่เงื่อนไขของชิ้นงาน 10-13 ทำการทดลองที่ความดันปฏิบัติการเดิมคือ  $5 \times 10^{-1}$  Torr เปิดสวิตซ์หลอดแมกนีตรอนซึ่งให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟกำลัง 700 W ส่งผ่านทางกระจก Borosilicate เข้ามาในกระบอกเรโซแนนซ์ ซึ่งมีสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ มีการส่งผ่านพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟไปให้แก่อิเล็กตรอน เกิดพลาสมาในส่วนกระบอกเรโซแนนซ์ สังเกตได้จากการเรืองแสงของพลาสมาแม้ยังไม่ได้อัดไฟดีซี ดังรูปที่ 4.8 หลังจากนั้นจ่ายไฟดีซี -500 V ให้แก่ทองแดง ทำการทดลองเป็นเวลา 15 นาที ได้ผลดังรูปที่ 4.9 หลังจากนั้นเปลี่ยนชิ้นงาน และทำการทดลองซ้ำโดยปรับแรงดันดีซีเป็น -800 V และ -1200 V ตามลำดับ บันทึกผลได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 สังเกตได้ถึงความเข้มของการเรืองแสงสว่างมากกว่าพลาสมาที่เกิดจากแรงดันดีซีอย่างเดียว และมีความเข้มมากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าดีซีที่ให้แก่วัสดุเป้า



รูปที่ 4.8 พลาสมาอาร์กอนเมื่อเปิดไมโครเวฟแต่ยังไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้าดีซี



รูปที่ 4.10 พลาสมา ECR ที่แรงดันลบ 500



รูปที่ 4.9 พลาสมา ECR ที่แรงดันลบ 800 V



รูปที่ 4.11 พลาสมา ECR ที่แรงดันลบ 1200 V

สังเกตว่าการเรืองแสงของพลาสมาในระบบไมโครเวฟและ ECR มีความสว่างออกไปทางสีขาว ในขณะที่พลาสมาจากแรงดันดีซีอย่างเดียวมีแสงเรืองเป็นสีม่วง และทั้งสามระบบการเรืองแสงพลาสมามีความเข้มมากขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

#### 4.5 การวิเคราะห์

##### 4.5.1 เทคนิคการวิเคราะห์ SEM-EDS

เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ใช้อิเล็กตรอนในการสร้างสัญญาณภาพ โดยอิเล็กตรอนถูกสร้างจาก Electron gun ผ่านเลนส์เพื่อบีบลำอิเล็กตรอนให้แคบลงและโฟกัสตกลงบน

ชั้นตัวอย่าง มีสแกนคอยล์เพื่อควบคุมการสแกนกวาดลำอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบกับผิวตัวอย่างจะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนหลายรูปแบบ เช่น Secondary electrons, Back scattered electrons, etc. ซึ่งรับสัญญาณได้โดยใช้ detector ที่เหมาะกับชนิดของสัญญาณ สำหรับเครื่อง SEM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบรนด์ JEOL รุ่น JSM-6610LV ใช้พลังงานอิเล็กตรอน 15 keV

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) คือการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาหลังจากยิงลำอิเล็กตรอนไปยังวัสดุ คือการทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมได้รับพลังงานและถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานเพิ่มขึ้นจนหลุดจากอะตอม อิเล็กตรอนในระดับพลังงานอื่นๆจะลดระดับพลังงานเพื่อปรับให้อยู่ในสถานะเสถียร โดยเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป และปลดปล่อยพลังงานเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาซึ่งเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานนั้น โดยธาตุแต่ละธาตุก็จะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของธาตุและชั้นพลังงาน ดังนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาว่า Characteristic X-ray ถ้าอิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไป และอิเล็กตรอนในชั้นถัดไปคือชั้น L เข้ามาแทนที่ พลังงาน X-ray ที่ปลดปล่อยออกมาเรียกว่า  $K_{\alpha}$  แต่ถ้าอิเล็กตรอนในชั้น M เข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนในชั้น K ที่หลุดออกไป พลังงาน X-ray ที่ปลดปล่อยออกมาเรียกว่า  $K_{\beta}$

เช่นเดียวกันถ้าอิเล็กตรอนในชั้น L หลุดออกไป และอิเล็กตรอนในชั้นถัดไปคือชั้น M เข้ามาแทนที่ พลังงาน X-ray ที่ปลดปล่อยออกมาเรียกว่า  $L_{\alpha}$  แต่ถ้าอิเล็กตรอนในชั้น N เข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนในชั้น L ที่หลุดออกไป พลังงาน X-ray ที่ปลดปล่อยออกมาเรียกว่า  $L_{\beta}$

ซึ่งมีหลักการคล้ายกับ XRF แต่ต่างกันที่แหล่งกำเนิดพลังงานที่ยิงเข้าไป EDS ใช้อิเล็กตรอน แต่ XRF ใช้โฟตอนหรือรังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่า ลำอิเล็กตรอนที่วิเคราะห์เป็นจุดเล็กๆ ซึ่งเครื่องวัด EDS จะต้องติดตั้งเข้ากับ SEM สำหรับเครื่องที่ใช้วัด EDS ในงานวิจัยนี้เป็นแบรนด์ Oxford Instrument รุ่น X-MAX<sup>N</sup> พลังงานอิเล็กตรอน 15 keV เวลาวัด 50 วินาที

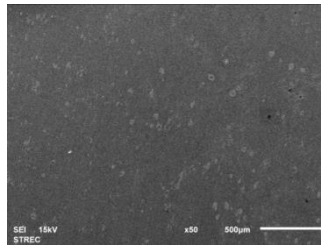
#### 4.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface Morphology)

หลังทดลองเสร็จ ไม่สามารถสังเกตเห็นสีทองแดงบนชิ้นงานได้ด้วยตาเปล่า ยกเว้นที่แรงดันไฟฟ้า -1400 V สังเกตเห็นเป็นฟิล์มสีทองแดงเคลือบอยู่ และเมื่อนำเอาตัวอย่างชิ้นงานที่

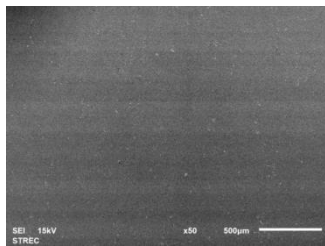
ทดลองแล้วมาส่องดูสภาพพื้นผิวของชิ้นงาน 13 ชิ้นด้วย SEM ในโหมด secondary electron ใช้กำลังขยาย 50X, 500X และ 1000X ต่อหนึ่งชิ้นงาน จากการส่องดูชิ้นงานหลายๆจุด ได้บันทึกรูปจุดที่น่าสนใจเป็นดังรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 (รอยขีดเป็นเส้นเกิดจากการขีดผิวไม่ได้เกิดจากการเคลือบ และ รอยวงดำๆตรงกลางของภาพกำลังขยาย 50x เกิดขึ้นจากการปรับความมืดสว่างของแสงกล้องจุลทรรศน์ ไม่ได้เป็นร่องรอยบนชิ้นงาน) สังเกตที่แรงดันไฟฟ้า -500 V เห็นร่องรอยขรุขระที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกับชิ้นงานเป็นกลุ่มก้อนและเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเป็น -800 V และที่แรงดันไฟฟ้า -1200 V และ -1400 V เมื่อพิจารณาร่วมกับ EDS พบทองแดงกระจายตัวครอบคลุมตลอดทั้งชิ้นงานเป็นลักษณะฟิล์มบาง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่มีการเพิ่มคลื่นไมโครเวฟ สังเกตว่ามีปริมาณร่องรอยที่เป็นรอยยุบรอยนูนเพิ่มมากขึ้น เกะกันเป็นกลุ่มก้อนมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีการกระจายตัวของร่องรอยหนาแน่นเพิ่มขึ้น และที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากันเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปเป็นระบบ ECR สังเกตเห็นร่องรอยขรุขระ ความหนาแน่นของกลุ่มก้อนมากกว่าระบบดีซี และไมโครเวฟที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน แต่ที่แรงดันไฟฟ้า -1200 V ขึ้นไป เมื่อพิจารณาร่วมกับ EDS พบว่ามีการก่อตัวเป็นแบบฟิล์ม



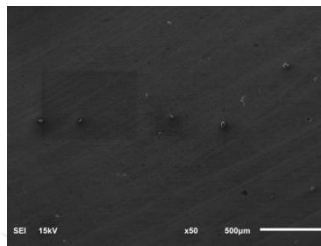
#### 4.5.2.1 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X



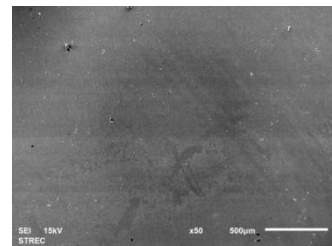
(ก).ชิ้นงานเปล่า



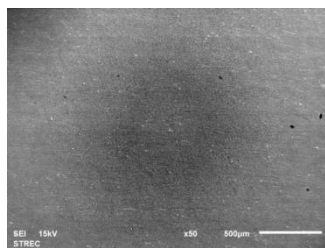
(ข).แรงดันไฟฟ้า -500 V



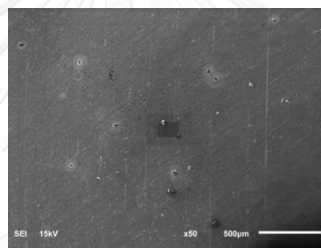
(ค).ไมโครเวฟ, -500 V



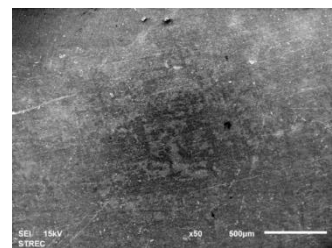
(ง).แรงดันไฟฟ้า -500 V, ECR



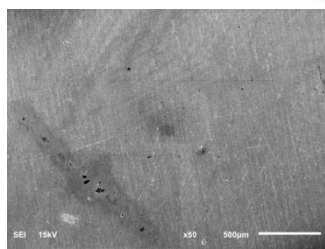
(จ).แรงดันไฟฟ้า -800 V



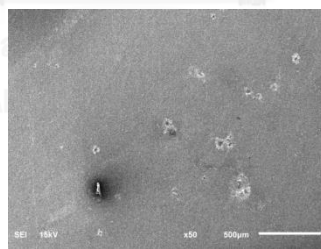
(ฉ).ไมโครเวฟ, -800 V



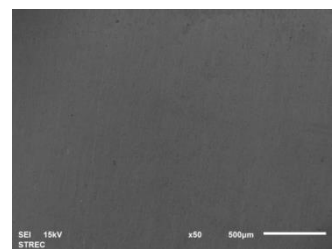
(ช).แรงดันไฟฟ้า -800 V, ECR



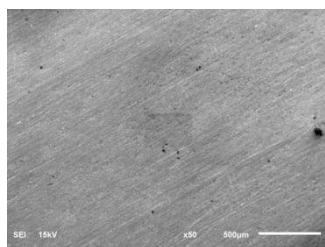
(ซ).แรงดันไฟฟ้า -1200 V



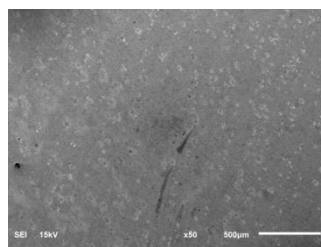
(ฅ).ไมโครเวฟและ -1200 V



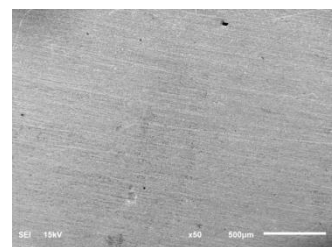
(ญ).แรงดันไฟฟ้า -1200 V, ECR



(ฎ).แรงดันไฟฟ้า -1400 V



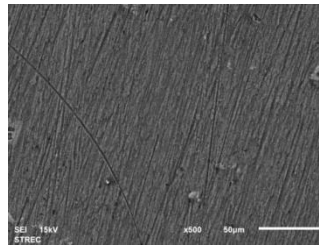
(ฏ).ไมโครเวฟและ -1400 V



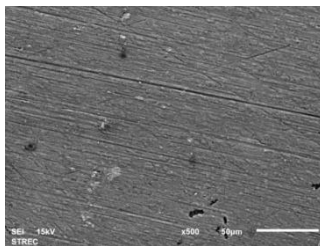
(ฐ).แรงดันไฟฟ้า -1400 V, ECR

รูปที่ 4.12 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X

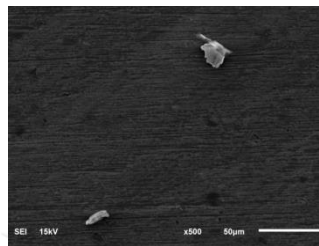
#### 4.5.2.2 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500X



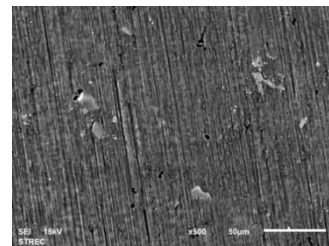
(ก).ชิ้นงานเปล่า



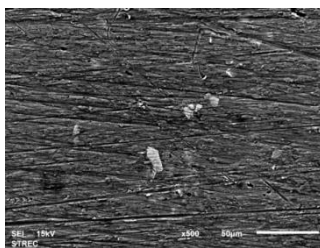
(ข).แรงดันไฟฟ้า -500 V



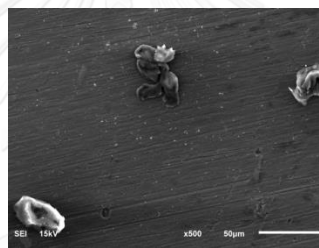
(ค).ไมโครเวฟและ -500 V



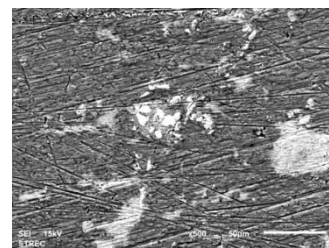
(ง).แรงดันไฟฟ้า -500 V, ECR



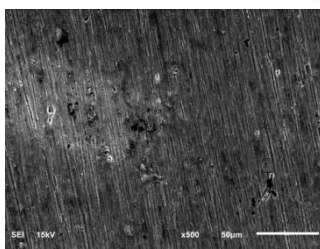
(จ).แรงดันไฟฟ้า -800 V



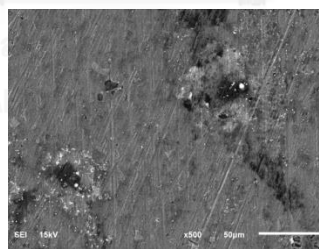
(ฉ).ไมโครเวฟและ -800 V



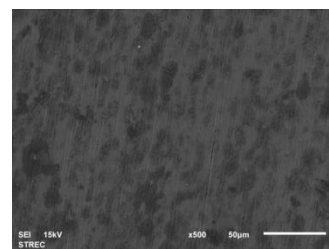
(ช).แรงดันไฟฟ้า -800 V, ECR



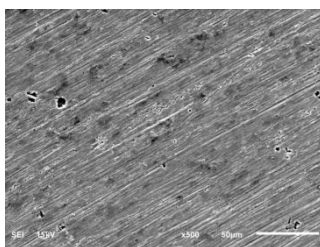
(ซ).แรงดันไฟฟ้า -1200 V



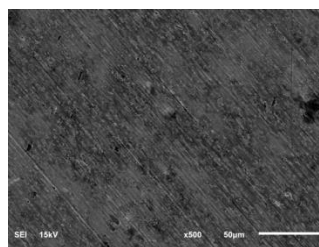
(ฅ).ไมโครเวฟและ -1200 V



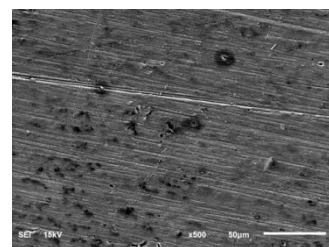
(ญ).แรงดันไฟฟ้า -1200 V, ECR



(ฎ).แรงดันไฟฟ้า -1400 V



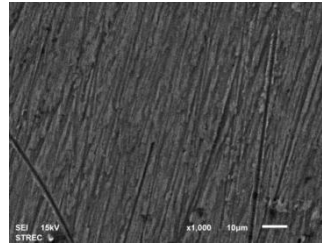
(ฏ).ไมโครเวฟและ -1400 V



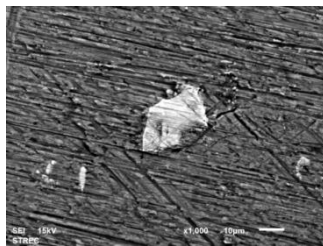
(ฐ).แรงดันไฟฟ้า -1400 V, ECR

รูปที่ 4.13 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500X

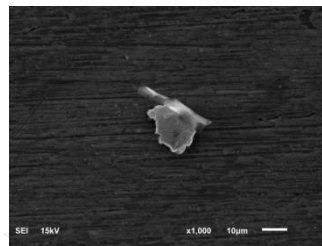
### 4.5.2.3 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 1000X



