

การพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์แนวนอน



นายถิระยุ สนนทนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

DEVELOPMENT OF MICROWAVE ELECTRON RESONANCE PLASMA GENERATOR

Mr. Tirayu Sonthana

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟ อิเล็กทรอนิกส์แนวนอน
โดย	นายถิรายุ สนทนา
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ปานทิพย์ อัมพรรัตน์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.ปานทิพย์ อัมพรรัตน์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี)

ถิรายุ สนทนา : การพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์.  
(DEVELOPMENT OF MICROWAVE ELECTRON RESONANCE PLASMA GENERATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.พงษ์แพทย์ เพ่งวานิชย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ปานทิพย์ อัมพรรัตน์, ,93 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบอนุภาคโลหะที่ต้องการลงบนพื้นผิวของวัสดุชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคดีซีสปัตเตอร์ริงที่ใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz เป็นตัวช่วยเพิ่มสมรรถนะของการเคลือบโครงสร้างของระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนหลัก คือ ระบบสุญญากาศ ระบบจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูง ระบบไมโครเวฟ และระบบจ่ายก๊าซโดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายในกระบอกสุญญากาศซึ่งบรรจุก๊าซสำหรับทำอันตรกิริยาอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมก็จะเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา ซึ่งประจุบวกในพลาสมาจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้วิ่งเข้าชนกับวัสดุเป้าที่เชื่อมต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าขั้วลบ และหากประจุบวกที่วิ่งเข้าชนมีพลังงานเพียงพอก็จะเกิดการสปัตเตอร์ริงขึ้น ทำให้อนุภาคของวัสดุเป้าหลุดออกและวิ่งไปฝังตัวลงบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบไฟฟ้าให้สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบขนาด 500-1000 โวลต์ไปยังวัสดุเป้า และ จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกไปยังวัสดุเคลือบ ระดับสุญญากาศที่ใช้อยู่ที่ 0.045 ทอร์ ซึ่งพบว่าสามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาและเกิดการฝังตัวของอนุภาคลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการเคลือบได้ และเพื่อแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ผลิตขึ้นสามารถทำการเคลือบได้จริง จึงทำการทดลองเคลือบทองแดงลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม (SS304) โดยใช้อาร์กอนเป็นก๊าซสำหรับทำอันตรกิริยา ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้าที่ 500 และ 800 โวลต์ เวลาในการเคลือบที่ 5, 10 และ 15 นาที และเมื่อปิดและเปิดคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจากผลการวัดด้วย SEM และการทำ Mapping เบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าสามารถทำการเคลือบได้จริง และ แรงดันไฟฟ้า ไมโครเวฟ และ เวลาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเคลือบผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5370543621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: DC SPUTTERING / SPUTTERING / MICROWAVE

TIRAYU SONTANA: DEVELOPMENT OF MICROWAVE ELECTRON RESONANCE PLASMA GENERATOR. ADVISOR: PHONGPHAETH PENGVANICH, CO-ADVISOR: PANTIP AMPORNAT, 93 pp.

This research involves the development of a microwave electron resonance plasma generator for using in the process for coating metal particles onto the surface of various materials with the DC sputtering technique enhanced by 2.45 GHz microwave. The system consists of 4 main parts: the vacuum system, the high voltage DC power supply system, the microwave system, and the gas feeding system. When a high voltage DC power is applied between two electrodes which are located inside a vacuum chamber filled with a working gas, under the right conditions the gas can ionize into plasmas. The positive charges in the plasmas are then accelerated under the applied electric field toward the target material which is negatively biased. When the charges hit the target material with sufficient energy, sputtering process can occur and particles inside the target material can break free from the material's surface, travel toward the substrate, and implant on the substrate's surface. In this research, the power supply has been designed to be able to produce 500 – 1000 voltage output, where negative bias is connected to the target material and positive bias is connected to the substrate. At the working vacuum level of 0.045 Torr, it is found that ionization into plasmas and coating can occur. In order to demonstrate the coating process, an experiment has been set up to coat copper onto stainless steel (SS304) using argon as working gas under various sets of conditions: 500/800 V, 5/10/15 minutes, and microwave on/off. The preliminary result from SEM and elemental mapping show that coating can occur at the set conditions. Voltage, microwave, and time are factors that affect the coating result.

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Nuclear Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาอาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.ปานทิพย์ อัมพรรัตน์ ผู้คอยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และการสนับสนุนในทุกๆ เรื่องในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ในการอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างและถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์

ขอขอบคุณทางหุ้นส่วนจำกัด นพเทค ที่ให้การสนับสนุนและให้คำปรึกษาในการขึ้นรูปชิ้นงานบางส่วนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน และช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้การสนับสนุนทางการเงิน ผู้คอยให้คำปรึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง.....	4
2.1 กระบวนการเกิดฟิล์มบาง.....	4
2.1.1 กระบวนการทางเคมี.....	4
2.1.2 กระบวนการทางกายภาพ.....	6
2.2 เงื่อนไขของการฝังตัวอนุภาคเป็นฟิล์มบาง.....	8
2.3 การดิสซาร์จภายในก๊าซ.....	11
2.4 กระบวนการไอออไนเซชัน.....	12
2.5 ดีซี สปีดเตอร์ริง.....	13
2.6 พลาสมา.....	14
2.6 คลื่นไมโครเวฟ.....	15
บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องไมโครเวฟดีซีสปีดเตอร์ริง.....	18
3.1 โครงสร้างพื้นฐานสำหรับการออกแบบเครื่องไมโครเวฟดีซีสปีดเตอร์ริง.....	18
3.1.1 ชุดกระบอกสุญญากาศหลัก.....	18
3.1.2 ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสูง.....	18

3.1.3 ระบบสุญญากาศ .....	18
3.1.4 ระบบจ่ายคลื่นไมโครเวฟ .....	18
3.1.5 ระบบก๊าซอาร์กอน .....	18
3.2 ชุดกระบอกสุญญากาศหลัก .....	19
3.2.1 เงื่อนไขการออกแบบชุดกระบอกสุญญากาศหลัก.....	19
3.2.2 โครงสร้างของกระบอกสุญญากาศ .....	22
3.3 ระบบสุญญากาศ .....	32
3.3.1 การออกแบบระบบสุญญากาศ.....	32
3.3.2 โครงสร้างระบบสุญญากาศ.....	35
3.4 ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง .....	36
3.4.1 ชุดจ่ายไฟ สำหรับระบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง ที่ขั้วแคโทดและแอโนด .....	38
3.4.2 ชุดจ่ายไฟ สำหรับระบบไมโครเวฟ.....	38
3.5 ระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน .....	39
3.6 ระบบไมโครเวฟ.....	40
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	41
4.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง.....	41
4.1.1 การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	41
4.1.2 การทดสอบระบบสุญญากาศ .....	45
4.2 การทดสอบการทำงานของระบบเคลื่อน .....	47
4.2.1 การเตรียมวัสดุที่ต้องการเคลื่อน .....	47
4.2.2 การทดสอบกระบวนการเคลื่อน.....	49
4.2.3 การวิเคราะห์ทางกายภาพของพื้นผิว .....	54
4.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุจาก EDS .....	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย .....	64
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64



รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุต.....	42
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจากวงจร SCR กับ แรงดันไฟฟ้าแรงสูงเอาต์พุต	44
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบการทำงานระบบสุญญากาศ.....	46
ตารางที่ 4.4 สมรรถนะของเครื่อง ดีซี สปีดเตอร์ริง .....	49
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขสำหรับการทดสอบการเคลื่อน.....	49
ตารางที่ 4.6 บันทึกค่าแรงดัน เอาต์พุตที่เวลา 5 นาที.....	50
ตารางที่ 4.7 บันทึกค่าแรงดัน เอาต์พุตที่เวลา 10 นาที.....	51
ตารางที่ 4.8 บันทึกค่าแรงดัน เอาต์พุตที่เวลา 15 นาที.....	52

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ .....	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างเทคนิคกระบวนการทางเคมี.....	5
รูปที่ 2.3	โครงสร้างเทคนิคอีเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์.....	5
รูปที่ 2.4	กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอระเหยสารจากความร้อน .....	6
รูปที่ 2.5	กระบวนการสปัตเตอร์ริง.....	7
รูปที่ 2.6	โครงสร้างระบบ ดีซี และ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง.....	7
รูปที่ 2.7	โครงสร้างแมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง.....	8
รูปที่ 2.8	พารามิเตอร์สำหรับการฝังตัวของธาตุต่างเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการฝังตัวของอนุภาค .....	9
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาว กับ ความดันของก๊าซภายในสุญญากาศ.....	11
รูปที่ 2.10	เส้นแบ่งลักษณะของก๊าซในโหมดต่างๆที่เกิดการดิสชาร์จตาม .....	12
รูปที่ 2.11	สถานะของสสาร .....	14
รูปที่ 2.12	การเคลื่อนที่ของไอออนในพลาสมาที่สถานะสมดุล .....	15
รูปที่ 2.13	พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสุญญากาศ.....	15
รูปที่ 2.14	ชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	16
รูปที่ 2.15	ลักษณะของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน .....	17
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดพลาสมาไมโครเวฟ ดีซีสปัตเตอร์ริง.....	19
รูปที่ 3.2	การออกแบบเครื่องในงานวิจัยของ Tengcai Ma และคณะ .....	20
รูปที่ 3.3	การออกแบบเครื่องในงานวิจัยของ C.P Lungu และ K.Iwasaki .....	21
รูปที่ 3.4	ขนาดวัสดุเป้าสารเคลือบและวัสดุเป้าสำหรับเคลือบ .....	21
รูปที่ 3.5	ขนาดชิ้นงานจริงสำหรับวัสดุที่ต้องการเคลือบและวัสดุเป้าสารเคลือบ .....	22
รูปที่ 3.6	รูปโครงสร้างของชุดแผ่นวัสดุที่ต้องการเคลือบ .....	23
รูปที่ 3.7	รูปโครงสร้างของชุดวัสดุเป้าที่ต้องการเคลือบ.....	25
รูปที่ 3.8	ชุดวัสดุเป้าสารเคลือบที่ติดตั้งภายในกระบอกสุญญากาศหลัก .....	26
รูปที่ 3.9	รูปโครงสร้างของกระบอกสุญญากาศสำหรับชุดเรโซแนนซ์คลื่นไมโครเวฟ.....	27
รูปที่ 3.10	รูปโครงสร้างของกระบอกสุญญากาศสำหรับการทดลอง .....	29