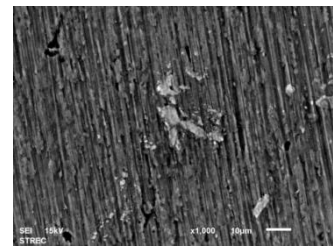
(ก).ชิ้นงานเปล่า



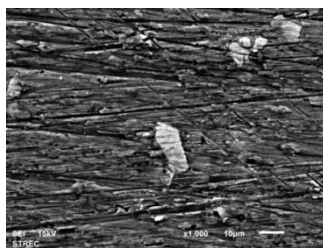
(ข).แรงดันไฟฟ้า -500 V



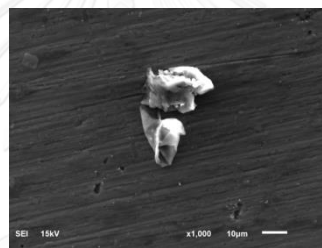
(ค).ไมโครเวฟและ -500 V



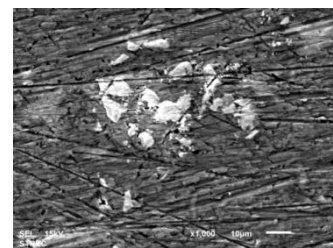
(ง).แรงดันไฟฟ้า -500 V, ECR



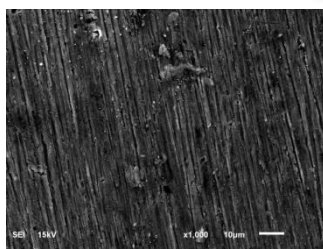
(จ).แรงดันไฟฟ้า -800 V



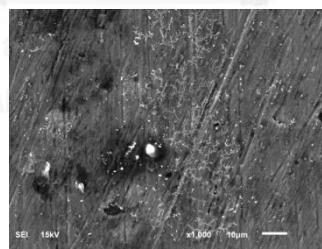
(ฉ).ไมโครเวฟและ -800 V



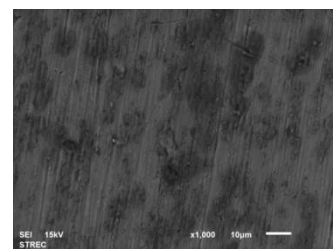
(ช).แรงดันไฟฟ้า -800 V, ECR



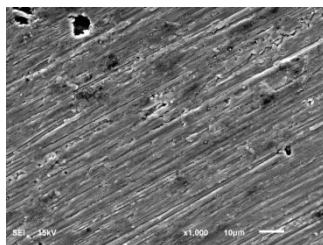
(ซ).แรงดันไฟฟ้า -1200 V



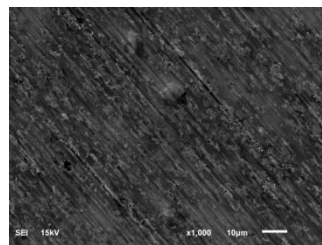
(ฅ).ไมโครเวฟและ -1200 V



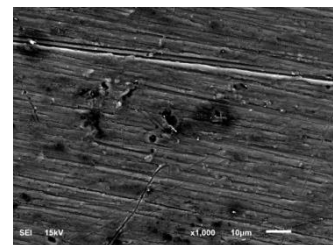
(ญ).แรงดันไฟฟ้า -1200 V, ECR



(ฎ).แรงดันไฟฟ้า -1400 V



(ฏ).ไมโครเวฟและ -1400 V



(ฐ).แรงดันไฟฟ้า -1400 V, ECR

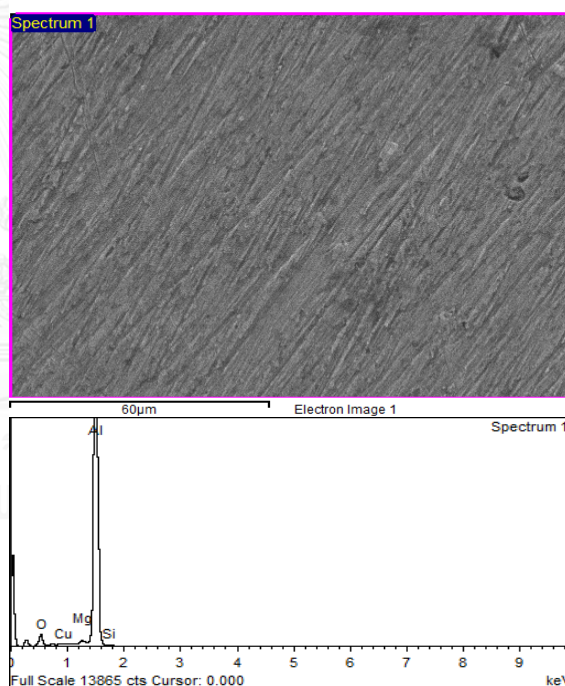
รูปที่ 4.14 สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังขยาย 1000X

#### 4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Composition analysis)

เทคนิค EDS เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้ลำอิเล็กตรอนวัดวิเคราะห์เป็นจุดเล็กๆ ทั้งนี้ค่าที่วัดได้จาก EDS ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนด้วย เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลและประจุไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำกระตุ้นกับอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง ยิ่งพลังงานอิเล็กตรอนสูงก็สามารถเจาะลึกเข้าไปในพื้นผิวไปกระตุ้นกับอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียงเป็นวงกว้าง ทำให้เปอร์เซ็นต์ทองแดงบนพื้นผิวเทียบกับพื้นที่ที่ถูกกระตุ้นทั้งหมดมีค่าน้อย

##### 4.5.3.1 ตัวอย่าง Al6061 ชิ้นงานเปล่า

Element	Weight%	Atomic%
O K	8.20	13.11
Mg K	0.79	0.83
Al K	89.91	85.27
Si K	0.68	0.62
Cu L	0.43	0.17
Totals	100.00	

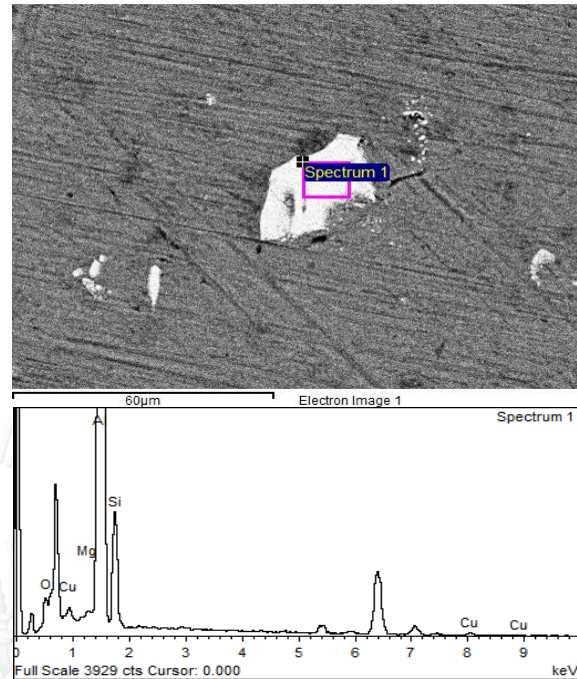


รูปที่ 4.15 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่ยังไม่ได้ทดสอบ

ทั้งนี้ในใบรับรองจากผู้ผลิต Al6061 ชิ้นงานเปล่ามีเปอร์เซ็นต์โดยมวลของทองแดง 0.27% แต่ที่วัดได้จาก EDS เป็น 0.43%

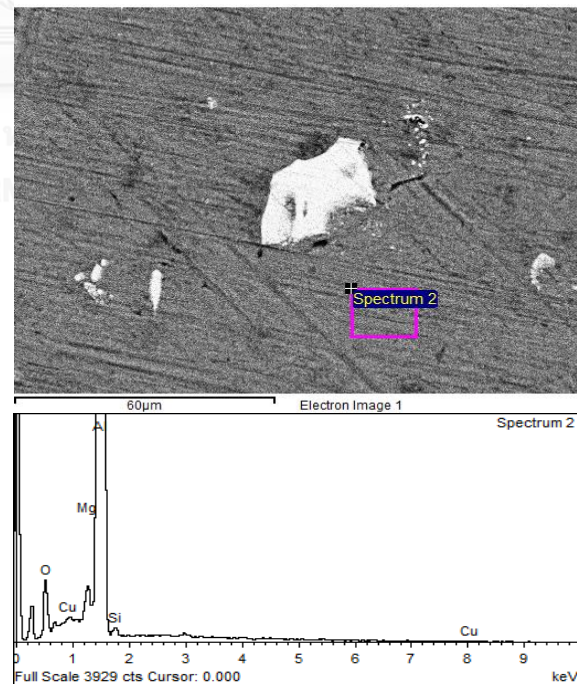
4.5.3.2 ตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยแรงดันดีซีลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	5.19	8.55
Mg K	0.20	0.21
Al K	80.39	78.57
Si K	12.90	12.11
Cu L	1.33	0.55
Totals	100.00	



(ก).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -500 V

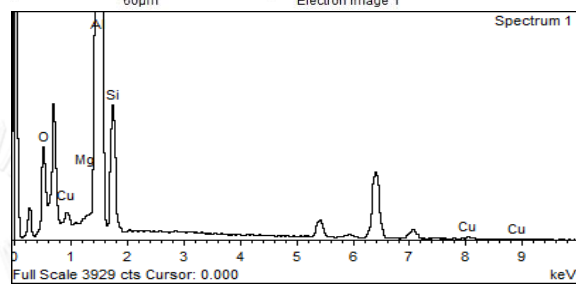
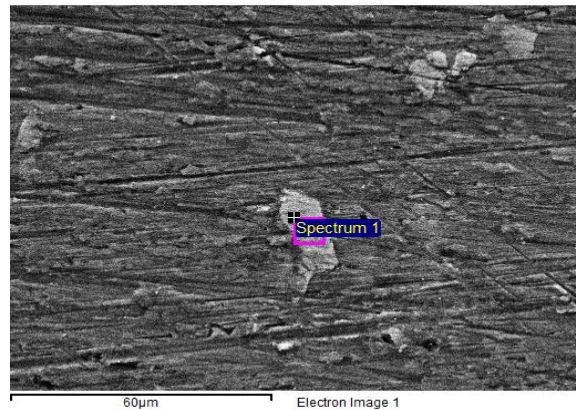
Element	Weight%	Atomic%
O K	7.39	11.88
Mg K	0.84	0.89
Al K	90.76	86.49
Si K	0.66	0.61
Cu L	0.34	0.14
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -500 V

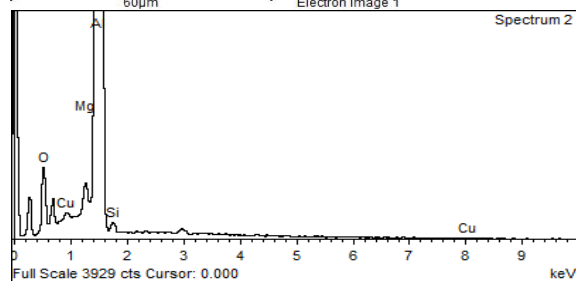
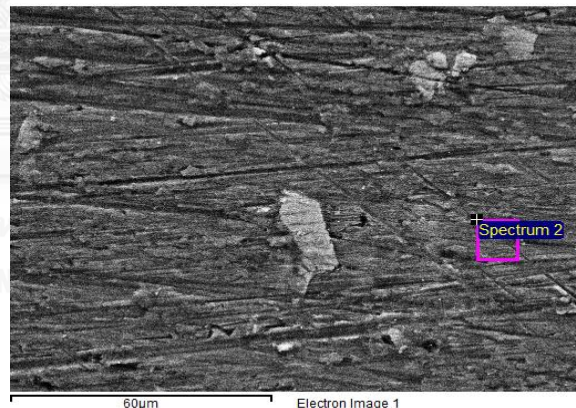


Element	Weight%	Atomic%
O K	14.81	22.96
Mg K	0.19	0.19
Al K	71.41	65.66
Si K	11.94	10.54
Cu L	1.66	0.65
Totals	100.00	



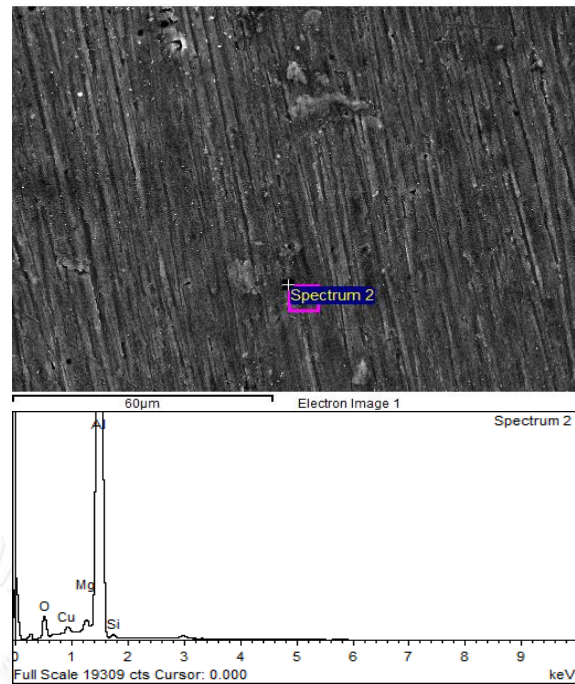
(ค).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง A16061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	8.33	13.32
Mg K	0.76	0.80
Al K	89.61	84.97
Si K	0.75	0.68
Cu L	0.55	0.22
Totals	100.00	