รูปที่ 3.11 โครงสร้างภายนอกของกระบอกสุญญากาศ .....	31
รูปที่ 3.12 รูปตัดขวางภายในกระบอกสุญญากาศหลัก .....	32
รูปที่ 3.13 ปุ่ม Alcatel รุ่น 2005I.....	33
รูปที่ 3.14 คุณลักษณะปุ่มของบริษัท Alcatel.....	34
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงค่าจำเพาะของปุ่ม (Pump down factor) ของบริษัท Alcatel .....	34
รูปที่ 3.16 เก้จวัดความดันสุญญากาศ .....	35
รูปที่ 3.17 โครงสร้างของระบบสุญญากาศ .....	36
รูปที่ 3.18 วงจรควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดของเครื่อง ดีซี สปีดเตอร์ริง .....	36
รูปที่ 3.19 หน้าปัดชุดควบคุมระบบไฟฟ้า.....	37
รูปที่ 3.20 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับชุด ดีซีสปีดเตอร์ริง .....	38
รูปที่ 3.21 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับชุด ดีซี สปีดเตอร์ริง.....	39
รูปที่ 3.22 โครงสร้างระบบ จ่ายก๊าซอาร์กอน.....	39
รูปที่ 3.23 หลอดแมกนีตรอน.....	40
รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้า.....	41
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงดันอินพุตและเอาต์พุต .....	43
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์แรงดันอินพุต SCR และเอาต์พุต.....	45
รูปที่ 4.4 โครงสร้างระบบสุบสุญญากาศ.....	46
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศกับเวลา .....	47
รูปที่ 4.6 เหล็กกล้าไร้สนิม ด้านซ้ายก่อนและด้านขวาหลังการขัดผิวหน้า .....	48
รูปที่ 4.7 รูปพื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304.....	48
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่เวลา 5 นาที .....	53
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่เวลา 10 นาที.....	53
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่เวลา 15 นาที.....	54
รูปที่ 4.11 สภาพพื้นผิวหลังการสปีดเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 5 นาที .....	55
รูปที่ 4.12 สภาพพื้นผิวหลังการสปีดเตอร์ริง กำลังขยาย 50 เท่า ที่เวลา 5 นาที.....	56
รูปที่ 4.13 สภาพพื้นผิวหลังการสปีดเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 10 นาที.....	56

รูปที่ 4.14 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 50 เท่า ที่เวลา 10 นาที.....	57
รูปที่ 4.15 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 15 นาที.....	57
รูปที่ 4.16 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 15 นาที.....	58
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ต้องการเคลือบ ก่อนและหลัง กระบวนการเคลือบ	59
รูปที่ 4.18 อัตราส่วน ขององค์ประกอบธาตุที่เปลี่ยนแปลง ก่อนและหลังการกระบวนการเคลือบ ...	61
รูปที่ 4. 19 Mapping.....	62
รูปที่ ก. 1 รูปแบบในการเชื่อมเชื่อมต่อหน้าแปลนและคุณสมบัติ.....	69
รูปที่ ก. 3 ขนาดของหน้าแปลน.....	70
รูปที่ ก. 4 ชนิดและขนาดของ โอริง.....	71
รูปที่ ก. 5 หน้าแปลนขนาดใหญ่ สำหรับช่องมอง .....	72
รูปที่ ก. 6 หน้าแปลน สำหรับจุดต่อขั้วไฟฟ้า .....	73
รูปที่ ก. 7 ชนิดแคล้ม และขนาด .....	74
รูปที่ ก. 8 องค์ประกอบและคุณสมบัติของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304 .....	76
รูปที่ ข. 1 แบบแปลน R-001.....	77
รูปที่ ข. 2 แบบแปลน R-002 .....	77
รูปที่ ข. 3 แบบแปลน R-003 .....	78
รูปที่ ข. 4 แบบแปลน R-004 .....	78
รูปที่ ข. 5 แบบแปลน R-005 .....	79
รูปที่ ข. 6 แบบแปลน R-006 .....	79
รูปที่ ข. 7 แบบแปลน R-007 .....	80
รูปที่ ข. 8 แบบแปลน R-008 .....	80
รูปที่ ข. 9 แบบแปลน R-009 .....	81
รูปที่ ข. 10 แบบแปลน R-010 .....	81
รูปที่ ข. 11 แบบแปลน R-011 .....	82
รูปที่ ข. 12 แบบแปลน R-012 .....	82
รูปที่ ข. 13 แบบแปลน R-013 .....	83

รูปที่ ข. 14 แบบแปลน R-014 .....	83
รูปที่ ข. 15 แบบแปลน R-015 .....	84
รูปที่ ข. 16 แบบแปลน R-016 .....	84
รูปที่ ข. 17 แบบแปลน R-017 .....	85
รูปที่ ข. 18 แบบแปลน R-018 .....	85
รูปที่ ข. 19 แบบแปลน C-001 .....	86
รูปที่ ข. 20 แบบแปลน SS-001 .....	86
รูปที่ ข. 21 แบบแปลน S-001 .....	87
รูปที่ ข. 22 แบบแปลน S-002 .....	87
รูปที่ ข. 23 แบบแปลน S-003 .....	88
รูปที่ ข. 24 แบบแปลน T-001 .....	88
รูปที่ ข. 25 แบบแปลน T-002 .....	89
รูปที่ ข. 26 แบบแปลน T-003 .....	89
รูปที่ ข. 27 แบบแปลน T-004 .....	90
รูปที่ ข. 28 แบบแปลน H-001 .....	90
รูปที่ ข. 29 แบบแปลนประกอบของเครื่อง .....	91
รูปที่ ข. 30 ส่วนประกอบเครื่องที่เสร็จสมบูรณ์ .....	91
รูปที่ ข. 31 ด้านหน้าเครื่อง .....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะเห็นได้จากความต้องการทางค้าอุตสาหกรรม การขนส่งและภาคประชาชน ที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับการขยายตัวของความต้องการนี้ เทคโนโลยีนิวเคลียร์จึงถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีขีดความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมหาศาล พลังงานนิวเคลียร์เมื่อเทียบกับมาตรฐานความปลอดภัยโรงไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ก็ถือได้ว่ามีความปลอดภัยสูงมากสำหรับกระบวนการควบคุมดูแล แต่บางครั้งเหตุการณ์ทางธรรมชาติก็อาจเกิดได้โดยไม่คาดคิด เช่น เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ณ โรงไฟฟ้าฟูกูชิมะ ไดอิจิ (Fukushima Daiji Power Plant) เมื่อ วันที่ 11 มีนาคม 2553 อันเป็นผลกระทบจากคลื่นสึนามิ (Tsunami) และแผ่นดินไหวที่บริเวณใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้า ทำให้ระบบหล่อเย็น (Coolant System) ภายในเตาปฏิกรณ์ (Reactor) ได้รับความเสียหายจนไม่สามารถหล่อเย็นและระบายความร้อนภายในระบบได้ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นจนถึงระดับที่แกนปฏิกรณ์เริ่มหลอมละลาย และเกิดการระเบิดของก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Explosion เป็นวงกว้าง ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งในการระเบิดของก๊าซไฮโดรเจนคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของโลหะผสมเซอร์โคเนียม (Zirconium Alloy) ที่ใช้เป็นปลอกหุ้มเชื้อเพลิงภายในเตาปฏิกรณ์ โลหะผสมชนิดนี้มีคุณสมบัติที่มีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนสูงในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง อย่างไรก็ตามในสถานะที่เตาปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ หรือสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส โลหะผสมเซอร์โคเนียมจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidize) ในอัตราสูงที่บริเวณพื้นผิวของโลหะผสมนี้ ทำให้เกิดเป็นเซอร์โคเนียมออกไซด์ ( $ZrO_2$ ) หลังจากออกไซด์เริ่มมีการก่อตัวขึ้น (Oxide Nucleation) ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคของโลหะและออกซิเจนภายใต้ผิวของโลหะมากขึ้น จากสมการทางเคมีดังนี้  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$  จากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ขึ้น ซึ่งเมื่อมีปริมาณมากเพียงพอและสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ จะทำให้เกิดระเบิดไฮโดรเจนจากเหตุการณ์ของโรงไฟฟ้าฟูกูชิมะ ทำให้เล็งเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและได้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการเพื่อช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะผสมเซอร์โคเนียมซึ่งถูกใช้เป็นตัวหุ้มเชื้อเพลิง โดยการนำโลหะผสมมาดัดแปลงพื้นผิวด้วยวิธีการฝังอนุภาค (Implantation Ion) ของธาตุอื่นที่ใกล้เคียง ด้วยเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟ อิเล็กตรอนไฮโคตรอนรีโซแนนซ์เพื่อสร้างพลาสมา (Microwave plasma source) โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟพลาสมาดีซีสปีดเตอร์ริง

ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะลองปรับเปลี่ยนโดยการนำโลหะที่มีอยู่ภายในประเทศมาทำการวิจัยเพื่อทดสอบ โดยงานวิจัยนี้เน้นเรื่องการพัฒนาเครื่องมือสำหรับศึกษาถึงกระบวนการดัดแปลงและปรับเปลี่ยนโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กตรอนไฮโคตรอนเรโซแนนซ์ เป็นต้นแบบเพื่อศึกษาและวิจัยตัวแปรต่างๆ โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟพลาสมาแบบดีซีสปีดเตอร์ริง สำหรับเคลือบอนุภาคโลหะเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการนำโลหะผสมเซอร์โคเนียมมาใช้ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์โรนโซโคลตรอนเรโซแนนซ์ สำหรับเคลื่อนอนุภาคโลหะ ลงบนลงบนพื้นผิวของวัสดุ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์โรนโซโคลตรอนเรโซแนนซ์ เพื่อเคลื่อนอนุภาคบนพื้นผิวตัวอย่าง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น

1.3.2 ทดสอบการเคลือบโลหะลงบนพื้นผิวตัวอย่างและวิเคราะห์ผลการเคลือบ เช่น ความหนาของการเคลือบ อัตราการเคลือบได้

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

### 1.4.1 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1.1 ทำความเข้าใจเกี่ยวกับโลหะ ในด้านของโครงสร้างและส่วนประกอบ

1.4.1.2 ความเข้าใจกระบวนการเคลือบ โลหะ ลงบนพื้นผิวตัวอย่าง

1.4.1.3 ทำความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงในการเคลื่อนอนุภาคร่วมกับ เทคนิค คลื่นไมโครเวฟ อิเล็กทรอนิกส์โรนโซโคลตรอนเรโซแนนซ์ สร้างพลาสมา

### 1.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1.4.2.1 ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับใช้เทคนิค ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ในการเคลื่อนอนุภาคร่วมกับ เทคนิค คลื่นไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์โรนโซโคลตรอนเรโซแนนซ์ สร้างพลาสมา

1.4.2.2 ทดสอบการเคลือบโลหะลงบนพื้นผิววัสดุ

1.4.2.3 วิเคราะห์และทดสอบพื้นผิวของโลหะที่เปลี่ยนแปลง

### 1.4.3 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์โรนโซโคลตรอนเรโซแนนซ์ เพื่อกระบวนการเคลือบผิว และสามารถนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์ หรือในทางอุตสาหกรรม



## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจงานวิจัยต่างๆ จึงได้ศึกษาแนวทางเทคนิคสำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง โดยเริ่มจากเทคนิค ดีซีสปีดเตอร์ริง จากงานวิจัยของ นันทน์ วัฒนสุภิญญา, อาจารย์ ดร.ธนภรณ์ โตโสภณ และอาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์หิรัญ [1] ซึ่งพูดถึงการใช้เทคนิค ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง เพื่อศึกษาเงื่อนไขสำหรับการเคลือบฟิล์มบางมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสง และพื้นผิวของฟิล์มบาง AIZO เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาชั้นไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติและลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน และงานวิจัยของ , ผศ. บดินทร์ชาติ สุขบท , นางสาว ฉันทนา สาละวัน ,นางสาวอันชัญ หมวกงาม และนายกมล เอี่ยมพนากิจ [2] มีลักษณะงานวิจัยที่คล้ายกัน ซึ่งใช้เทคนิค ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ นำไปฝังลงบนกระจกสไลด์เพื่อตัดแปลงทางโครงสร้าง และสภาพพื้นผิว คุณสมบัติสมบัติทางแสง จากเทคนิคดังกล่าว ต้องอาศัยการแตกตัวของประจุ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดโดยการนำคลื่นไมโครเวฟ ช่วยให้ค่าการแตกตัวของประจุมีค่าเพิ่มขึ้น จึงได้ศึกษางานวิจัยของ Tengcai Ma ,Xinlu Deng ,Wenqi Lu and Jialiang Zhang [3] โดยใช้เทคนิคแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ร่วมกับ เทคนิค อิเล็กตรอนไซโคลตรอนรีโซแนนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการฝังตัวอนุภาค โดยเทียบกันระหว่างการ ใช้ แมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง กับ การใช้ เทคนิคแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ร่วมกับเทคนิค ECR และ Jun Xu , Xinlu Deng , Jialiang Zhang , Wenqi Lu and Tengcai Ma [4] โดยการใช้แหล่งกำเนิดไมโครเวฟ 2 จุด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ครอบคลุมมากขึ้นภายในกระบอกสุญญากาศทำให้สามารถเกิดการเหนี่ยวยิ่งพลามากขึ้น เมื่อเกิดการแตกตัวของประจุจากการสปีดเตอร์ริงนั้นสามารถสังเกตได้จากการวิเคราะห์ค่าของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้น ในระดับของแรงดันก๊าซที่ 0.007 Pa จะทำให้คาร์บอนไนไตรด์สังเคราะห์เกิดขึ้น จะวิธีการนี้ทำให้อัตราการฝังตัวของอนุภาคมีค่าสูงขึ้น

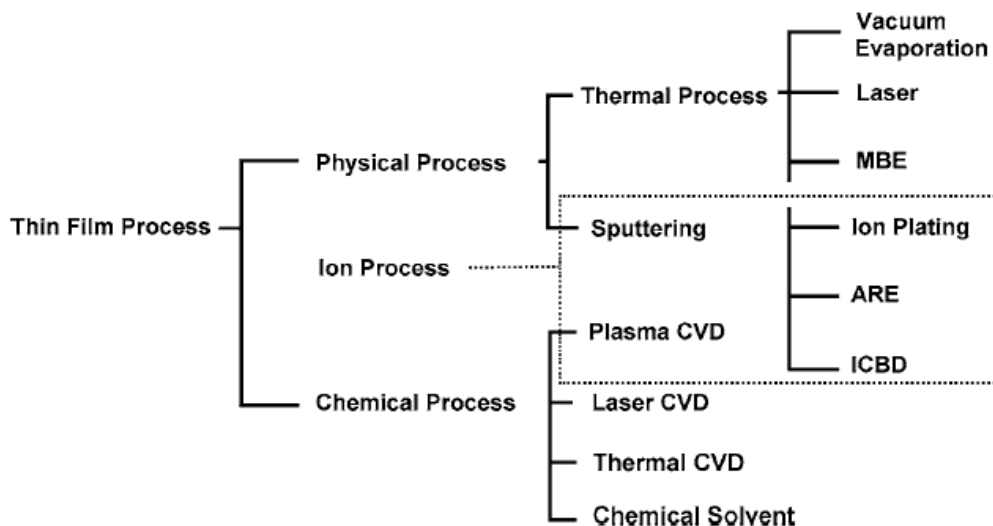
โดยที่ทุกเทคนิคมี แรงดันไฟฟ้า เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการควบคุมปริมาณการฝังตัวของอนุภาค จากงานวิจัยของ Weerasak Somkhunhot , thanusit Burinprakhon , Ian Thomas , Tosawat Seetawan and Vittaya Amornkitbambung [5] ได้ออกแบบและพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบไบโพลาร์ (Bipolar Pulsed-DC Power Supply) สำหรับการฝังฟิล์มด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง การออกแบบถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ 1. ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 2 จุด เป็นส่วนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมเฟสของการส่งกำลังไฟฟ้าให้กับวงจร 2. ส่วนในการสร้างพัลส์ (Pulsed Generator) เพื่อทำการสวิตซ์ซิ่ง (Switching) ของกำลังไฟฟ้า ทั้ง 2 จุดของวงจร 3. ส่วนที่ใช้ในการป้อนกลับของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสของวงจร และงานวิจัยของ J.F. Chang , H.Y. Ueng , T.F Young , Y.C Wang ,W.C. Hwang [6] ได้นำเทคนิคของแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ใช้ร่วมกับ เทคนิค ECR เพื่อการฝังคาร์บอนฟิล์ม (Carbon Film) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบเมื่อทำการไบอัสแรงดันลบและทำให้เกิดกระบวนการฝังตัวของฟิล์มไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ซึ่งความเร็วในการฝังตัวสามารถตรวจสอบด้วยวิธีการของ Raman Spectra และทำการวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มด้วยวิธีการของ Rocwell โดยที่ Raman Spectra แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความหนาในการฝังตัวของฟิล์มไฮโดรคาร์บอน ผลจากเทคนิคที่ทำให้เกิดความเข้มแรงสูงขึ้น ข้อมูลแต่ละงานวิจัยมีส่วนสำคัญในการออกแบบเครื่องสำหรับงานวิจัยนี้

## บทที่ 2

### เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง

#### 2.1 กระบวนการเกิดฟิล์มบาง

กระบวนการสร้างฟิล์มบาง [7] เป็นกระบวนการที่ทำให้ธาตุหรือสารประกอบจากเป้าสารเคลือบ (Target) เคลือบบนผิววัสดุรองรับหรือวัสดุที่ต้องการเคลือบ (Substrate) จะเกิดขึ้นเป็นชั้นฟิล์มที่บาง (Thin film) กระบวนการสร้างฟิล์มบางมีขั้นตอนหลัก คือ การแยกอะตอม (Atomic) , โมเลกุล (Molecular) หรือ ไอออน (Ionic) ออก โดยการส่งผ่านตัวกลางไปยังวัสดุรองรับหรือ วัสดุที่ต้องการสร้างฟิล์มบาง ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือ ทางเคมี ดังรูปที่ 2.1 [8] การเกิดรูปแบบของชั้นฟิล์มขึ้นอยู่กับกระบวนการรวมตัวของอนุภาค (Nucleation) และ กระบวนการเติบโตของชั้นฟิล์ม (Growth Process)



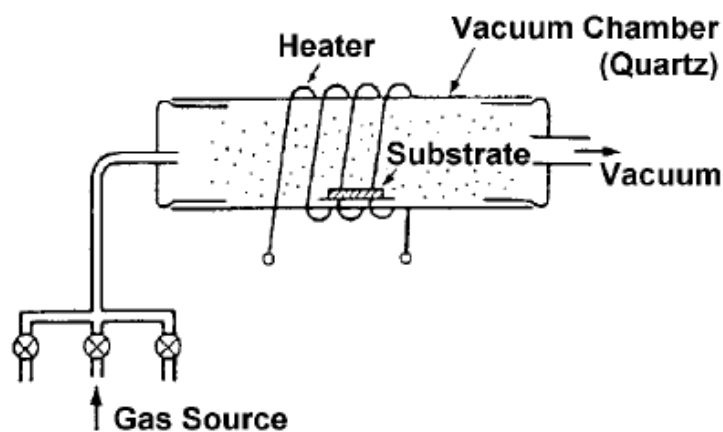
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