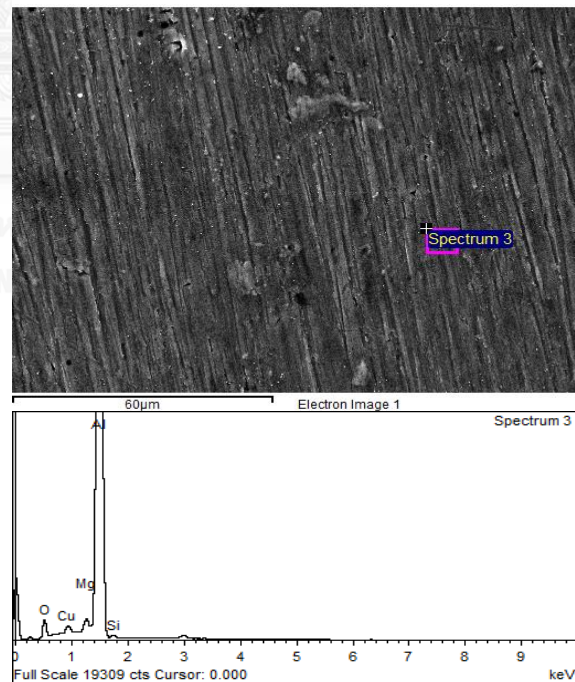
(ง).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง A16061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	7.27	11.75
Mg K	0.71	0.75
Al K	90.21	86.46
Si K	0.59	0.54
Cu L	1.22	0.50
Totals	100.00	



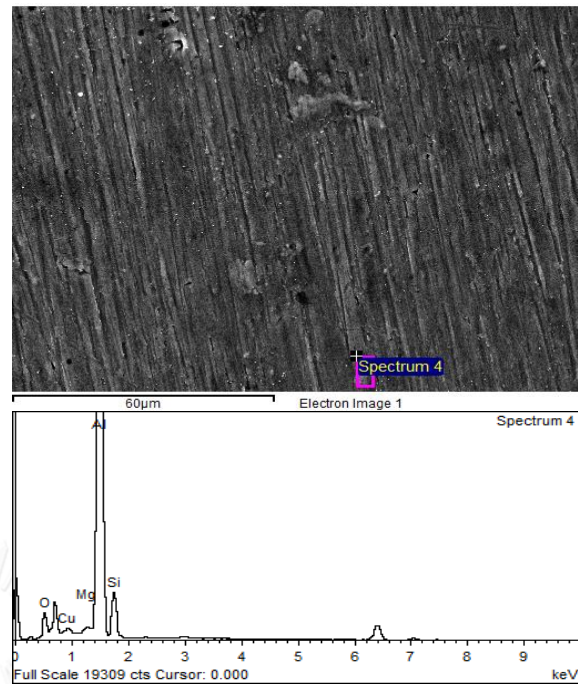
(จ).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง A16061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1200 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	5.64	9.21
Mg K	0.79	0.84
Al K	91.83	88.94
Si K	0.55	0.51
Cu L	1.20	0.49
Totals	100.00	



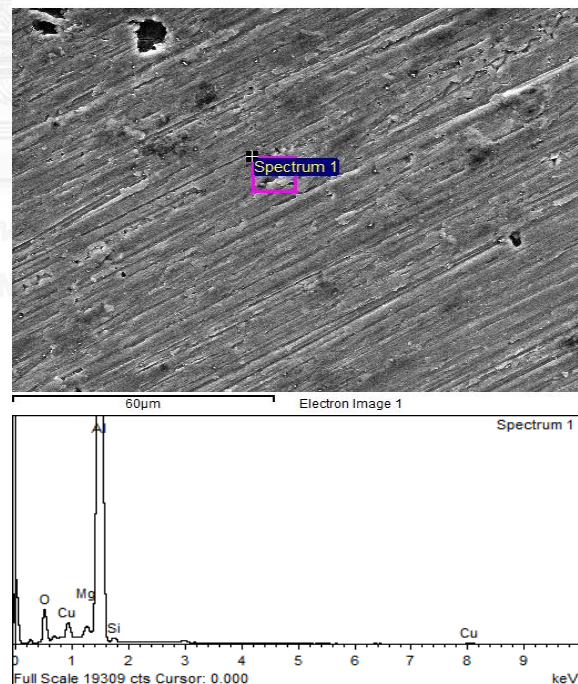
(ฉ).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง A16061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1200 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	9.56	15.26
Mg K	0.42	0.44
Al K	79.65	75.42
Si K	9.27	8.43
Cu L	1.11	0.44
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1200 V

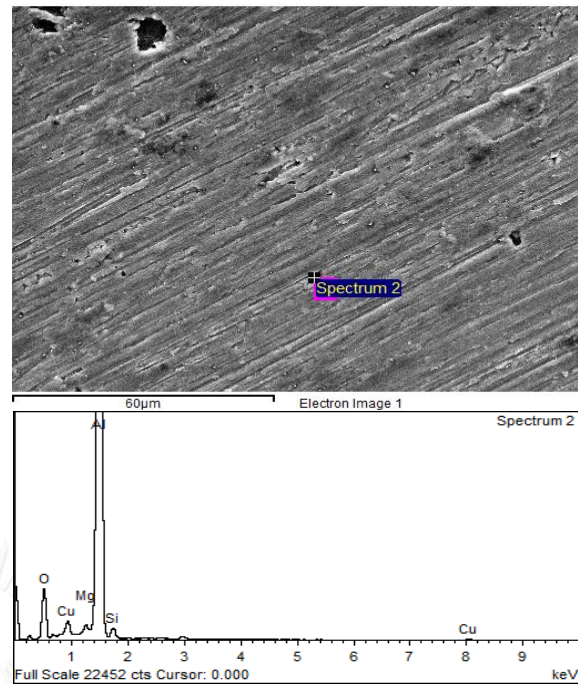
Element	Weight%	Atomic%
O K	10.54	16.85
Mg K	0.73	0.76
Al K	84.77	80.36
Si K	0.85	0.77
Cu L	3.11	1.25
Totals	100.00	



(ค).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1400 V

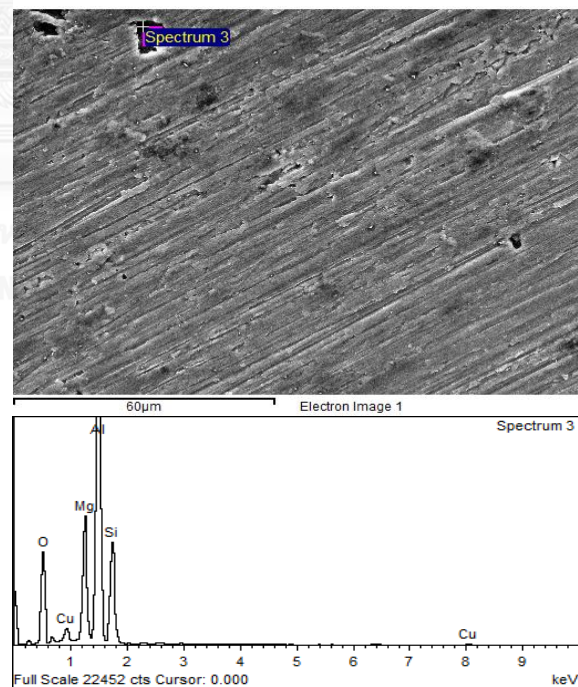


Element	Weight%	Atomic%
O K	16.41	25.28
Mg K	0.66	0.67
Al K	77.81	71.09
Si K	1.98	1.74
Cu L	3.15	1.22
Totals	100.00	



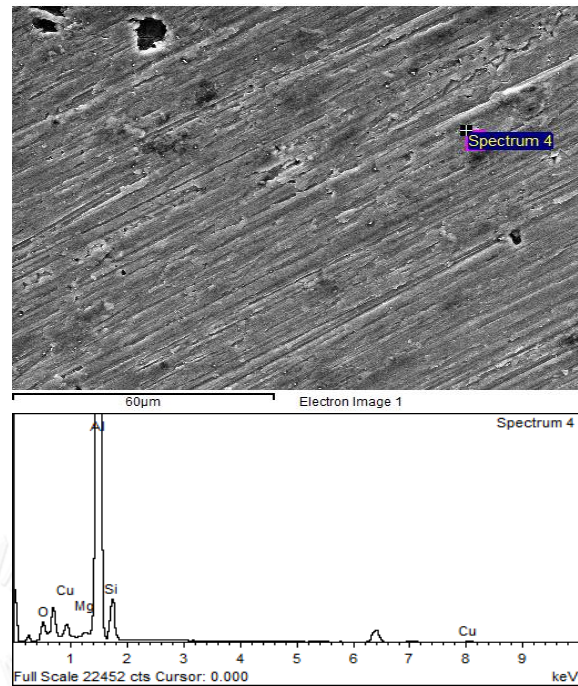
(ฉ).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	27.37	39.28
Mg K	11.93	11.26
Al K	41.08	34.96
Si K	16.24	13.28
Cu L	3.39	1.23
Totals	100.00	



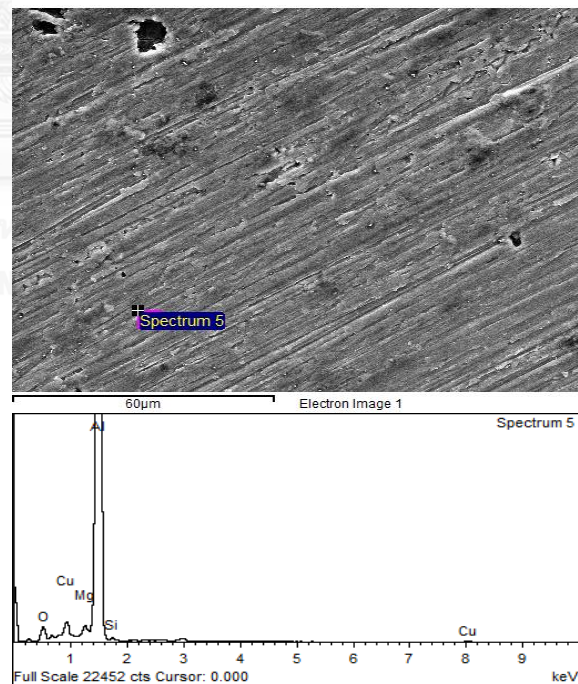
(ญ).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	8.45	13.81
Mg K	0.39	0.42
Al K	76.93	74.56
Si K	10.32	9.61
Cu L	3.91	1.61
Totals	100.00	



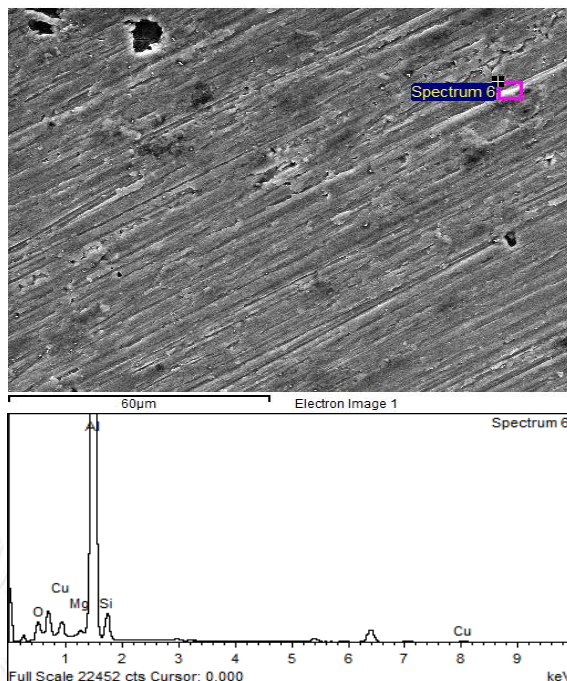
(ก).SEM-EDS จุดที่4 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	5.14	8.52
Mg K	0.77	0.85
Al K	90.30	88.81
Si K	0.46	0.43
Cu L	3.33	1.39
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่5 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	7.89	12.93
Mg K	0.46	0.49
Al K	80.84	78.58
Si K	6.78	6.33
Cu L	4.03	1.66
Totals	100.00	



(จ).SEM-EDS จุดที่6 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยแรงดันไฟฟ้า -1400 V

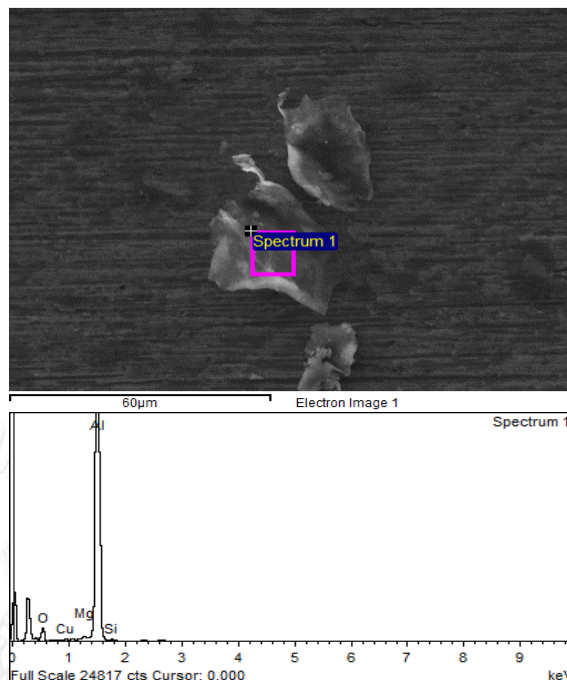
รูปที่ 4.16 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ซิลบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V

เมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานที่ 2, 3 ด้วย EDS ในกล้องจุลทรรศน์ SEM สามารถมองเห็น particle กระจายตัวอยู่บนพื้นผิว ซึ่งวิเคราะห์แล้วน่าจะเป็นอนุภาคของทองแดงที่รวมตัวกันบนผิวของ อลูมิเนียม เนื่องจากสามารถวัดสเปกตรัม Cu-L ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณข้างเคียงที่ไม่ใช่ อนุภาคทองแดงแล้ววัดเปอร์เซ็นต์ Cu-L แทบไม่ต่างจากชิ้นงานเปล่า (ดังเช่นรูปที่ 4.16 (ก) และ (ค). พบสเปกตรัม Cu-L กับรูปที่ 4.16 (จ) และ (ง). ไม่พบสเปกตรัม Cu-L) และที่แรงดันไฟฟ้า -1200 V, -1400 V พบสเปกตรัมทองแดงทุกจุด แสดงว่ามีการกระจายตัวของทองแดงทั่วพื้นผิวเป็น ลักษณะฟิล์ม ไม่ใช่กลุ่มเกรนดังเช่นกรณี -500 V, -800 V

อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์ด้วย EDS ไม่สามารถวัดพีคหลักของทองแดงที่ 8.047 keV ได้ ซึ่ง อาจเกิดจากพลังงานของอิเล็กตรอนและระบบการวัด แต่เมื่อนำชิ้นงานเดียวกันไปวิเคราะห์ด้วย XRF พบสเปกตรัม Cu-K ทำให้น่าสนใจได้ว่าพีคทองแดง Cu-L ที่ 0.93 keV มาจากทองแดง เช่นเดียวกัน

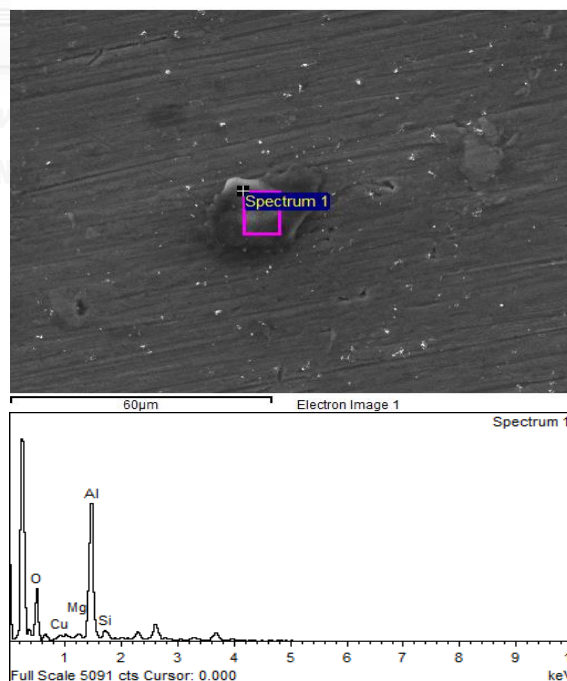
4.5.4.3 ตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันดีซีล 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	14.95	22.90
Mg K	0.72	0.73
Al K	83.01	75.40
Si K	0.97	0.84
Cu L	0.35	0.13
Totals	100.00	



(ก).SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -500 V

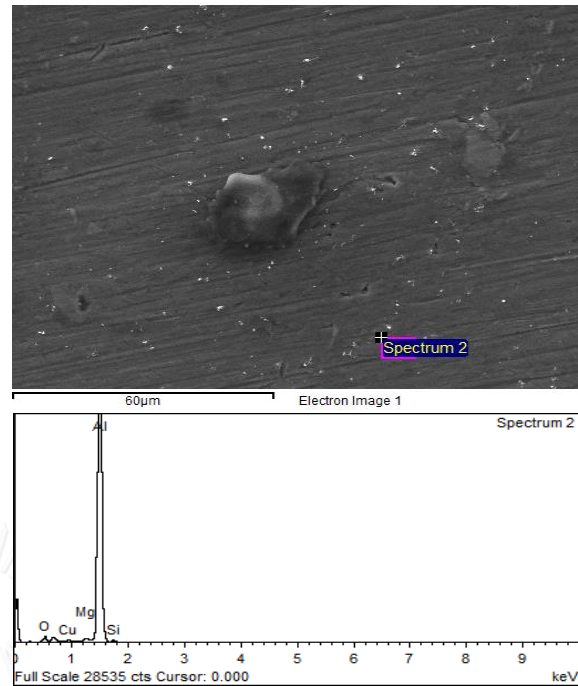
Element	Weight%	Atomic%
O K	45.52	59.09
Mg K	1.20	1.02
Al K	46.65	35.90
Si K	4.40	3.26
Cu L	2.23	0.73
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -800 V

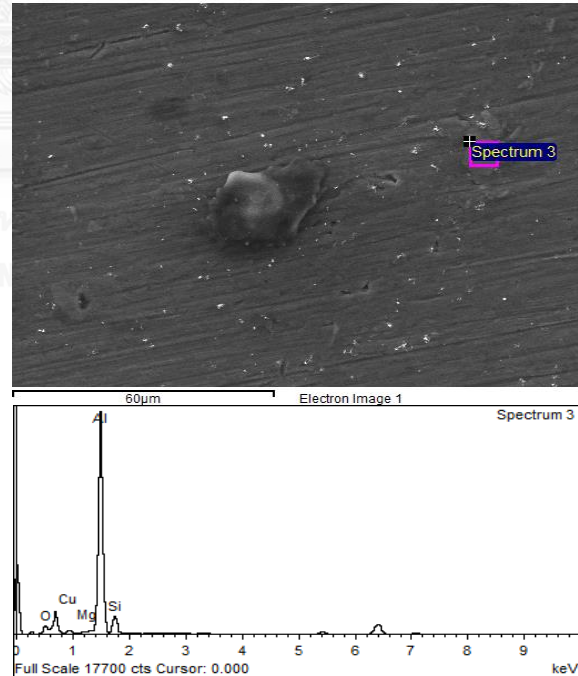


Element	Weight%	Atomic%
O K	8.74	13.99
Mg K	0.70	0.74
Al K	87.89	83.39
Si K	1.60	1.46
Cu L	1.06	0.43
Totals	100.00	



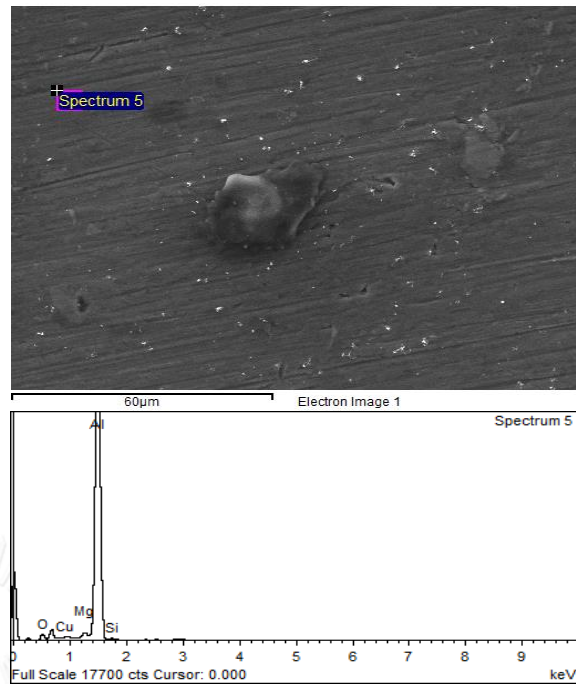
(ค).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	10.42	16.66
Mg K	0.15	0.15
Al K	75.19	71.31
Si K	12.08	11.00
Cu L	2.17	0.87
Totals	100.00	



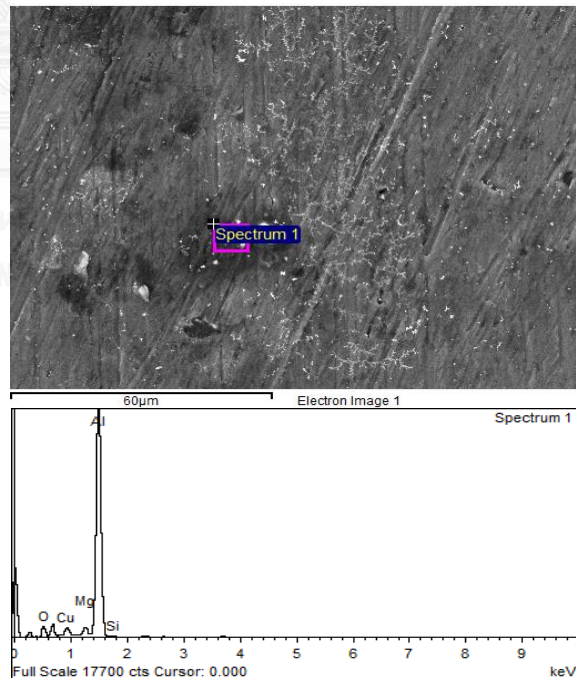
(ง).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	6.15	9.97
Mg K	0.77	0.83
Al K	91.84	88.34
Si K	0.68	0.63
Cu L	0.56	0.23
Totals	100.00	



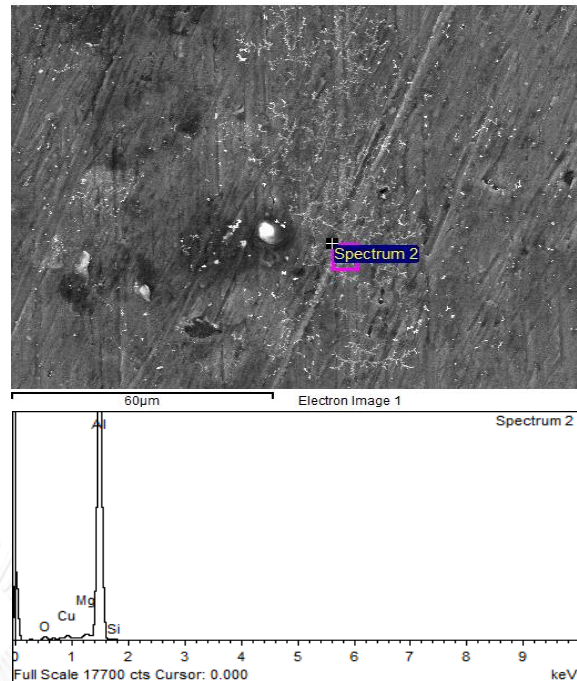
(จ).SEM-EDS จุดที่4 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	12.19	19.46
Mg K	2.10	2.20
Al K	79.87	75.60
Si K	0.77	0.70
Cu L	5.07	2.04
Totals	100.00	



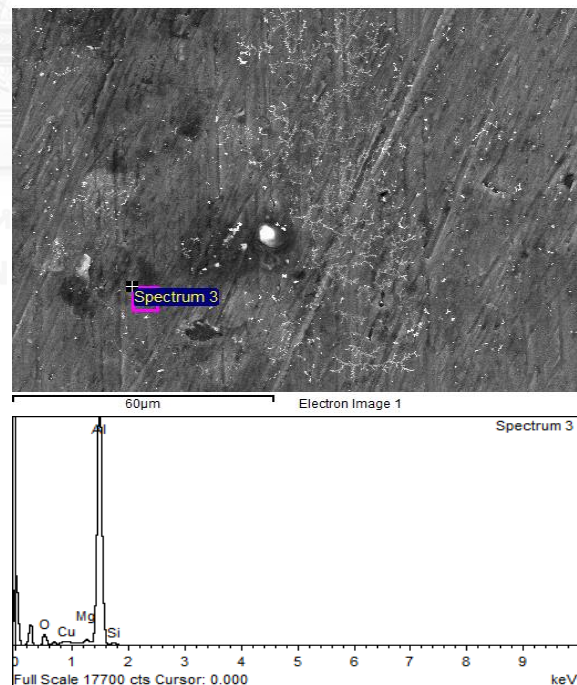
(ฉ).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1200 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	3.45	5.73
Mg K	0.77	0.84
Al K	93.80	92.32
Si K	0.54	0.51
Cu L	1.44	0.60
Totals	100.00	



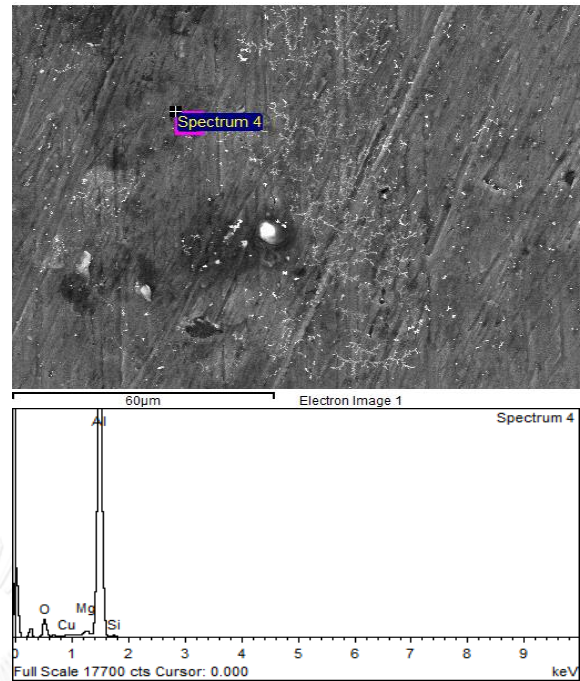
(ข).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1200 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	11.92	18.61
Mg K	0.74	0.76
Al K	85.77	79.37
Si K	1.31	1.17
Cu L	0.25	0.10
Totals	100.00	



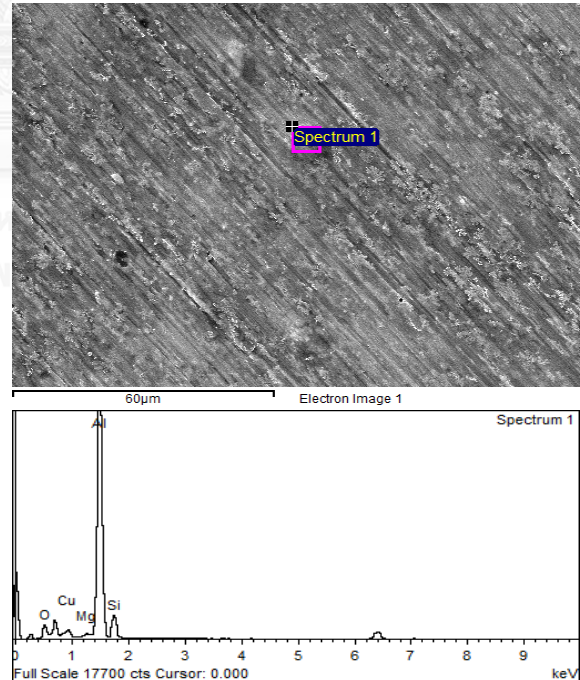
(ค).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1200 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	15.42	23.58
Mg K	0.73	0.74
Al K	82.50	74.77
Si K	0.82	0.71
Cu L	0.52	0.20
Totals	100.00	



(ฉ).SEM-EDS จุดที่4 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1200 V

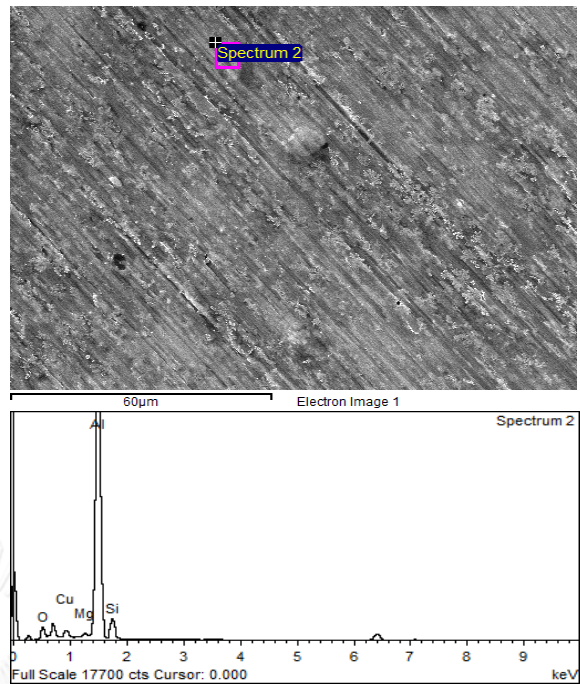
Element	Weight%	Atomic%
O K	12.04	19.15
Mg K	0.47	0.49
Al K	73.62	69.41
Si K	10.69	9.68
Cu L	3.18	1.27
Totals	100.00	



(ญ).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1400 V

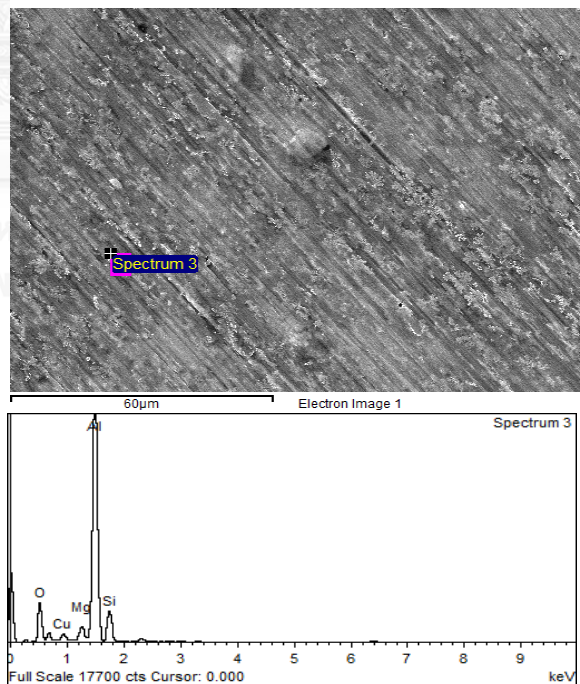


Element	Weight%	Atomic%
O K	8.95	14.53
Mg K	0.54	0.57
Al K	78.58	75.66
Si K	8.42	7.79
Cu L	3.52	1.44
Totals	100.00	