#### 2.1.1 กระบวนการทางเคมี

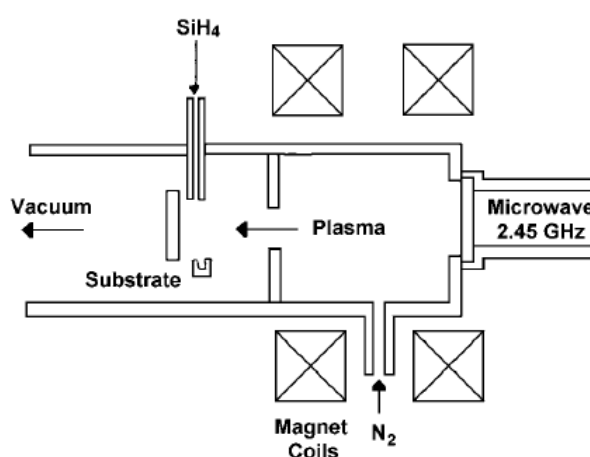
เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและการเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบลงบนแผ่นรองรับ เมื่อสารถูกทำให้กลายเป็นไอระเหยอย่างรวดเร็ว ซึ่งไอระเหยที่ได้ถูกแยกออกและแตกตัวจนถึงระดับโมเลกุล แล้วไปทำปฏิกิริยากับก๊าซส่งผลให้เกิดการฝังตัวของสารลงบนผิวของวัสดุที่ต้องการเคลือบเกิดเป็นฟิล์มบาง เราเรียกระบวนการนี้ว่า

“Thermal Chemical Vapor Deposition (CVD)” โดยทั่วไปแล้ววัสดุเป้าสารเคลือบ จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จึงเลือกใช้เทคนิคกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างเทคนิคกระบวนการทางเคมี

กระบวนการฝังอนุภาคยังถูกปรับปรุงมาเรื่อยๆจนมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาช่วยเพิ่มอัตราการแตกตัวของไอออนเพื่อลดระดับแรงดันสุญญากาศ ให้สามารถใช้ได้ในระดับประมาณ  $10^{-2}$  -  $10^{-5}$  ทอร์ และอาศัยสนามแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพลาสมาให้มีค่าสูงขึ้นโดยหลักการ สั่นพ้องของคลื่นไมโครเวฟ (Resonance) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความถี่ของการหมุนอิเล็กตรอน (Electron Cyclotron Frequency) มีค่าเท่ากับความถี่ของไมโครเวฟที่ใส่เข้าไป ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่าอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์ (Electron Cyclotron Resonance (ECR)) ดังรูปที่ 2.3 [9]



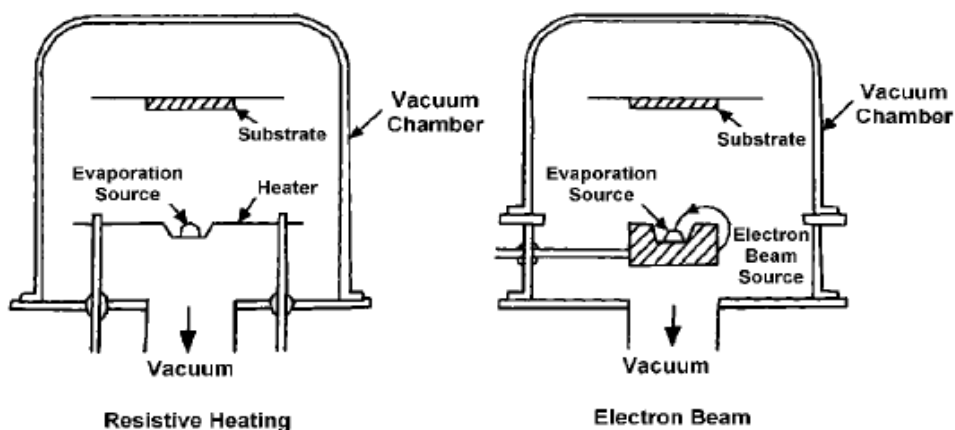
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเทคนิคอิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์

### 2.1.2. กระบวนการทางกายภาพ

เป็นการเคลือบโดยที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปยึดติดกับผิวของแผ่นรองรับโดยการใช้ความร้อน (Thermal) และ วิธีการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ในส่วนของวิธีทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก

2.1.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอระเหยสารจากความร้อน (Thermal Evaporation)

เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ ในความดันสุญญากาศที่ต่ำกว่า  $1 \times 10^{-6}$  ทอร์ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอซึ่งเมื่อไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นฟิล์มบาง ข้อเสียของเคลือบสารวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับจะไม่สูงนอกจากนี้ฟิล์มบางอาจจะได้รับการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะที่บรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ เพราะฉะนั้นวัสดุที่ใช้บรรจุสารเคลือบจะต้องทำจากโลหะที่ทนความร้อนสูง หรือ จะเป็นลักษณะที่เป็นแก้วหุ้มของ ควอตซ์ (Quartz) ,แกรไฟต์ (Graphite) ,อลูมิเนียม (Aluminum) หรือ เซอร์โคเนียม (Zirconium) ดังรูปที่ 2.4 [7]

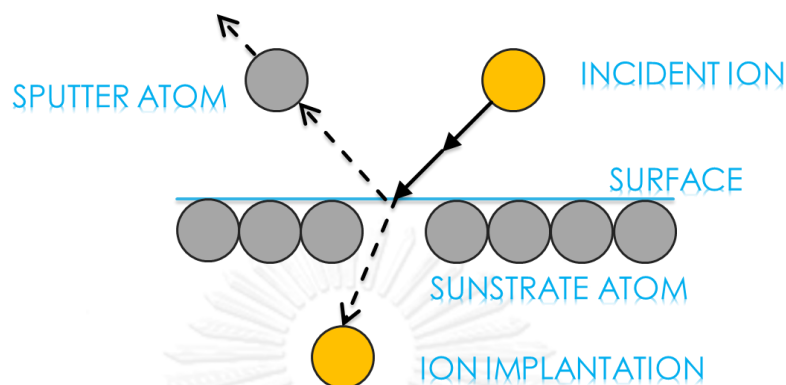


รูปที่ 2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอระเหยสารจากความร้อน

### 2.1.2.2 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

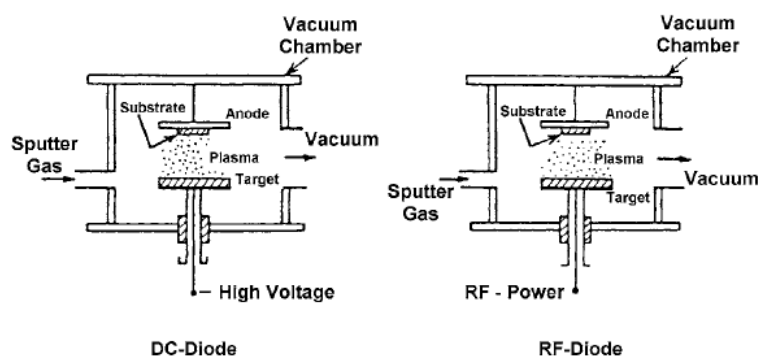
เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริง วิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไอออนของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริงวิ่งชน (Bombarded) พื้นผิวของวัสดุรองรับ ด้วยความแรงทำให้ไอออนที่ถูกเร่งให้ชนกับอะตอมของพื้นผิววัสดุรองรับที่เป็นของแข็ง (Solid) เกิดการถ่ายเทพลังงานและมีไอออนบางส่วนสะท้อนกลับ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Back-Sputtering และบางส่วนวิ่งเข้าไปฝังตัวอยู่ในวัสดุรองรับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Transmission Sputtering ดังรูปที่ 2.5 มีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางเนื่องจากไอออนที่ได้จาก

กระบวนการสปัตเตอร์ริงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีระเหยสารมาก ดังนั้นไอออนของสารเคลือบจะวิ่งกระทบกับแผ่นรองรับ แล้วสามารถฝังตัวลงในวัสดุ



รูปที่ 2.5 กระบวนการสปัตเตอร์ริง

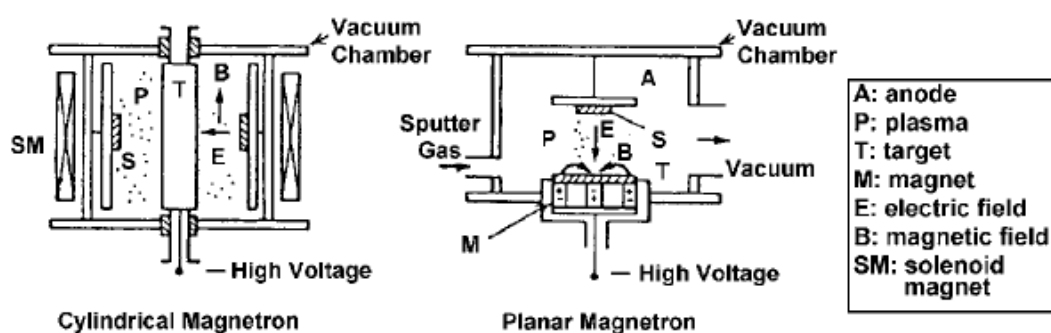
ถ้าหากทำการเปลี่ยนวัสดุของเป้าสารเคลือบจากโลหะเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นฉนวนที่ไม่นำไฟฟ้าในระบบ ดีซีสปัตเตอร์ริงจะไม่สามารถทำให้เกิดการดีสชาร์จ (Discharge) แยกตัวเป็นไอออนได้ เพราะบนพื้นผิวของวัสดุ ไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้แต่สามารถเปลี่ยนเทคนิคการป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบ อาร์เอฟ โวลต์เตจ (RF Voltage) แทนที่จะเป็น ดีซีโวลต์ (DC Voltage) ซึ่งเรียกอีกชื่อว่า อาร์ เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริง (RF Diode Sputtering) ใช้งานสำหรับ วัสดุเป้าสารเคลือบเป็น ฉนวนหรือไม่นำไฟฟ้าเท่านั้น โครงสร้างระหว่าง ดีซี และ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างระบบ ดีซี และ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง

แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Magnetron Sputtering) ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ที่ติดตั้งไว้บนขั้วแคโทด ซึ่งจัดวางขนานกับผิววางวัสดุเป้าสารเคลือบ เมื่อเกิดโกลว์ดีสชาร์จ (Glow Discharge) บริเวณผิวหน้าของวัสดุเป้า สนามแม่เหล็กจะทำให้ อิเล็กตรอนมีลักษณะการเคลื่อนที่หมุนเป็นเกลียว (Cyclonical Motion) โดยตรงกลางของวงโคจรของอิเล็กตรอนที่