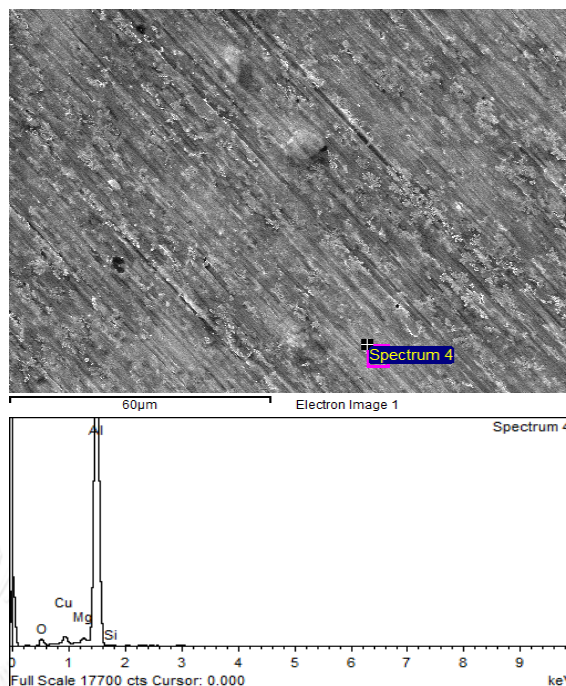
(ก).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง A16061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	24.06	35.44
Mg K	2.27	2.20
Al K	60.06	52.46
Si K	10.36	8.69
Cu L	3.25	1.21
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง A16061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	4.91	8.15
Mg K	0.79	0.86
Al K	90.79	89.35
Si K	0.34	0.32
Cu L	3.17	1.33
Totals	100.00	



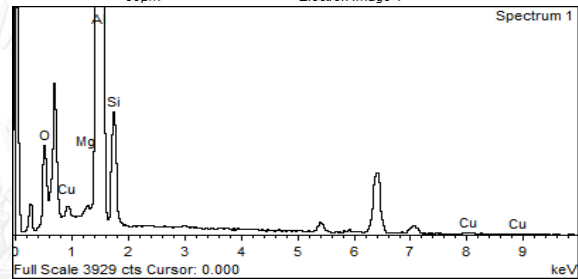
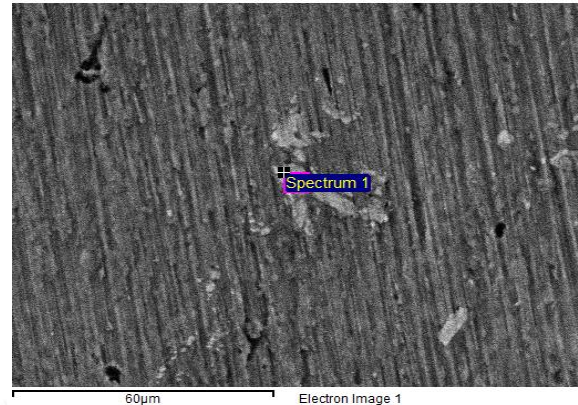
(จ).SEM-EDS จุดที่4 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1400 V รูปที่ 4.17 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้าที่สลับ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V

ผลการวัดชิ้นงานที่ 6 เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -500 V สังเกตเห็นเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคแต่เมื่อวัดด้วย EDS พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ทองแดงไม่ต่างจากพื้นผิวที่เป็นชิ้นงานเปล่า แสดงว่าไม่ใช่อนุภาคของทองแดงจากการสเปคโตร คาคการณ์ได้ว่าชิ้นงานที่ 5 ไม่มีอนุภาคทองแดงเคลือบอยู่เลย

ในขณะที่ชิ้นงานที่ 7, 8 เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -800 V, -1200 V มีลักษณะเป็นกลุ่มเกรนกระจายตัวอยู่เนื่องจากวัด EDS หลายๆพื้นที่พบว่าสามารถวัดสเปคตรัม Cu-L ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณข้างเคียงที่ไม่ใช่อนุภาคทองแดงแล้ววัดเปอร์เซ็นต์ Cu-L แทบไม่ต่างจากชิ้นงานเปล่า ส่วนชิ้นงานที่ 9 เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1400 V มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื่องจากวัด EDS หลายๆพื้นที่พบว่าสามารถวัดสเปคตรัม Cu-L ได้ทุกพื้นที่

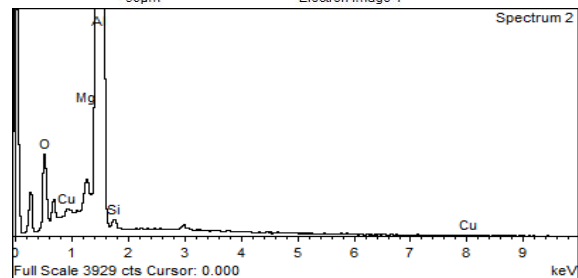
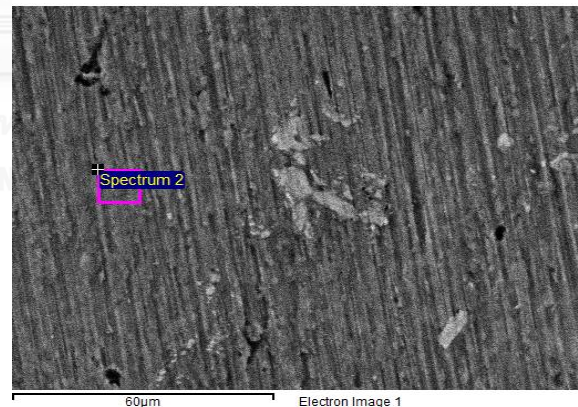
4.5.4.4 ตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR และแรงดันดีซีลิบ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	12.95	20.27
Mg K	0.30	0.31
Al K	75.64	70.23
Si K	9.67	8.63
Cu L	1.44	0.57
Totals	100.00	



(ก).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -500V

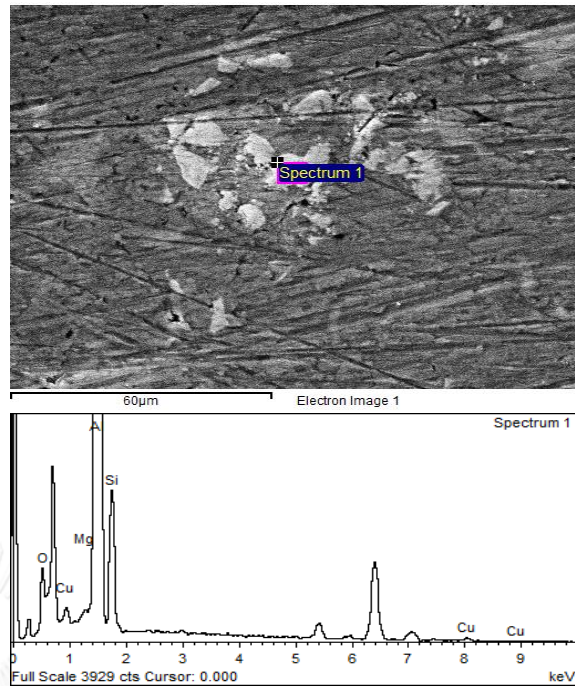
Element	Weight%	Atomic%
O K	8.96	14.25
Mg K	0.69	0.72
Al K	89.35	84.31
Si K	0.62	0.56
Cu L	0.39	0.16
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -500 V

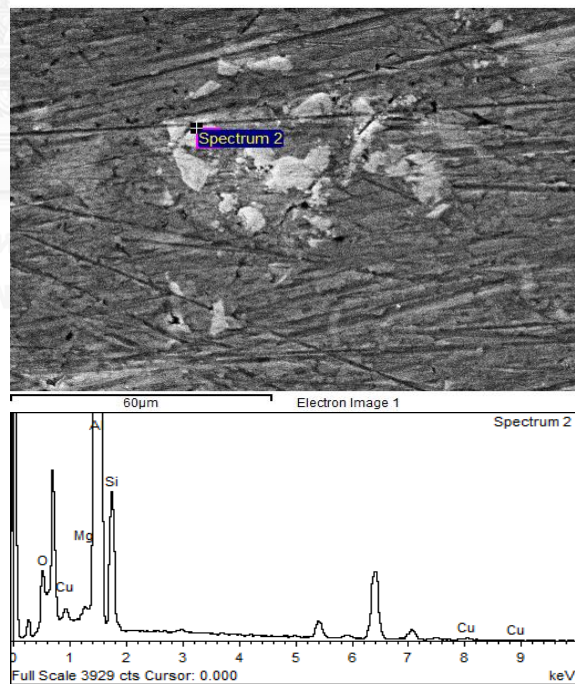


Element	Weight%	Atomic%
O K	8.67	13.97
Mg K	0.17	0.18
Al K	78.12	74.64
Si K	11.55	10.60
Cu L	1.49	0.60
Totals	100.00	



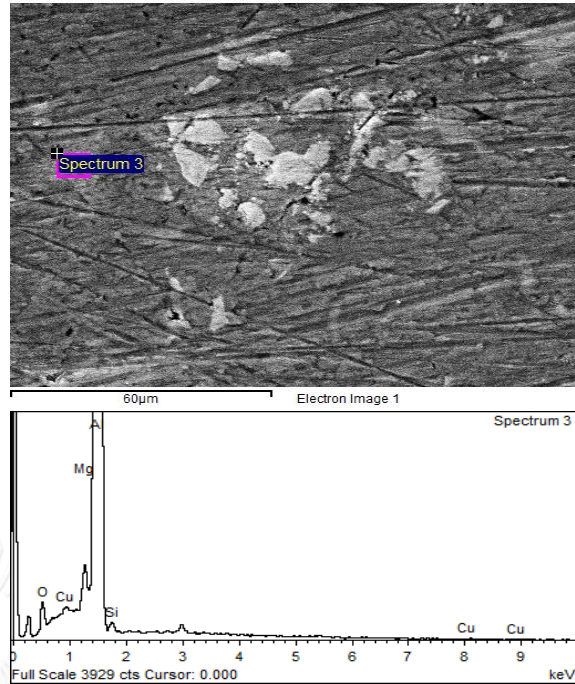
(ค).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	7.84	12.68
Mg K	0.25	0.26
Al K	79.66	76.37
Si K	11.10	10.23
Cu L	1.15	0.47
Totals	100.00	



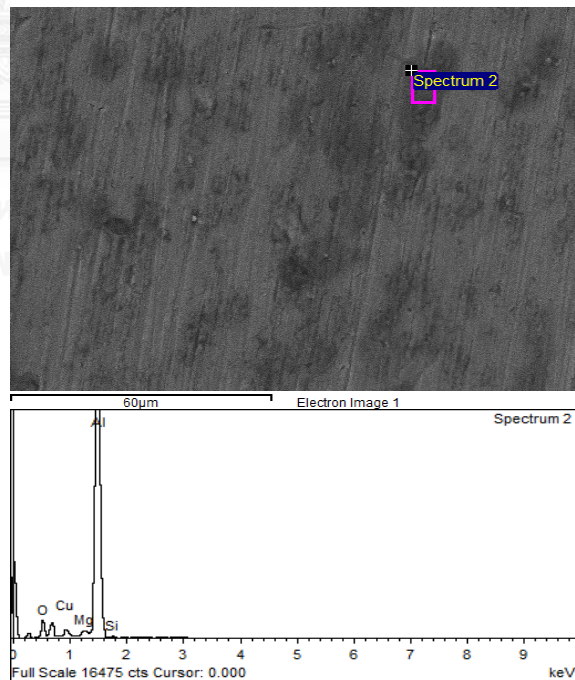
(ง).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	3.03	5.01
Mg K	0.84	0.91
Al K	95.32	93.48
Si K	0.49	0.46
Cu L	0.32	0.13
Totals	100.00	



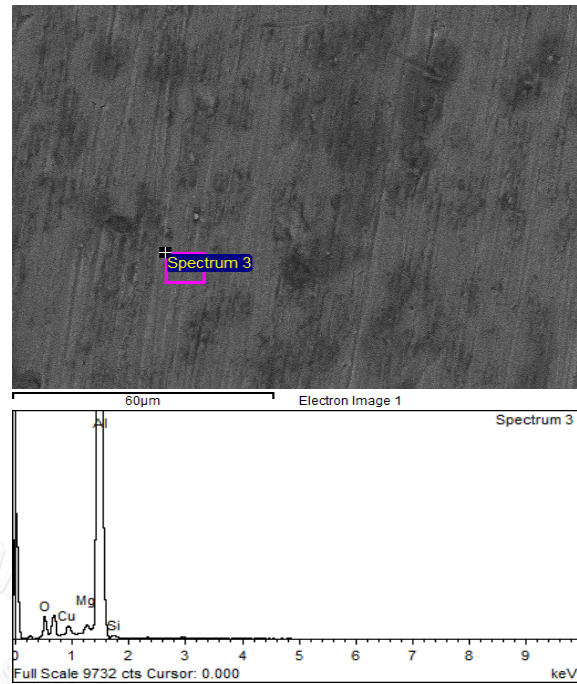
(จ).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -800 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	13.73	21.49
Mg K	0.63	0.65
Al K	82.15	76.22
Si K	0.55	0.49
Cu L	2.95	1.16
Totals	100.00	



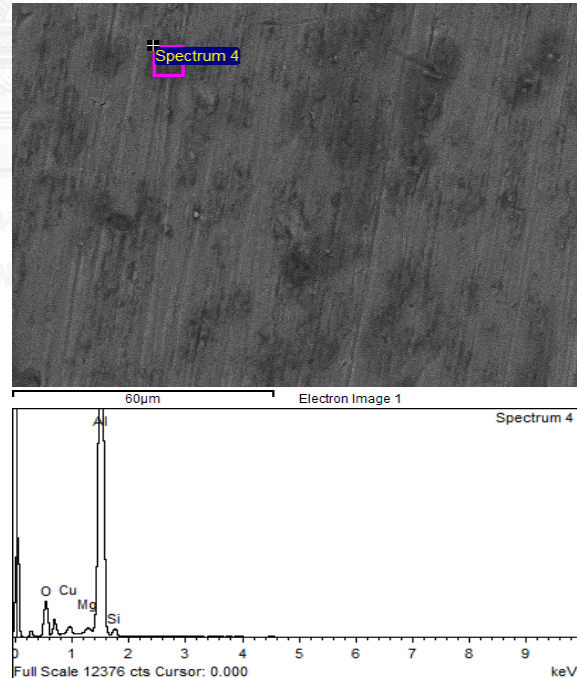
(ฉ).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1200V

Element	Weight%	Atomic%
O K	9.94	15.88
Mg K	0.72	0.76
Al K	86.49	81.94
Si K	0.55	0.50
Cu L	2.31	0.93
Totals	100.00	



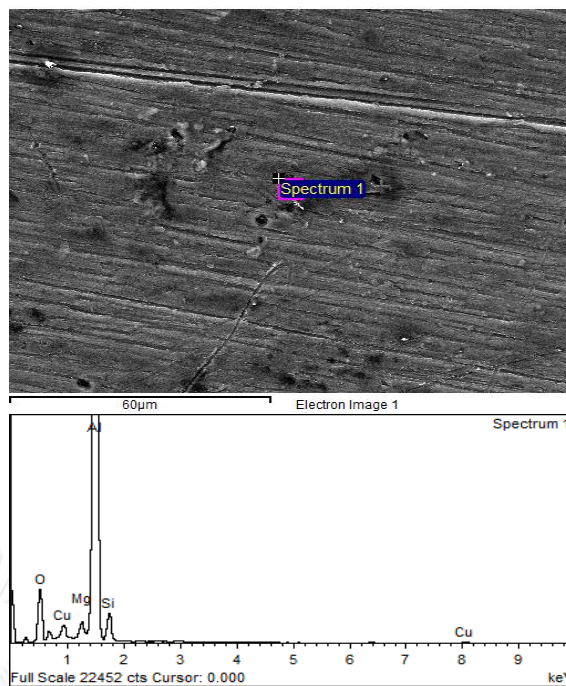
(ข).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1200V