หมุนเป็นเกลียวเกิดการจะมีการเคลื่อนที่ โดยมีความเร็วของการเคลื่อนที่ และทิศทางตามแนวของ  $\vec{E} \times \vec{B}$  สนามแม่เหล็ก จะเป็นตัวกำหนดทางเดินของอิเล็กตรอนอยู่บริเวณที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยให้เกิดอัตราการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซ ให้มีค่าสูงขึ้นนอกจากนี้สนามแม่เหล็กในระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงนั้น ยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นของพลาสมา (Plasma Density) ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดบนวัสดุเป้าสารเคลือบเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการเกิดสปัตเตอร์ริงบนผิวของวัสดุเป้าสารเคลือบ เพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงดังรูปที่ 2.7 [7]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง

ไอออน-บีม สปัตเตอร์ริง (Ion Beam Sputtering) ในระบบของการโกลด์ติสซาร์จ โมเลกุลก๊าซถูกสปัตเตอร์ริง โดยการยิงลำแสงไปที่วัสดุเป้าสารเคลือบ โดยแหล่งจ่ายพลังงานไอออน (Ion Source) มีค่ากระแสอยู่ระหว่าง 10 ถึง 500 mA ที่พลังงานไอออน มีค่า 0.5 ถึง 2.5 kV ทำงานที่ความดันสุญญากาศ  $1 \times 10^{-5}$  ทอร์

## 2.2 เงื่อนไขของการฝังตัวอนุภาคเป็นฟิล์มบาง

การฝังตัวของอนุภาคให้เกิดฟิล์มบางโดยส่วนมากจะใช้เทคนิคการระเหย (Evaporation) , การสปัตเตอร์ริง และ กระบวนการทางเคมี โดยธรรมชาติการฝังตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรของการฝังตัว ซึ่งรวมถึงอัตราการฝังตัว (Deposition Rate) , อุณหภูมิของวัสดุที่ต้องการเคลือบ , ชนิดของวัสดุที่ต้องการเคลือบ และ ความดันบรรยากาศ ขณะเกิดการฝังตัวของอนุภาค โมเลกุลก๊าซในชั้นบรรยากาศ มีส่วนในการเกิดฟิล์มบาง โดยปฏิกิริยาการเกิดชั้นฟิล์มบางเกิดจากการระเหยของวัสดุที่ต้องการเคลือบ หรือ การแตกตัวและ โมเลกุลของก๊าซ ภายในบรรยากาศ เช่น ฟิล์มของ ออกไซด์ โลหะ จะเกิดจาก ปฏิกิริยาระหว่างโลหะ กับก๊าซ ออกซิเจน มีพารามิเตอร์ของการฝังตัวอนุภาคของธาตุต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.8 [7]

1	METAL		METAL SEMICONDUCTOR										SEMI-METAL NON-METAL				He <sup>2</sup> 4.0026			
	I a	II a	III b	IV b	V a	VI a	VI b	VII	I b	II b	III b	IV b	V b	VI b	VII b					
2	Li <sup>3</sup> 6.94 0.53 133 *404 bcc	Be <sup>2</sup> 9.0122 1.85 183 *497 hcp	Na <sup>1</sup> 22.9898 0.97 97.9 *93 bcc	Mg <sup>2</sup> 24.312 1.74 174 *127 hcp	Al <sup>3</sup> 26.9815 2.70 118.7 *190 fcc	Si <sup>4</sup> 28.0855 2.33 112 *112 diamond type	Ge <sup>4</sup> 72.63 5.32 112 *112 diamond type	Sn <sup>4</sup> 118.710 7.27 112 *112 diamond type	Pb <sup>4</sup> 207.2 11.34 112 *112 diamond type	Cd <sup>2</sup> 112.411 8.65 147 *147 hcp	Zn <sup>2</sup> 65.38 7.14 147 *147 hcp	Al <sup>3</sup> 26.9815 2.70 118.7 *190 fcc	Si <sup>4</sup> 28.0855 2.33 112 *112 diamond type	Ge <sup>4</sup> 72.63 5.32 112 *112 diamond type	Sn <sup>4</sup> 118.710 7.27 112 *112 diamond type	Pb <sup>4</sup> 207.2 11.34 112 *112 diamond type	Cd <sup>2</sup> 112.411 8.65 147 *147 hcp	Zn <sup>2</sup> 65.38 7.14 147 *147 hcp	He <sup>2</sup> 4.0026	
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
LANTHANIDE																				

รูปที่ 2.8 พารามิเตอร์สำหรับการฝังตัวของธาตุต่างเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการฝังตัวของอนุภาค

การฝังตัวของอนุภาคของฟิล์มบางพิจารณาจากอัตราการสร้างฟิล์มบาง (Growth Rate) จากทฤษฎี การเคลื่อนที่ของก๊าซ (Kinetic Theory of Gas) มีสมการดังนี้

$$N_0 = 3.5 \times 10^{22} \rho_0 \left(\frac{M}{T}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

หรือ

$$m_e = 5.8 \times 10^{-2} \rho_0 \left(\frac{M}{T}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

โดยที่

$p_0$  คือ ความดันก๊าซ (torr)

$M$  คือ น้ำหนักของโมเลกุลก๊าซ

$T$  คือ อุณหภูมิของ โมเลกุลก๊าซที่เกิดการระเหย

$m_e$  คือ น้ำหนักของอิเล็กตรอนที่ตกลงบนแผ่นวัสดุเป้าสารเคลือบ

ถ้าเรามองโมเลกุลทั้งหมดที่ถูกฝังลงบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ โดยไม่มีการหลุดออกมาจะทำให้ได้อัตราการสร้างฟิล์มบางมีค่าเป็นสมการดังนี้

$$D = 5.8 \times 10^5 \frac{\rho_0 \left(\frac{M}{T}\right)^{\frac{1}{2}}}{p} \quad (2.3)$$

โดยที่

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของฟิล์มบาง

ในกระบวนการใช้ความร้อนมาใช้ทำให้วัสดุเป้าสารเคลือบระเหย ส่วนมากจะทำงานที่อุณหภูมิสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะ ให้มีค่าจุดหลอมละลายใกล้เคียงกับวัสดุที่ทำเป็นเป้าสารเคลือบ ดังรูปที่ 2.8 [7] ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของธาตุที่เปลี่ยนแปลงเป็นไอได้อัตราการฝังตัวของอนุภาค (Deposition Rate) มีสมการดังต่อไปนี้

$$R = a \exp\left(\frac{Q}{kT_e}\right) \quad (2.4)$$

โดยที่

$R$  คือ อัตราการฝังตัวของอนุภาค

$T_e$  คือ ค่าอุณหภูมิที่น้อยที่สุดสำหรับการสร้างฟิล์มบาง

$Q$  คือ พลังงานที่ใช้สำหรับการสร้างฟิล์มบางมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขการฝังตัวของอนุภาคและคุณสมบัติของผลึก

$k$  คือ คีอคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ  $8.31 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$



### 2.3 การดิสชาร์จภายในก๊าซ

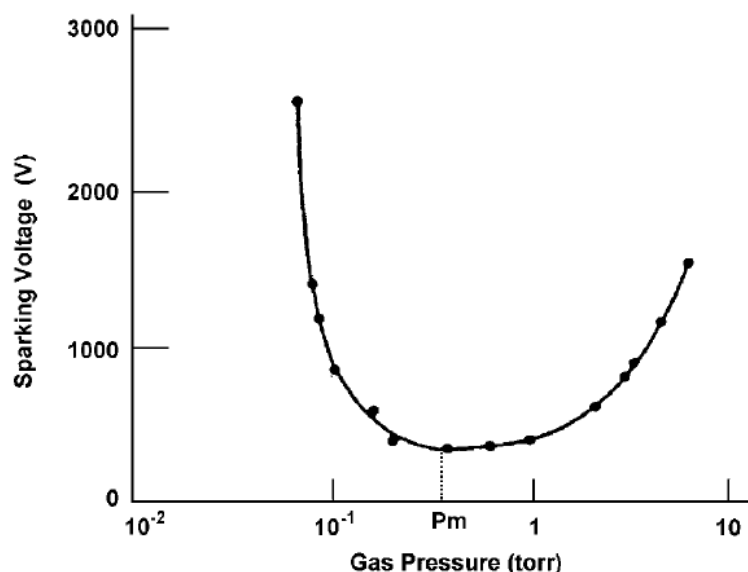
ภายในหลอดก๊าซสำหรับการดิสชาร์จค่าแรงดันที่น้อยที่สุดในการดิสชาร์จหรือเรียกอีกอย่างว่า เบรกดาวดิสชาร์จ (Breakdown Discharge) จะมีสมการดังนี้

$$V_S = a \left[ \frac{pl}{\log pl + b} \right] \quad (2.5)$$

โดยที่

- $p$  คือ ความดันของก๊าซ
- $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด
- $a$  คือ ค่าคงที่
- $b$  คือ ค่าคงที่

ความสัมพันธ์ระหว่าง เบรกดาวโวลต์เทจ  $V_S$  และ ความดันของก๊าซ  $p$  เรียกว่า Paschen's Law มีลักษณะโดยทั่วไปดังรูปที่ 2.9 ให้เห็นค่าแรงดันเบรกดาวที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัว ณ ค่าของความดันก๊าซ  $p_m$  [10]



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาว กับ ความดันของก๊าซภายในสุญญากาศ

เมื่อเกิดการดิสชาร์จเริ่มต้นขึ้นระหว่างความดันก๊าซที่ต่ำและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีความต้านทานสูง (High-Impedance) เนื่องจากอยู่ภายใต้ความดันสุญญากาศโดยการดิสชาร์จจะแปรผันตามกระแสไฟฟ้ในการดิสชาร์จ (Current Discharge)