Element	Weight%	Atomic%
O K	17.85	27.23
Mg K	0.66	0.66
Al K	76.43	69.12
Si K	2.15	1.87
Cu L	2.91	1.12
Totals	100.00	



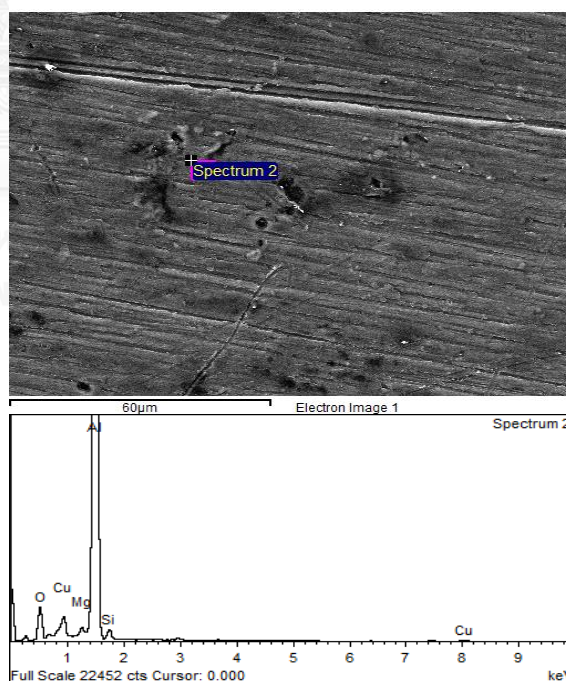
(ค).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1200 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	17.95	27.45
Mg K	1.42	1.43
Al K	71.71	65.03
Si K	5.47	4.77
Cu L	3.45	1.33
Totals	100.00	



(ฉ).SEM-EDS จุดที่1 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1400 V

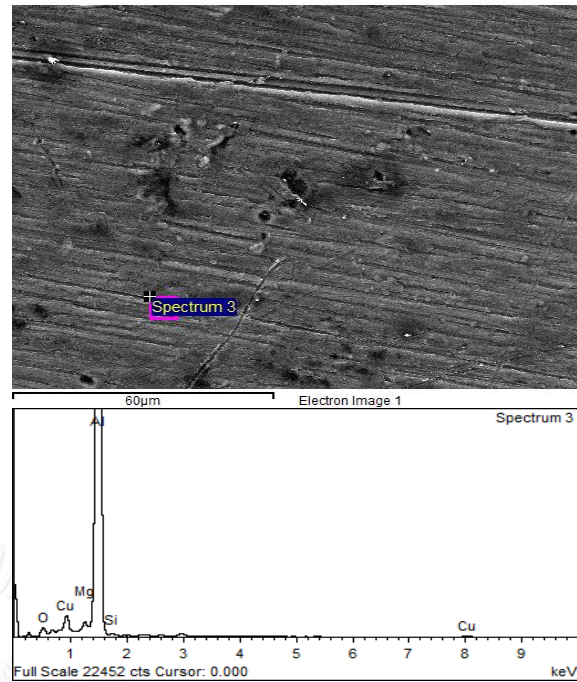
Element	Weight%	Atomic%
O K	12.87	20.41
Mg K	0.76	0.80
Al K	79.78	75.01
Si K	2.29	2.07
Cu L	4.30	1.72
Totals	100.00	



(ญ).SEM-EDS จุดที่2 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1400 V

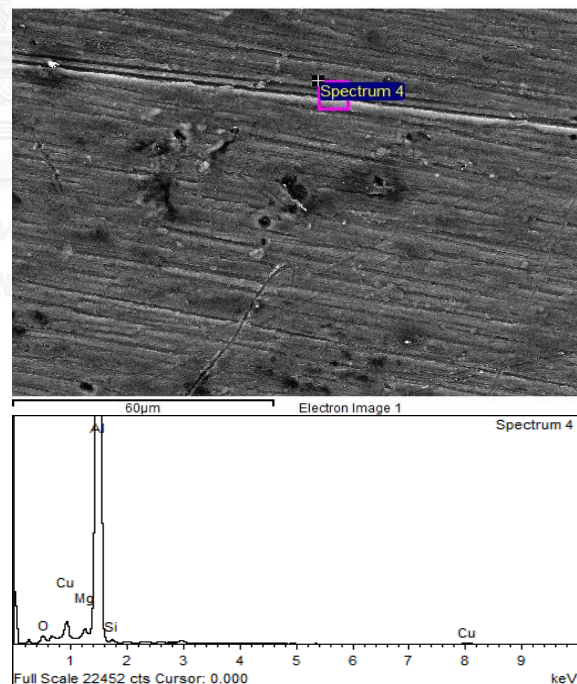


Element	Weight%	Atomic%
O K	3.41	5.73
Mg K	0.74	0.82
Al K	91.46	91.29
Si K	0.55	0.53
Cu L	3.84	1.63
Totals	100.00	



(ก).SEM-EDS จุดที่3 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1400 V

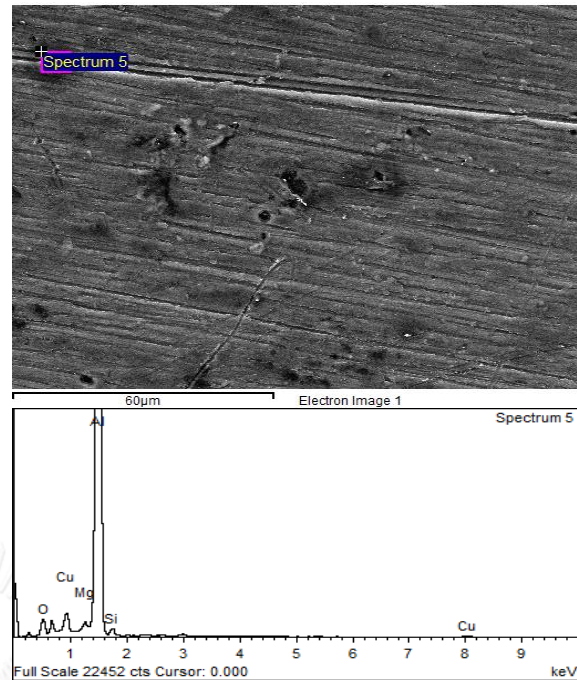
Element	Weight%	Atomic%
O K	3.13	5.28
Mg K	0.74	0.82
Al K	91.41	91.56
Si K	0.61	0.59
Cu L	4.11	1.75
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่4 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1400 V

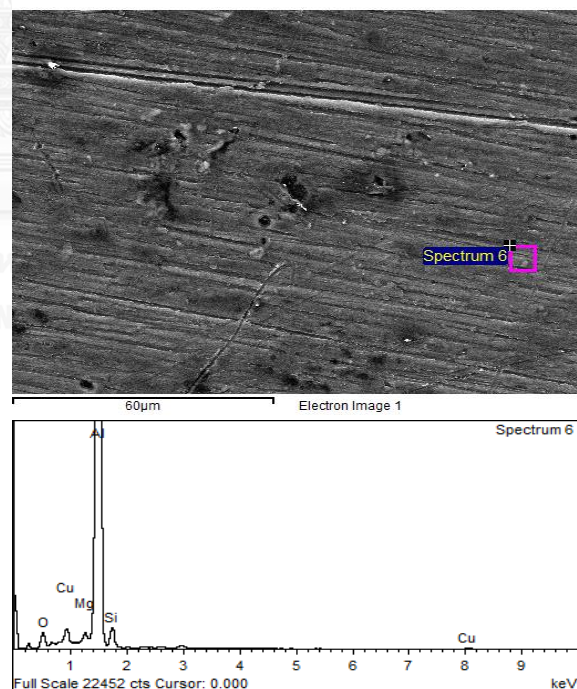


Element	Weight%	Atomic%
O K	7.17	11.84
Mg K	0.69	0.75
Al K	85.78	83.92
Si K	1.63	1.53
Cu L	4.72	1.96
Totals	100.00	



(จ).SEM-EDS จุดที่5 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1400 V

Element	Weight%	Atomic%
O K	5.94	9.83
Mg K	0.72	0.79
Al K	85.52	83.84
Si K	4.37	4.12
Cu L	3.44	1.43
Totals	100.00	



(ข).SEM-EDS จุดที่6 ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบทองแดงด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1400 V

รูปที่ 4.18 ผลการตรวจวัดด้วย SEM-EDS ของตัวอย่าง Al6061 ที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้าที่สลับ 500 V, 800 V, 1200 V และ 1400 V

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของชิ้นงานที่ 10 ซึ่งเคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -500 V มีลักษณะเป็นกลุ่มเกรน ซึ่งวิเคราะห์แล้วน่าจะเป็นอนุภาคของทองแดงที่รวมตัวกันบนผิวของอลูมิเนียม เนื่องจากสามารถวัดสเปกตรัม Cu-L ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณข้างเคียงที่ไม่ใช่อนุภาคทองแดงแล้ววัดเปอร์เซ็นต์ Cu-L แทบไม่ต่างจากชิ้นงานเปล่า และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น -800 V การเกาะกลุ่มกันของเกรนมีขนาดใหญ่ หนาแน่นและกระจายตัวกว้างขึ้น ส่วนชิ้นงานที่ 12 เคลือบด้วยไมโครเวฟและแรงดันไฟฟ้า -1400 V มีลักษณะเป็นฟิล์มเนื่องจากวัด EDS หลายๆพื้นที่พบว่าสามารถวัดสเปกตรัม Cu-L ได้ทุกพื้นที่

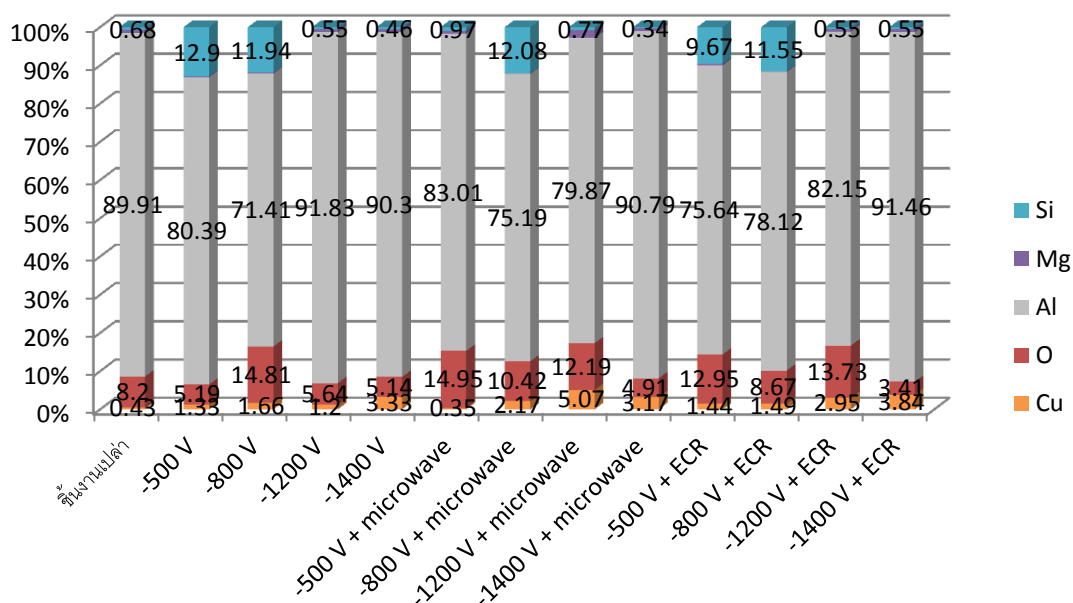
ในชิ้นงานที่เคลือบด้วยระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1200 V, -1400 V ทำการวัดหลายๆจุด สามารถวัดสเปกตรัม Cu-L ได้ทุกจุด ดังรูปที่ 4.18(ฉ) ถึง 4.18(จ). แสดงว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคทองแดงครอบคลุมตลอดทั้งชิ้นงานแต่จะแตกต่างกันบ้างในแต่ละจุดที่วัดมีความหนาแน่นของอนุภาคทองแดงไม่เท่ากัน

สรุปผลของการตรวจวัดลักษณะพื้นผิวของการเคลือบด้วย SEM และองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS ของทั้ง 13 ชิ้นงาน ได้ผลดังตารางที่ 4.3 โดยทำการเลือกจุดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยมวลของออกซิเจนน้อยและมีเปอร์เซ็นต์โดยมวลของทองแดงสูง สำหรับลักษณะการเคลือบแบบเกรนจะเลือกจุดที่อยู่บนเกรน และสำหรับลักษณะการเคลือบแบบฟิล์มบางจะเลือกจุดที่ไม่ใช่เกรนขรุขระ ซึ่งเป็นพื้นหลังมาแสดงผล

อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบธาตุจาก EDS นี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนด้วย ซึ่งถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงก็จะสามารถลงลึกเข้าไปเกินพื้นผิว ทำให้ตรวจได้เปอร์เซ็นต์ทองแดงบนพื้นผิวเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดมีค่าน้อย สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงาน 15 keV ในการวัด EDS ทุกชิ้นงาน ส่วนความหนาแน่นของเกรนคือขนาดพื้นที่ของเกรนที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกับชิ้นงานเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของชิ้นงานนั้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จากการวัดขนาดพื้นที่ของแต่ละเกรนจากภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 500x แล้วนำมารวมกันหารด้วยพื้นที่ทั้งหมดของภาพถ่ายนั้นคูณด้วย 100 %

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบธาตุของทั้ง 13 ชั้นงาน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวล

ชั้นงาน	เงื่อนไขการทดลอง	ลักษณะการเคลือบ	ความหนาแน่นของเกรน	องค์ประกอบธาตุ (% weight)				
				Cu	O	Al	Mg	Si
1	ชั้นงานเปล่า	-	-	0.43	8.20	89.91	0.79	0.68
2	-500 V	Grain	0.647 %	1.33	5.19	80.39	0.20	12.9
3	-800 V	Grain	1.194 %	1.66	14.81	71.41	0.19	11.94
4	-1200 V	Film	-	1.20	5.64	91.83	0.79	0.55
5	-1400 V	Film	-	3.33	5.14	90.30	0.77	0.46
6	-500 V + microwave	Grain	1.043 %	0.35	14.95	83.01	0.72	0.97
7	-800 V + microwave	Grain	5.721 %	2.17	10.42	75.19	0.15	12.08
8	-1200 V + microwave	Grain	7.995 %	5.07	12.19	79.87	2.10	0.77
9	-1400 V + microwave	Film	-	3.17	4.91	90.79	0.79	0.34
10	-500 V + ECR	Grain	1.636 %	1.44	12.95	75.64	0.30	9.67
11	-800 V + ECR	Grain	14.392 %	1.49	8.67	78.12	0.17	11.55
12	-1200 V + ECR	Film	-	2.95	13.73	82.15	0.63	0.55
13	-1400 V + ECR	Film	-	3.84	3.41	91.46	0.74	0.55



รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงองค์ประกอบธาตุของทั้ง 13 ชั้นงานทดลอง

จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบธาตุในตารางที่ 4.3 สามารถนำมาแสดงผลเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 4.19 สังเกตได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้าดิวซ์มีเปอร์เซ็นต์โดยมวลของทองแดงและความหนาแน่นของเกรนเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและมีลักษณะเป็นฟิล์มบางเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่า  $-1200$  V ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์โดยมวลของทองแดงเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เมื่อทดลองโดยเปิดใช้งานคลื่นไมโครเวฟที่แรงดันไฟฟ้า  $-500$  V เกรนที่พบมีองค์ประกอบของทองแดง  $0.35$  % ซึ่งเป็นของชิ้นงานที่เป็นพื้นหลังจึงไม่ใช่เกรนทองแดงจากการสเปกเตอร์ ในขณะที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น  $-800$  V,  $-1200$  V พบความหนาแน่นของเกรนและเปอร์เซ็นต์ทองแดงเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการใช้ไมโครเวฟกับการใช้แรงดันไฟฟ้าดิวซ์อย่างเดียว พบว่าที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าต่างๆ มีเพียงกรณีแรงดันไฟฟ้า  $-800$  V เท่านั้นที่ได้ผลเปอร์เซ็นต์และความหนาแน่นเกรนมากกว่า นอกนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่ได้ดีกว่า