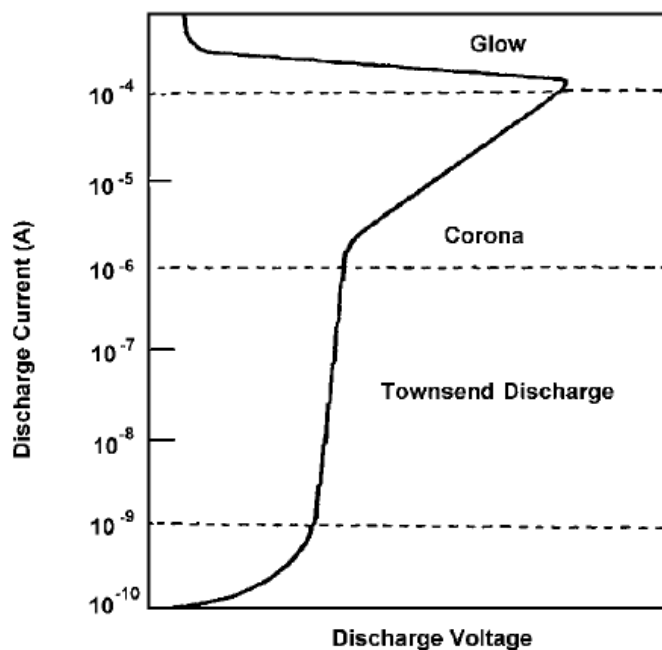
ที่กระแสดิสชาร์จมีค่าต่ำกว่า 0.1 mA/cm<sup>2</sup> การโกลว์ดิสชาร์จจะอยู่ในโหมด Townsend Discharge มีลักษณะเป็นกระแสต่อเนื่องมีค่ากระแสค่อนข้างน้อยมากจนอาจจะไม่สามารถรักษาสภาพเอาไว้ได้ (Non-Self Sustain) ไอออนบวกถูกสร้างขึ้นบริเวณใกล้ขั้วแอโนด เพิ่มจำนวนมากขึ้นจะเกิดวิ่งข้ามช่องว่างและรวมตัวเป็นกลุ่มของประจุบวกขึ้น

ที่กระแสดิสชาร์จมีค่าสูงกว่า  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  จะเกิดการเรืองแสง (Luminous Glow) ที่บริเวณใกล้ขั้วของแคโทด โดยเรียกส่วนนี้ว่า Glow Discharge ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับกลุ่มประจุบวกที่เกิดขึ้น

ที่บริเวณสุดท้ายของการเกิด Glow Discharge กระแสจะมีค่าต่ำ มีบางส่วนเรืองแสงครอบคลุมบนผิวของขั้วแคโทด เรียกส่วนนี้ว่า Normal Glow Discharge เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสสูงขึ้นจะทำให้เกิดการเรืองแสงครอบคลุมขั้วแคโทดทั้งหมดทั่วพื้นที่ เรียกส่วนนี้ว่า Abnormal Glow Discharge กระแสที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  มีผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาอยู่โดยรอบขั้วของแคโทด จึงเกิดการถ่ายเทประจุระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดขึ้น

## 2.4 กระบวนการไอออไนเซชัน

กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization Process) ในก๊าซดิสชาร์จจะมีลักษณะดังนี้ ช่วงเริ่มต้นของการดิสชาร์จ อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ภายในสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าและเมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่ามากเกินกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลก๊าซ อิเล็กตรอนที่ชนกับโมเลกุลก๊าซ จะสามารถทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของก๊าซหลุดออกได้ ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนนั้นอยู่ในสภาพเป็นไอออนบวก ไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกดึงดูดให้วิ่งไปชนเข้ากับผิวด้านหน้าของแผ่นเป้าเคลือบ ทำให้อิเล็กตรอนส่วนที่สองหลุดออกมาพร้อมกับไอออนของเป้าสารเคลือบ ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาก็จะทำปฏิกิริยาไอออไนเซชันไปจนเกิดเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ เมื่อกระแสดิสชาร์จมีค่าต่ำกว่า  $10^{-9}$  แอมป์ จะทำให้พลังงานไม่เพียงพอสำหรับการไอออไนเซชันดังรูปที่ 2.10 [11] จึงแสดงให้เห็นว่ากระแสต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $10^{-9}$  แอมป์ จึงจะเกิดพลาสมาได้



รูปที่ 2.10 เส้นแบ่งลักษณะของก๊าซในโหมดต่างๆที่เกิดการดิสชาร์จตาม  
ค่ากระแสดิสชาร์จที่เปลี่ยนแปลง

## 2.5 ดีซี สปัตเตอร์ริง

ระบบดีซี สปัตเตอร์ริง ประกอบด้วยแผ่นขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ด้านหนึ่งเป็นขั้วแคโทด (Cathode) และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งด้านที่ทำให้เกิดพลาสมาขึ้นอยู่ด้านบนของขั้วแคโทดซึ่งถูกวางด้วยวัสดุเป้า (Target Material) และด้านล่างของวัสดุเป้าจะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่วนวัสดุที่ต้องการเคลือบผิว (Substrate) จะอยู่บนขั้วของแอโนด เมื่อภายในกระบอกสุญญากาศถูกเก็บด้วยก๊าซอาร์กอน (Argon gas) ที่ 0.1 ทอร์ และเกิดไฟฟ้าแรงสูงหลายกิโลโวลต์ภายในซึ่งถูกต่ออนุกรมไว้กับตัวต้านทานขนาด 1-10 กิโลโอห์ม ทำให้เกิดแรงดันที่วิ่งผ่านระหว่างสองขั้ว เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดโกลด์ิสชาร์จ (Glow Discharge) ซึ่งการประจุของอาร์กอนในย่านโกลด์ิสชาร์จ จะถูกเร่งให้ชนกับวัสดุเป้าที่ขั้วแคโทดเพื่อให้เกิดการสปัตเตอร์ที่กับวัสดุเป้า ทำให้ประจุของวัสดุเป้าหลุดออกมาฝังตัวลงบนวัสดุที่ต้องการเคลือบผิวทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้น

ในระบบดีซี สปัตเตอร์ริง การสปัตเตอร์ของอนุภาคที่เกิดการชนกันกับโมเลกุลของก๊าซและในที่สุดจะถูกแพร่ออกไปลงบนวัสดุที่ต้องการเคลือบผิวภายใต้ความดันก๊าซที่สูงและระยะการเคลื่อนตัวของประจุที่ไม่ชนกับอนุภาคอื่น (Mean free path) ของการสปัตเตอร์น้อยกว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้า จำนวนอนุภาคที่ฝังตัวลงบนวัสดุจากการสปัตเตอร์เป็นพื้นที่  $W$  มีสมการดังนี้ [12]

$$W = \frac{k_1 W_0}{pl} \quad (2.6)$$

และ อัตราการฝังตัว  $R$  มีหน่วยเป็น nm/s มีสมการดังนี้

$$R = \frac{W}{t} \quad (2.7)$$

โดยที่

- $k_1$  คือ ค่าคงที่ของ Stoichiometrical
- $W_0$  คือ จำนวนของอนุภาคที่ออกจากขั้วแคโทด
- $p$  คือ ความดันก๊าซ (torr)
- $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด (mm)
- $t$  คือ เวลาในการสปัตเตอร์ (sec.)

จำนวนอนุภาคของการสputter จากแคโทด  $W_0$  มีสมการดังนี้

$$W_0 = \left(\frac{j_+}{e}\right) St \left(\frac{A}{N}\right) \quad (2.8)$$

โดยที่

- $j_+$  คือ ค่ากระแสความหนาแน่นของไอออนบนขั้วแคโทด ( $A/m^2$ )
- $e$  คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (C)
- $S$  คือ ปริมาณของการสputter (Sputter Yield)
- $A$  คือ ค่าน้ำหนักอะตอมของวัสดุที่ถูกสputter (amu)
- $N$  คือ เลข อะโวกาโด (Avogadro's number)

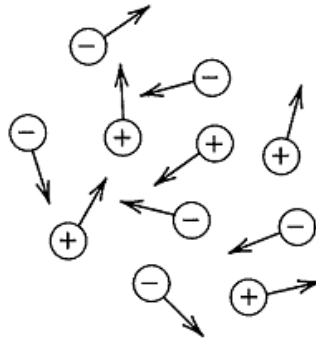
## 2.6 พลาสมา

สสารโดยทั่วไป แบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ ได้แก่ สถานะของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ แต่พลาสมาถือว่าเป็น สถานะสสารที่ 4 ดังรูปที่ 2.11 สภาวะของพลาสมาเกิดจาก สภาวะที่ก๊าซเกิดการแตกตัว ประกอบด้วย อิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคของก๊าซ โดยเพิ่มอุณหภูมิให้กับก๊าซต่อไปเรื่อยๆ จนอุณหภูมิสูง ณ ค่าหนึ่งๆ จะทำให้ก๊าซนั้นกลายเป็นพลาสมา ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ ทำให้พลาสมามีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า



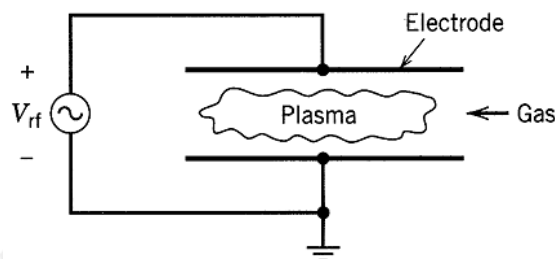
รูปที่ 2.11 สถานะของสสาร

อนุภาคของพลาสมาทุกตัวกระทำต่ออนุภาคซึ่งกันและกัน เรียกว่าเป็นพฤติกรรมรวม (Collective behavior) เนื่องจากพลาสมาอยู่ในสถานะสมดุล ดังรูปที่ 2.12 [9] ทำให้ประจุบวกและประจุลบตัวอยู่เป็นกลุ่มลักษณะคล้ายกลุ่มก๊าซ เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าโดยผ่านก๊าซที่เป็นกลาง พลังงานจะส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระทำให้ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานที่มากพอวิ่งเข้าชนกับอะตอมของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของก๊าซเป็นอิเล็กตรอนอิสระ กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเพิ่มมากขึ้นจน ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาในที่สุด



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของไอออนในพลาสมาที่สถานะสมดุล