ในขณะที่ระบบ ECR ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน สังเกตเห็นความหนาแน่นของเกรนมากกว่าอย่างชัดเจน และกรณีที่เป็นฟิล์มก็มีเปอร์เซ็นต์ทองแดงมากกว่าเช่นกัน

นอกจากนั้นทุกชิ้นงานสามารถวัด EDS เจอสเปกตรัมของ Fe, Cr ด้วยแต่ไม่ได้นำมารวมในผลการวัดด้วยเนื่องจากเป็นธาตุที่มาจาก การสเปกเตอร์กับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ของกระบอกสุญญากาศมาปนเปื้อนอยู่บนชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามตัวกระบอกสุญญากาศยังไม่สามารถกักความเป็นสุญญากาศได้โดยสมบูรณ์ ยังมีอากาศสามารถรั่วเข้ามาภายในได้เล็กน้อย สังเกตได้จากการวัด EDS พบออกซิเจนบนชิ้นงาน จึงเป็นส่วนที่ต้องปรับปรุงต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบของระบบต่อไป

#### 4.6 อภิปรายผลการทดลอง

##### 4.6.1 ผลกระทบเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบโดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก  $-500$  V ไปจนถึง  $-1200$  V แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัว ขนาดของกลุ่มเกรน และความหนาแน่นของเกรนมากขึ้นดังรูปที่ 4.13(ข), (ค), (ง) และเป็นฟิล์มบางที่แรงดันไฟฟ้า  $-1400$  V

เช่นเดียวกันกับระบบที่มีไมโครเวฟที่มีการกระจายตัว ขนาดของกลุ่มอนุภาค และความหนาแน่นของอนุภาคมากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.13(ฉ)., (ช)., (ฅ). และระบบ ECR ดังรูปที่ 4.13(ญ)., (ฎ). ทั้งนี้เพราะว่าแรงดันไฟฟ้าลบที่สูงขึ้นสามารถเหนี่ยวนำไอออนบวกอาร์กอนปริมาณมากขึ้นให้วิ่งเข้ามาหาวัสดุเป้าด้วยความเร่งมากขึ้น ทำให้เกิดการสปัตเตอร์ริงมากขึ้น

#### 4.6.2 ผลกระทบเมื่อมีคลื่นไมโครเวฟ

จากการวิเคราะห์ด้วย SEM ของชิ้นงานที่ 2 แรงดันไฟฟ้า -500 V และชิ้นงานที่ 6 เมื่อมีการใช้คลื่นไมโครเวฟเพิ่มเข้ามา สังเกตเห็นขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 4.13(ข)., (ค). แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS จากตารางที่ 4.3 พบว่าไม่ใช่เกรนของทองแดง แต่มีองค์ประกอบของออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่อันเกิดจากการรั่วของกระบอกสุญญากาศ และมีเพียงชิ้นงานที่ 7 เท่านั้นที่ให้ผลของขนาดเกรนที่ใหญ่กว่า มีความหนาแน่นเกรนและเปอร์เซ็นต์ของทองแดงมากกว่าระบบดีซีที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน

ส่วนชิ้นงานที่ 8 ผลการเคลือบเป็นกลุ่มเกรนไม่ได้เป็นฟิล์มดังเช่นระบบดีซี -1200 V และชิ้นงานที่ 9 กับชิ้นงานที่ 5 ที่แรงดันไฟฟ้า -1400 V เหมือนกันก็ได้ผลไม่แตกต่างกันนัก แสดงว่าไมโครเวฟไม่ได้ช่วยเพิ่มพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน เนื่องจากขนาดของกระบอกสุญญากาศที่ใช้อยู่มีขนาดไม่เหมาะสมที่จะเป็น Resonance Cavity สำหรับคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz ทำให้ไม่มีการสั่นขึ้นลงของสนามไฟฟ้าของคลื่นหรือการโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้าเกิดเป็นคลื่นนิ่งภายในกระบอกสุญญากาศ จึงไม่มีการเรโซแนนซ์จากคลื่นนิ่งให้กับอิเล็กตรอน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากขาดเครื่องมือที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสมาภายในกระบอกสุญญากาศ อย่างเช่นถ้ามีหัววัดลางมัวร์จะทำให้ทราบพลังงานอิเล็กตรอน ความหนาแน่นพลาสมา ซึ่งถ้าวัดได้ไม่แตกต่างหรือเพิ่มเพียงเล็กน้อยจากระบบดีซี ก็จะสามารถยืนยันคุณสมบัติข้างต้นได้

#### 4.6.3 ผลกระทบเมื่อใช้ระบบ ECR

จากผลตรวจ SEM ตัวอย่างที่เคลือบด้วยระบบ ECR ที่แรงดันไฟฟ้า -500 V มีการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคมากกว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยระบบไมโครเวฟและระบบแรงดันดีซีที่ -500

V ดังรูปที่ 4.13(ข), (ค) และ (ง) เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่เคลือบด้วยระบบ ECR ที่แรงดันไฟฟ้า -800 V มีการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคมากกว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยระบบไมโครเวฟและระบบแรงดันดิสก์ที่ -800 V ดังรูปที่ 4.13(ค), (ข) และ (ง) และจากตารางที่ 4.3 ก็มีพื้นที่ของเกรนขยายตัวกว้างมากกว่าสองระบบแรก

ในขณะที่ระบบ ECR แรงดันไฟฟ้า -1200 V มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเมื่อเทียบกับระบบไมโครเวฟที่เป็นเกรน และมีเปอร์เซ็นต์ของทองแดงมากกว่าระบบดิสก์ที่เป็นฟิล์มบาง ส่วนระบบ ECR ที่แรงดันไฟฟ้า -1400 V มีลักษณะเป็นฟิล์มบางซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของทองแดงมากกว่าทั้งสองระบบแรกเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้เพราะว่าในระบบ ECR แก๊สอาร์กอนสามารถแตกตัวเป็นพลาสมาได้มากกว่าเนื่องจากความถี่เชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟตรงกันกับความถี่อิเล็กตรอนไซโคลตรอน (electron cyclotron frequency) ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเกิดไอออนในเซชันมากขึ้นประกอบกับอิเล็กตรอนมีการหมุนวนรอบเส้นแรงแม่เหล็กทำให้มีโอกาสในการชนกับอะตอมแก๊สอาร์กอนมากขึ้น เกิดการไอออนในเซชันมากขึ้นไปอีก ด้วยความหนาแน่นพลาสมาที่สูงกว่าทำให้มีไอออนบวกอาร์กอนปริมาณมากวิ่งเข้าหาวัสดุเป้าที่ถูกไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้าลบ ทำให้เกิดการสปัตเตอร์ริงมากกว่า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเครื่องมือไมโครเวฟอิเล็กตรอนเรโซแนนซ์มาพัฒนาเป็นเครื่องอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ ซึ่งการทดลองของเครื่องมือชุดก่อน เป็นการเคลือบอนุภาคทองแดงลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการเคลือบอนุภาคทองแดงลงบนชิ้นงานอลูมิเนียม 6061 เหตุที่ใช้ชิ้นงานเป็นอลูมิเนียม 6061 เพราะมีใบรับรองส่วนประกอบจากทางผู้ผลิต ทำให้มีมาตรฐานในการเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุของชิ้นงานเปล่ากับชิ้นงานที่ทดลอง ด้วยชิ้นงานที่ต่างกันจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ อีกทั้งผลการทดลองจากเครื่องมือชุดก่อนไม่ทราบถึงพลังงานอิเล็กตรอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ EDS ทำให้เปอร์เซ็นต์ทองแดงที่ตรวจวัดได้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบอิเล็กทรอนิกส์โคเลตรอนเรโซแนนซ์ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยการปรับปรุงเพิ่มเติมมาจากเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์เรโซแนนซ์ของนายถิรายุ สนทนา ได้ทำการออกแบบคำนวณท่อนำคลื่นกระบอกเรโซแนนซ์ให้คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านได้ และได้ออกแบบขนาด รูปทรง การจัดวาง รวมทั้งสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรด้วยโปรแกรมจำลอง โดยต้องออกแบบให้บริเวณศูนย์กลางของทรงกระบอกเรโซแนนซ์มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 875 gauss เพื่อให้สอดคล้องกับความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นกระบอกเรโซแนนซ์ ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz กับอิเล็กทรอนิกส์โคเลตรอนขึ้น ผลจากการออกแบบแม่เหล็กไว้หลายรูปแบบ พบว่าแม่เหล็กถาวรรูปทรงวงแหวนให้ความสม่ำเสมอ มีทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กเหมาะสม และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 875 gauss ใกล้จุดศูนย์กลางทรงกระบอกตรงกับที่ต้องการที่สุด จากการทดลองสามารถให้กำเนิดพลาสมาได้จากการเรโซแนนซ์โดยไม่ต้องจ่ายแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงและให้ความเข้มการเรืองแสงของพลาสมาอาร์กอนสูงกว่าระบบดิสชาร์จและระบบที่ใช้ไมโครเวฟกับแรงดันไฟฟ้าดีซี จากนั้นได้ทำการทดลองเคลื่อนอนุภาคทองแดงลงบนชิ้นงานอลูมิเนียมเป็นเวลา 15 นาที พบว่าให้ผลของการเคลื่อนเพิ่มขึ้นจากระบบที่ใช้แรงดันไฟฟ้าดีซีอย่างเดียว และระบบที่ใช้ไมโครเวฟกับแรงดันไฟฟ้าดีซี

#### 5.2 ข้อเสนอแนะและงานที่สามารถทำได้

ในระบบไมโครเวฟเมื่อเปิดการใช้งานหลอดแมกนีตรอนเป็นเวลานานเกิน 15 นาทีที่กำลัง 700W พบว่าหลอดแมกนีตรอนจะร้อนมากและความเข้มการเรืองแสงของพลาสมาจะต่ำลง กำลังคลื่นไมโครเวฟที่ออกมาต่ำลงส่งผลต่อกระบวนการเรโซแนนซ์ ถึงแม้ว่าจะใช้พัดลมเป่าระบายความร้อนช่วยแล้ว ดังนั้นการใช้น้ำช่วยระบายความร้อนน่าจะแก้ปัญหาได้ดีกว่า

ในงานวิจัยนี้ไม่มีเครื่องมืออย่างเช่นหัววัดกลางมัวร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของพลาสมา อัตราการก่อตัวของไอออนหรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆของพลาสมา ทำให้ไม่ทราบสมบัติต่างๆของพลาสมาภายในกระบอกสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ ความดันสุญญากาศภายในกระบอกสุญญากาศยังไม่ต่ำเพียงพอสำหรับระบบ ECR ที่ต้องการอย่างน้อย  $10^{-4}$  Torr เนื่องจากขีดความสามารถของ Rotary pump ได้ที่  $10^{-2}$  Torr ดังนั้นควรจะใช้ปั๊มที่มีอัตราการสูบอากาศสูงกว่านี้อย่าง Diffusion pump หรือ Turbomolecular pump อีกทั้งตัวกระบอกสุญญากาศยังไม่สามารถกักความเป็นสุญญากาศได้โดยสมบูรณ์ อากาศสามารถรั่วเข้าไปได้เล็กน้อย

กระจกทนความร้อนที่ใช้เป็นกระจก Borosilicate สามารถทนความร้อนได้  $200-400^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ plexiglass แต่มีความทนทานต่อความดัน แรงบีบ ความเครียดได้ดีกว่า plexiglass สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้กระจก Borosilicate ก็พอเพียงสำหรับทนความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟไม่ถึงกับต้องใช้กระจก Quartz ที่มีความแกร่งและทนความร้อนได้สูงกว่า  $400^{\circ}\text{C}$  แต่มีราคาสูงและต้องสั่งทำจากต่างประเทศ

ในการทดลองยังเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วัสดุเป่ามากขึ้น ความดันภายในกระบอกสุญญากาศยังเพิ่มเร็วขึ้น ที่แรงดันไฟฟ้าเกิน 1200V ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและแม้ว่าจะเปิดปั๊มสุญญากาศแล้วแต่ความดันไม่ลดลงกลับยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นจนสูงเกินกว่าจะเกิดพลาสมาได้ ทั้งนี้เกิดจากวัสดุเป่าและชิ้นงานมีความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้า จึงควรมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจ่ายให้แก่วัสดุเป่าและชิ้นงาน

อีกทั้งถ้าระบบไม่มีอากาศรั่วสามารถกักความเป็นสุญญากาศได้และมีการระบายความร้อนที่ดีแล้ว ก็จะสามารถทดลองปรับเปลี่ยนความดันภายในของทรงกระบอกเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของความดันสุญญากาศที่ส่งผลต่อการเคลือบ ซึ่งที่ความดันต่ำๆ ระบบ ECR จะต้องมีความหนาแน่นพลาสมาและผลการเคลือบที่ดีกว่าอีกสองระบบ



### รายการอ้างอิง

1. German hydrogen association. *Hydrogen explosions Fukushima nuclear plant: what happened?* 2011 [cited 2014 14 November]; Available from: <http://www.hyer.eu/2011/hydrogen-in-nuclear-accidents-what-is-the-role-of-the-gas-in-fukushima>.
2. Yoshinobu Kawai, et al., *Development of large diameter ECR plasma source*. Vacuum, 2010. **84**: p. 1381-1384.
3. Toyohisa Asaji, et al., *An ECR ion source directly excited in a selected microwave mode cavity resonator for material processing*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2005. **237**: p. 262–266.
4. G. Mohan Rao and S. B. Krupanidhi, *Electron cyclotron resonance plasma assisted sputter deposition of boron nitride films*. Applied Physics Letter, 1997. **70**(5): p. 628-630.
5. Enrique Camps, Oscar Olea, and C. Gutierrez-Tapia, *Characteristics of a microwave electron cyclotron resonance plasma source*. Rev. Sci. Instrum, 1995. **66**(5): p. 3219-3227.
6. Lei. Zhang, et al., *Deposition of dense and smooth Ti films using ECR plasma-assisted magnetron sputtering*. Surface & Coatings Technology, 2009. **203**: p. 3356-3360.
7. Youl-Moon Sunga and Hee-Je Kimb, *Optimum substrate bias condition for TiN thin film deposition using an ECR sputter system*. Surface and Coatings Technology, 2003. **171**: p. 75–82.
8. ธีรยา สอนทนา, การพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กตรอนเรโซแนนซ์, in วิศวกรรมนิวเคลียร์. 2013, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. Shalom Eliezer and Yaffa Eliezer, *The fourth state of matter: an introduction to plasma science*. 2010, Philadelphia: Institute of Physics.
10. Donald M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. second ed. 2001: Elsevier Inc.