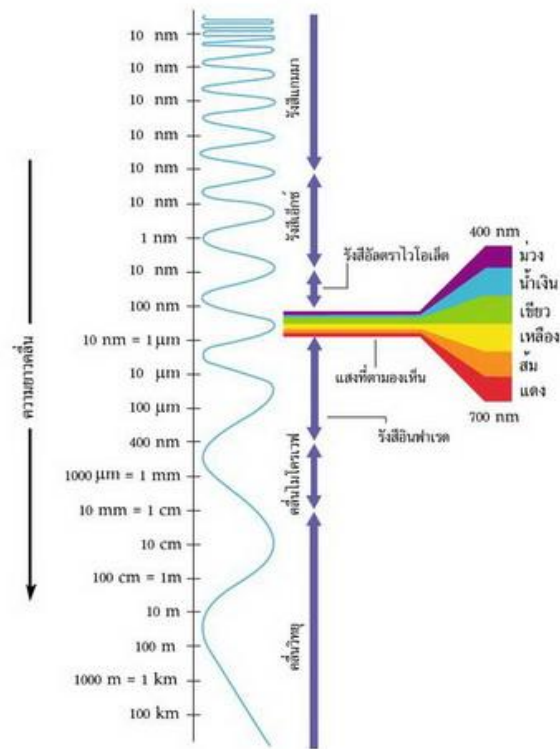
การเกิดพลาสมาในห้องสุญญากาศ ซึ่งมีก๊าซไหลผ่านในความดันที่ต่ำมากๆ อะตอมของก๊าซในสุญญากาศ อาศัยการชนของอิเล็กตรอนอิสระ โดยคลื่นวิทยุหรือคลื่นไมโครเวฟทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์ไปชนกับอะตอมของก๊าซ โดยที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าพลังงานไอออนไนเซชัน ดังรูปที่ 2.13 [9]



รูปที่ 2.13 พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสุญญากาศ

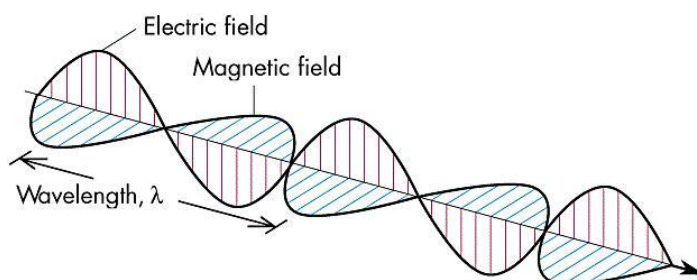
## 2.6 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ ถือได้ว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves or EM) ซึ่งมีส่วนประกอบของ คลื่นไฟฟ้า และ คลื่นแม่เหล็ก ที่ทำมุมตั้งฉากกัน ดังรูปที่ 2.14 [13] โดยที่ แสงที่ตามองเห็น (Visible light) ก็เป็น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร ส่วนคลื่นไมโครเวฟ มีความยาวคลื่นในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2 14 ชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยที่คลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยเกิดจากการสะท้อน ส่งผ่าน หรือ ดูดกลืน โดยที่เมื่อผ่านตัวกลาง ถ้าตัวกลางมีลักษณะเป็นโลหะ จะสามารถสะท้อนคลื่นได้ และวัสดุที่เป็นอโลหะ เช่น แก้ว กระจกและพลาสติกจะยอมให้คลื่นไมโครเวฟผ่านไปบางส่วน แต่ถ้าวัสดุที่เป็นเหล็ก ก๊าซ หรือ วัสดุที่มีความชื้นจะดูดกลืนพลังงานจากไมโครเวฟไว้ทั้งหมด โดยที่พลังงานจะเปลี่ยนเป็นความร้อน แทน โดยการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟนั้น จะผ่านท่อนำคลื่น (Waveguide) [14] โดยมีรูปแบบการเกิดคลื่นในท่อนำคลื่น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse electric wave : TE) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศการแพร่กระจายของคลื่น โดยที่สนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่นและรูปแบบสนามแม่เหล็กตัดขวาง (Transverse magnetic wave : TM) มีลักษณะไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางการกระจายของคลื่น โดยที่สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2 15 ลักษณะของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางเสมอไป จึงทำให้คลื่นที่เดินทางในสุญญากาศมีอัตราเร็ว ประมาณเท่ากับความเร็วของแสง คือ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที แทนอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [15] ดังสมการ

$$C = \lambda f \quad (2.6)$$

โดยที่

- $C$  คือ อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $3 \times 10^8$  m/s)
- $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (m)
- $f$  คือ ความถี่ของคลื่น (Hz)

โดยที่สามารถหาความยาวคลื่นได้จากสมการที่ 2.6 เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความยาวของกระบอกสุญญากาศสำหรับเรโซแนนซ์

## บทที่ 3

### การพัฒนาเครื่องไมโครเวฟดีซีสปัตเตอร์ริง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุ โดยการมองเห็นปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการศึกษาฟิล์มบาง จึงต้องทำการจำลองกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยการนำค่าตัวแปรต่างๆ มาออกแบบเพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับทดลองถึงความเป็นไปได้ในการควบคุมตัวแปรเพื่อนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงวัสดุให้มีความทนทาน และ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติให้ดีขึ้นต่อไป โดยอาศัยวัสดุที่หาได้ภายในประเทศและ และมีราคาประหยัด พร้อมทั้งความยืดหยุ่นในการดัดแปลงและปรับเปลี่ยนตามลักษณะการทดลอง โดยมีการขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

#### 3.1 โครงสร้างพื้นฐานสำหรับการออกแบบเครื่องไมโครเวฟดีซีสปัตเตอร์ริง

เครื่องไมโครเวฟดีซีสปัตเตอร์ริง ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายส่วน ซึ่งการทดลองนี้จึงต้องออกแบบในแต่ละส่วนเพื่อจำกัดขอบเขตในการทดลองให้ได้ตามวัตถุประสงค์ตั้งต้น โดยที่ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 ชุดกระบอกสุญญากาศหลัก (Main chamber)

เป็นส่วนหลักสำหรับการทดลอง ซึ่งภายในประกอบด้วย ชุดวัสดุเป้าสารเคลือบ ,ชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ และ ชุดเรโซแนนซ์สำหรับคลื่นไมโครเวฟ

##### 3.1.2 ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply system)

เป็นส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ชุดเป้าสารเคลือบและชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้วิ่งชนกับอนุภาคของอาร์กอนเกิดเป็นจุดเริ่มต้นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางขึ้น

##### 3.1.3 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)

เป็นส่วนที่ทำให้ส่วนโครงสร้างหลักมีลักษณะเป็นสุญญากาศเพื่อใช้ในการทดลองการเคลือบฟิล์มบาง และเป็นปัจจัยหลักสำหรับค่าตัวแปรในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วย

##### 3.1.4 ระบบจ่ายคลื่นไมโครเวฟ (Microwave supply system)

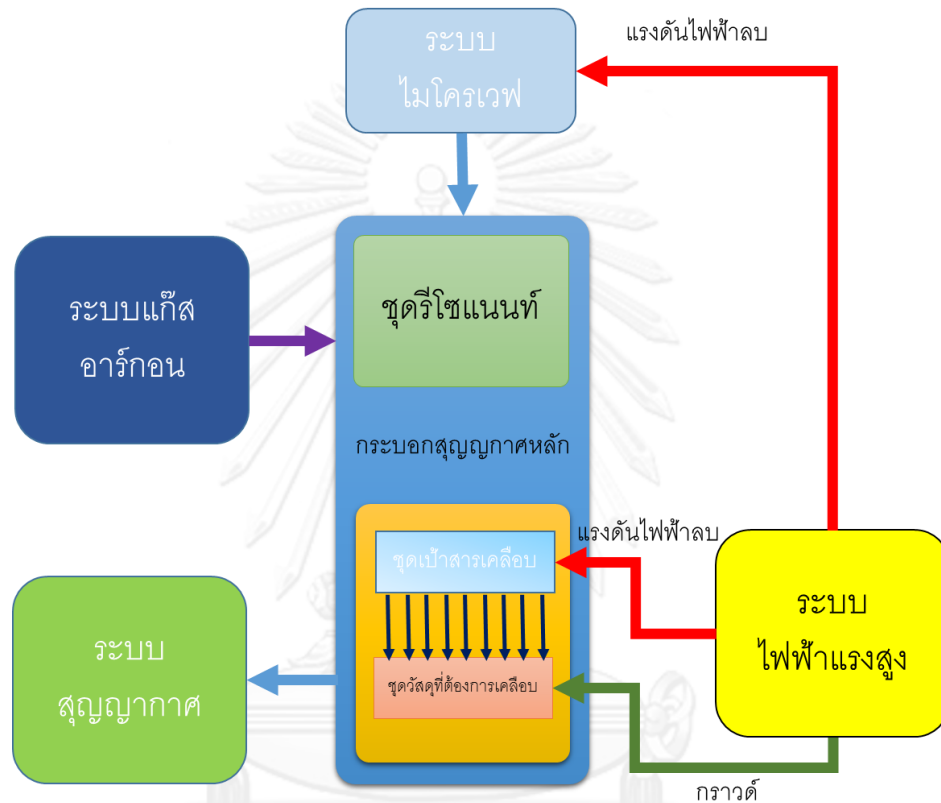
เพื่อศึกษากระบวนการและลักษณะที่เปลี่ยนแปลงสำหรับการเปรียบเทียบกับเทคนิคดีซีสปัตเตอร์ริง โดยคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคของวัสดุเป้ากับอนุภาคของอาร์กอนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มระยะการเดินทางของอิเล็กตรอน (Mean free path) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการชนมากขึ้น

##### 3.1.5 ระบบก๊าซอาร์กอน (Argon supply system)

ก๊าซอาร์กอนเป็นปัจจัยหลักให้เกิดกระบวนการเคลือบฟิล์ม เมื่อให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นกลาง และพลังงานส่งไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมของก๊าซและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุอย่างรวดเร็ว และทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ปริมาณก๊าซอาร์กอนจึงเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซและกลายเป็นพลาสมา