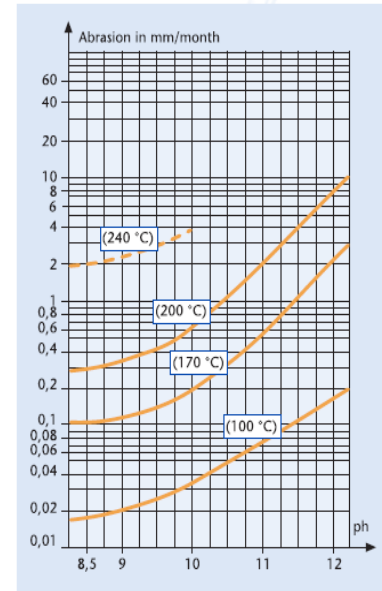
11. Michael A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. 2005, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
12. Kiyotaka Wasa, *Sputtering Phenomena*, in *Handbook of Sputter Deposition Technology*, Kiyotaka Wasa, Isaku Kanno, and Hidetoshi Kotera, Editors. 2012, Elsevier. p. 41-75.
13. Kiyotaka Wasa, *Sputtering Systems*, in *Handbook of Sputter Deposition Technology*, Kiyotaka Wasa, Isaku Kanno, and Hidetoshi Kotera, Editors. 2012, Elsevier. p. 77-139.
14. David M. Pozar, *Microwave Engineering*. second ed. 1998: John Wiley & Sons, Inc.
15. R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasma*. 1996, Philadelphia: Institute of Physics.
16. Ian G. Brown, *The physics and technology of ion sources*. 2004, Weinheim: Wiley-VCH.
17. James E. Stevens, *Electron Cyclotron Resonance Plasma Sources*, in *High Density Plasma Sources*, Oleg A. Popov, Editor. 1996, William Andrew Inc. p. 312-379.
18. D.T. Tran, et al., *Microwave plasma-assisted etching of diamond*. *Diamond & Related Materials*, 2008. **17**: p. 717-721.
19. Akira Murai, et al., *Generation of large-area disk-shaped ECR plasma for diamond deposition*. *Thin Solid Films*, 1996. **281-282**: p. 146-148.
20. Ansys Inc, *User's guide - Maxwell 3D*. 2010.
21. Magcraft *Permanent magnet selection and design handbook*. 2007.
22. Graham J. Scoles, *Handbook of rectifier circuits*. 1980, Chichester: Ellis Horwood Limited.



# 1. เอกสารข้อมูลของกระจก Borosilicate อ้าอิงมาจาก MAXOS® บริษัท Auer-lighting GmbH

<b>Glass Type SUPRAX 8488</b>		Modulus of elasticity	67 x 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
Coefficient of expansion		Poisson's ratio $\mu$	0,20
$\alpha$ 20 °C/300 °C	4,3 x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	Thermal conductivity	
Transformation temperature	540°C	$\lambda$ at 90°C	1,2 $\frac{W}{m \cdot K}$
Glass temperature for the	10 <sup>13,0</sup> 553°C	Refractive index nd	1,484
viscosities dPas (Poise)	10 <sup>7,6</sup> 808°C	( $\lambda = 587,6$ nm)	
	10 <sup>4,0</sup> 1200°C	Photoelastic	
Density at 25°C	2,31g/cm <sup>3</sup>	parameter K	3,2 x 10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup> /N

Chemical characteristics	Hydrolytic resistance	Acid resistance	Alkali resistance
Test acc. to	DIN ISO 719	DIN ISO 1776	DIN ISO 695
max. abrasion acc. to DIN ISO	0,1	< 100 $\mu$ g Na <sub>2</sub> O each 100 cm <sup>2</sup>	> 75 - 175 mg each 100 cm <sup>2</sup>
MAXOS® max. abrasion	0,050	< 40 $\mu$ g Na <sub>2</sub> O each 100 cm <sup>2</sup>	< 100 mg each 100 cm <sup>2</sup>
MAXOS®	HGB 1	-	class A2



The abrasion of MAXOS®-glass in watery phase for several temperatures as a function of the ph-value.

## Dimensional tolerances (DIN 7080)

Diameter	
up to 135 mm	± 0,5 mm
150 to 200 mm	± 0,8 mm
above 200 mm	± 1,0 mm

Thickness	
up to 20 mm	+ 0,50 mm / - 0,25 mm
above 20 mm	+ 0,80 mm / - 0,40 mm

Bending strength	≥ 160 N/mm <sup>2</sup>	23.000 psi
Surface compressive stress	≥ 100–140 N/mm <sup>2</sup>	14.500–20.000 psi
Parallelism	≤ 0,20 mm	0.008 inches
Flatness	Diameter:	
	up to 100 mm ≤ 0,05	
	above 100 up to 150 mm ≤ 0,08	
	above 150 up to 200 ≤ 0,12	
	above 200 mm ≤ 0,15	
Thermal shock resistance $\Delta T$	265 K	
Max. permissible temperature	300 °C	572 °F
protected with mica	320 °C	608 °F

รูปที่ ก. 1 ข้อมูลทางเทคนิคของแก้ว Borosilicate

## 2. มาตรฐานของแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียม อ้างอิงมาจาก Eclipse Magnetic Ltd.

Nxx?? Material	Br		Hc (Hcb)		Hci (Hcj)		BHmax	
	mT	G	kA/m	Oe	kA/m	Oe	kJ/m <sup>3</sup>	MGOe
N27	1,030	10,300	796	10,000	955	12,000	199	25
N30	1,080	10,800	796	10,000	955	12,000	223	28
N33	1,130	11,300	836	10,500	955	12,000	247	31
N35	1,170	11,700	867	10,900	955	12,000	263	33
N38	1,210	12,100	899	11,300	955	12,000	287	36
N40	1,240	12,400	923	11,600	955	12,000	302	38
N42	1,280	12,800	923	11,600	955	12,000	318	40
N45	1,320	13,200	875	11,000	955	12,000	342	43
N48	1,380	13,800	836	10,500	875	11,000	366	46
N50	1,400	14,000	796	10,000	875	11,000	382	48
N52	1,450	14,500	796	10,000	875	11,000	398	50
N27 M	1,030	10,300	796	10,000	1,114	14,000	199	25
N30 M	1,080	10,800	796	10,000	1,114	14,000	223	28
N33 M	1,130	11,300	836	10,500	1,114	14,000	247	31
N35 M	1,170	11,700	867	10,900	1,114	14,000	263	33
N38 M	1,210	12,100	899	11,300	1,114	14,000	286	36
N40 M	1,240	12,400	923	11,600	1,114	14,000	302	38
N42 M	1,280	12,800	923	11,600	1,114	14,000	318	40
N45 M	1,320	13,200	875	11,000	1,114	14,000	342	43
N48 M	1,370	13,700	1,035	13,000	1,114	14,000	366	46
N50 M	1,400	14,000	1,035	13,000	1,114	14,000	382	48
N27 H	1,030	10,300	796	10,000	1,353	17,000	199	25
N30 H	1,080	10,800	796	10,000	1,353	17,000	223	28
N33 H	1,130	11,300	836	10,500	1,353	17,000	247	31
N35 H	1,170	11,700	867	10,900	1,353	17,000	263	33
N38 H	1,210	12,100	899	11,300	1,353	17,000	286	36
N40 H	1,240	12,400	923	11,600	1,353	17,000	302	38
N42 H	1,280	12,800	955	12,000	1,353	17,000	318	40
N45 H	1,320	13,200	995	12,500	1,353	17,000	342	43
N48 H	1,370	13,700	995	12,500	1,353	17,000	366	46
N50 H	1,400	14,000	995	12,500	1,353	17,000	382	48
N27 SH	1,030	10,300	804	10,100	1,592	20,000	199	25
N30 SH	1,080	10,800	804	10,100	1,592	20,000	223	28
N33 SH	1,130	11,300	844	10,600	1,592	20,000	247	31
N35 SH	1,170	11,700	875	11,000	1,592	20,000	263	33
N38 SH	1,210	12,100	907	11,400	1,592	20,000	286	36
N40 SH	1,240	12,400	939	11,800	1,592	20,000	302	38
N42 SH	1,280	12,800	963	12,100	1,592	20,000	318	40
N45 SH	1,320	13,200	1,003	12,600	1,592	20,000	342	43
N27 UH	1,030	10,300	764	9,600	1,989	25,000	199	25
N30 UH	1,080	10,800	812	10,200	1,989	25,000	223	28
N33 UH	1,130	11,300	851	10,700	1,989	25,000	247	31
N35 UH	1,170	11,700	875	11,000	1,989	25,000	263	33
N38 UH	1,210	12,100	875	11,000	1,989	25,000	287	36
N40 UH	1,240	12,400	899	11,300	1,989	25,000	302	38
N42 UH	1,280	1,280	875	11,000	1,989	2,500	318	40
N27 EH	1,030	10,300	780	9,800	2,387	30,000	199	25
N30 EH	1,080	10,800	812	10,200	2,387	30,000	223	28
N33 EH	1,130	11,300	836	10,500	2,387	30,000	247	31
N35 EH	1,170	11,700	875	11,000	2,387	30,000	263	33
N38 EH	1,220	12,200	899	11,300	2,387	30,000	287	36
N27 VH/AH	1,030	10,300	772	9,700	2,785	35,000	199	25
N30 VH/AH	1,080	10,800	812	10,200	2,785	35,000	223	28
N33 VH/AH	1,140	11,400	851	10,700	2,785	35,000	247	31
N35 VH/AH	1,170	11,700	875	11,000	2,785	35,000	263	33

### Temperature Ratings



(Please note - your application will affect the performance available)

Magnet Type Suffix	Rev. Temp. Coef. of Induction (Br), $\alpha$ , %/°C (20-100°C)	Rev. Temp. Coef. of Intrinsic Coercivity (Hci), $\beta$ , %/°C (20-100°C)	Max. Working Temperature (based on a High working point)
	-0.120	-0.70	80 OC = 176 °F *
M	-0.115	-0.65	100OC = 212 °F *
H	-0.110	-0.60	1200C = 248 °F
SH	-0.105	-0.55	150 OC = 302 °F
UH	-0.100	-0.55	180 OC = 356 °F
EH	-0.095	-0.50	200 OC = 392 °F
VH / AH	-0.090	-0.49	230 OC = 446 °F

\* Please note that N52, N50, and N50M are rated to a maximum of 60°C (140°F).

รูปที่ ก. 2 ข้อมูลแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมตามเกรดมาตรฐานจีน

3. ใบรับรองผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตแผ่นอลูมิเนียม 6061

 <b>西南铝®</b>		<h2 style="margin: 0;">产品质量证明书</h2> <h3 style="margin: 0;">PRODUCT QUALITY CERTIFICATE</h3>										
编号: 0022320140700301 Serial No:		<b>中国驰名商标</b>										
订货单位 Customer		OKAYA SINGAPORE PTE LTD										
合同号 Contract No		140029830 SWA14-0829-002-09	产品名称 Product	预拉伸板	批号 Lot No	E2L9591						
合金状态 Alloy And Temper		6061-T651	规格(mm) Dimension		6.3500 * 1220 * 2440	箱数 Box Count	1					
技术标准 Technique Standard		EN485-1:2008		片数 Quantity	42.000							
化学成分标准 Chemical Composition Standard		EN573-3		重量(kg) Weight	2,190.000							
机械性能 Mechanical Property												
状态 Temper	取样方法 Sampling Method	抗张强度(MPa) Tensile Strength		屈服强度(MPa) Yield Strength		延伸率(%) Elongation						
		标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value					
T651	横向	≥290	325-338	≥240	307-324	≥9	13-15.5					
弯曲 Curve	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----					
化学成分% Chemical Composition												
熔炼号 Melt No	元素 Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	-----	Al
E011901	标准值 Standard Value	0.40-0.80	≤0.70	0.15-0.40	≤0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-----	≤0.25	≤0.15	-----	余量 Remainder
E011901	实测值 Actual Value	0.74	0.2	0.27	0.04	0.9	0.14	-----	0.03	0.02	-----	-----
包覆层厚度(μm) Adhesion		晶粒度 Grain Size		杯突 Cup Bulge		硬度 Hardness		电导率 Conductance				
标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
高倍 Microstructure		合格	低倍 Macrostructure		-----	氢含量(ml/100gAl) Hydrogen Content		标准值 Standard Value		-----		
表面质量 Surface Control		合格	几何尺寸 Dimension Control		合格	-----		实测值 Actual Value		-----		
备注 Note	MATERIAL CONFORMS TO AMS-QQ-250/11 STANDARDS IN ALL RESPECTS											

质量、环境、职业健康安全分别通过ISO9001、AS9100、ISO14001、GB/T28001管理体系认证。本产品的铅、汞、镉、六价格的含量均符合欧盟ROHS指令2011/65/EU的要求。食品和药品包装用铝材砷≤100PPm。 Quality, Environment and Professional Health & Safety Management System have Certified as per ISO 9001, AS9100, ISO14001 and GB/T28001. Content of Plumbum, Hydrargyrum, Cadmium and sexavalent chrome conforms to ROHS 2011/65/EU. Arsenic≤100PPm for food and drug packaging aluminum alloy.

检查员: YY-DENGHUA  
 Inspector

日期: 2014-07-15 09:29:04  
 Date




刮涂层拔 95105615 或免  
 费拨 8008105615 查询真伪  
 SWA2121210120153

**西南铝业(集团)有限责任公司**  
 SOUTHWEST ALUMINIUM (GROUP) CO., LTD.  
 地址: 中国重庆西彭 Address: Xipeng Town, Chongqing City, China 电话(TEL): (008623)65809668

รูปที่ ก. 3 ใบรับรองผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตแผ่นอลูมิเนียม 6061

#### 4. เอกสารข้อมูลของ Pressure Regulator รุ่น 25GX-10 อ้างอิงมาจากบริษัท The Harris Product Group



## Model 25GX


### Single stage cylinder regulator

**Applications:**

- Heavy duty, large, strong regulator for the professionals

**Features:**

- Restyled and redesigned regulator based on 825 model
- Standardized ¼ NPT gauges, inlet and outlet parts
- New ergonomic adjusting knob
- Twist lock Ø 63 mm pressure gauges
- Enough flow to cut up to 400 mm steel
- Side entry only
- These model numbers will replace the analogous for 825 models



**25GX-10-OX**

MODEL NO.	GAS	MAX INLET PRESSURE (bar)	DELIVERY PRESSURE (bar)	MAX AIR FLOW (m <sup>3</sup> /h)	SUPPLY PRESSURE GAUGE (bar)	DELIVERY PRESSURE GAUGE (bar)
25GX-1.5-AC	Acetylene	25	0-1.5	52	0-40	0-2.5
25GX-4-LP	Propane	25	0-4	25	0-40	0-6
25GX-4-OX	Oxygen	230	0-4	112	0-315	0-6
25GX-4 *	Argon, CO <sub>2</sub> , Nitrogen, Air, Helium, Hydrogen, Methane	230	0-4	112	0-315	0-6
25GX-AD-4 *	Helium, Hydrogen	230	0-4	112	0-315	0-6
25GX-10-OX	Oxygen	230	0-10	170	0-315	0-16
25GX-10 *	Argon, CO <sub>2</sub> , Nitrogen, Air, Helium, Hydrogen, Methane	230	0-10	170	0-315	0-16
25GX-AD-10 *	Helium, Hydrogen	230	0-10	170	0-315	0-16
25GX-15-OX	Oxygen	230	0-15	275	0-315	0-25
25GX-15 *	Argon, CO <sub>2</sub> , Nitrogen, Air, Helium, Hydrogen, Methane	230	0-15	275	0-315	0-25
25GX-AD-15 *	Helium, Hydrogen	230	0-15	275	0-315	0-25

• The regulator is available for all the listed gases. When ordering always specify gas

**The Harris Products Group – [marketing@harriscal.it](mailto:marketing@harriscal.it) - [www.harrisproductsgroup.com](http://www.harrisproductsgroup.com)**

รูปที่ ก. 4 ข้อมูลทางเทคนิคของ Pressure Regulator รุ่น 25GX-10

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเกรียงไกร ภูวดลกิจ เกิดวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ ปี พ.ศ. 2556