อุปกรณ์แต่ละส่วนถูกประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.1 ส่วนโครงสร้างหลักจะถูกติดตั้งใน 2 ส่วน ด้านล่างและด้านบน ส่วนด้านล่างจะเชื่อมต่อกับระบบสุญญากาศและระบบไฟฟ้าแรงสูงสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้า ส่วนด้านบนจะเชื่อมต่อกับระบบไมโครเวฟและระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน โดยที่ส่วนด้านบนและด้านล่างจะถูกเชื่อมติดกันด้วยหน้าแปลนและมีสกรูและ นอตเป็นตัวยึดซึ่งเป็นจุดที่ใช้สำหรับการเปลี่ยน วัสดุเป้าและวัสดุที่ต้องการเคลือบ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดพลาสมาไมโครเวฟ ดีซีสปัตเตอร์ริง

### 3.2 ชุดกระบอกสุญญากาศหลัก

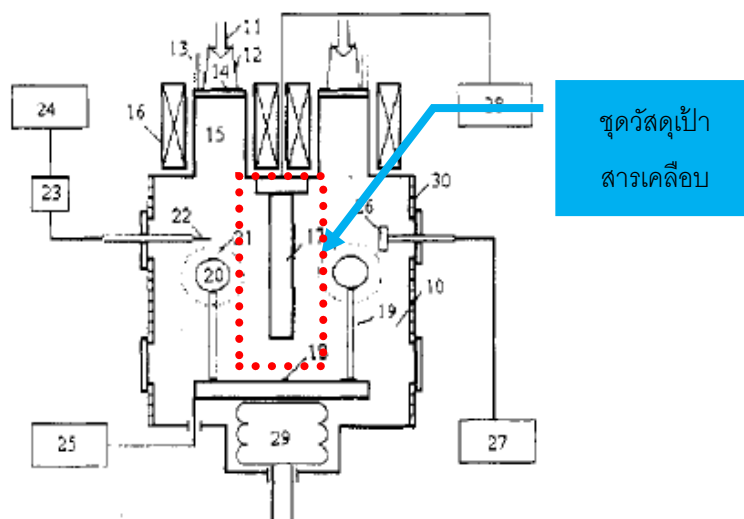
กระบอกสุญญากาศหลัก เป็นส่วนประกอบหลักสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องนำชิ้นงานเข้าไปทดสอบและศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงต่างๆสำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งมีหลักการออกแบบดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 เงื่อนไขการออกแบบชุดกระบอกสุญญากาศหลัก

ในส่วนเริ่มต้นการออกแบบนั้นผู้วิจัยได้กำหนดขนาดชิ้นงานทดลอง (Sample) ที่ใช้สำหรับเป็นวัสดุที่ต้องการเคลือบ (Substrate) โดยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เพื่อศึกษาเท่านั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้มีขนาดใหญ่ และมีความหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร เพราะการนำไปตัดเพื่อวัดความหนาของชั้นฟิล์มง่ายกว่าชิ้นงานที่ความหนามาก โดยใช้

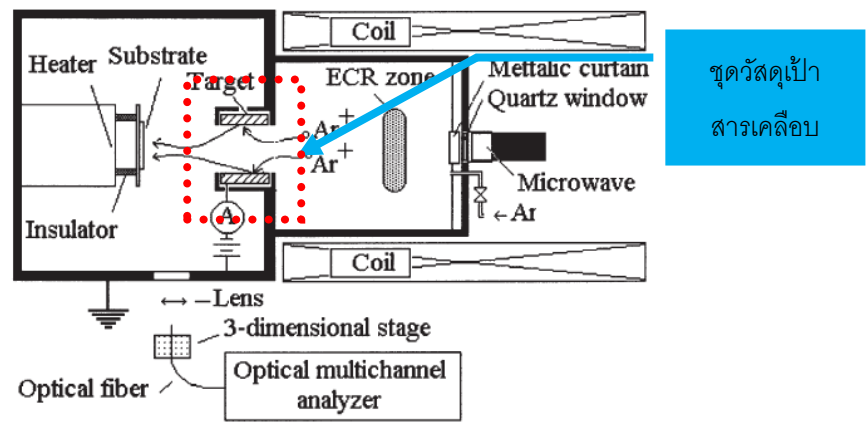
การทดสอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM )

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้มองถึงข้อจำกัดในส่วนของ ชุดวัสดุเป้าสารเคลือบ (Target set) โดยปกติถ้าเป็นระบบดีซี สปีตเตอร์ริง ชุดวัสดุเป้าสารเคลือบจะถูกวางขนานกับชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ เพื่อให้อนุภาคของเป้าสารเคลือบเพิ่มโอกาสในการฝังตัวลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการเคลือบได้มากขึ้น แต่ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปัจจัยในกระบวนการเคลือบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ นั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจาก มีชุดวัสดุเป้าสารเคลือบวางขวางกั้นบริเวณทางผ่านของคลื่นทำให้คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถลงมาถึงพื้นระหว่าง เป้าสารเคลือบและวัสดุที่ต้องการเคลือบได้ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิธีการออกแบบโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Tengcai Ma ,Xinlu Deng ,Wenqi Lu และ Jialiang Zhang [3] เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบความสามารถในการเคลือบฟิล์มบางของ เทคนิค แมกนีตรอน สปีตเตอร์ริง (Magnetron Sputtering) และ แมกนีตรอน สปีตเตอร์ริง อิเล็กตรอนไซโคลตรอน เรโซแนนซ์ (Magnetron Sputtering with ECR) โดยมีการใช้คลื่นไมโครเวฟ และมีการติดตั้งชุดวัสดุเป้าสารเคลือบไว้ตรงกลางมีลักษณะเป็นแท่งยาวอยู่ระหว่าง กระบอกสุญญากาศ 2 ชุด ดังรูปที่ 3.2



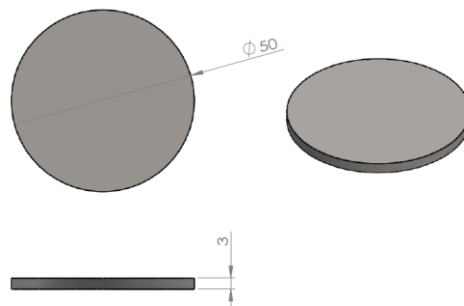
รูปที่ 3.2 การออกแบบเครื่องในงานวิจัยของ Tengcai Ma และคณะ

และงานวิจัยของ C.P Lungu และ K.Iwasaki [16] ซึ่งศึกษาถึงลักษณะรูปร่างและปัจจัยการเกิดพลาสมาโดยเทคนิค ดีซี สปีตเตอร์ริง อิเล็กตรอนไซโคลตรอน เรโซแนนซ์ (DC Sputtering ECR) มีลักษณะของการออกแบบเครื่อง ดังรูปที่ 3.3 โดยมีลักษณะการติดตั้งบนช่วงต่อระหว่างห้องสุญญากาศหลักกับกระบอกเรโซแนนซ์ โดยให้คลื่นไมโครเวฟวิ่งผ่านตรงส่วนกลาง ดังนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบชุดเป้าสารเคลือบให้มีลักษณะแบ่งออกเป็น 2 ชุดโดยติดตั้งบนด้านข้างของผนังกระบอกสุญญากาศหลัก วางตัวเป็นแนวยาวมีขนาด ยาว 80 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร และมีความหนา 3 มิลลิเมตร

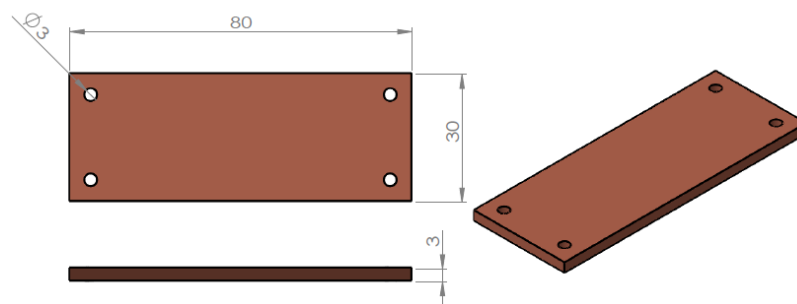


รูปที่ 3.3 การออกแบบเครื่องในงานวิจัยของ C.P Lungu และ K.Iwasaki

เนื่องจากปริมาตรของกระบอกสุญญากาศมีผลต่อเวลาในสร้างสุญญากาศภายในกระบอกสุญญากาศหลักจึงทำให้มีขนาดใหญ่มาไม่ได้เพราะฉะนั้นจึงต้องออกแบบโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของปั๊มสุญญากาศที่มีอยู่ จะได้รูปและขนาดของวัสดุเป้าและวัสดุที่ต้องการเคลือบจำลองดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 เป็นชิ้นงานจริงที่ใช้เป็นเงื่อนไขหลักในงานวิจัยนี้



(ก).ขนาดของชิ้นงานของวัสดุที่ต้องการเคลือบเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304

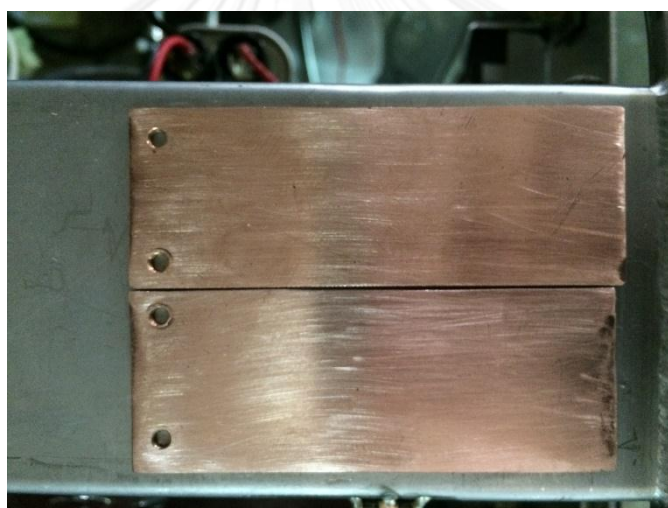


(ข).ขนาดชิ้นงานวัสดุเป้าสำหรับเคลือบ เป็นทองแดง

รูปที่ 3.4 ขนาดวัสดุเป้าสารเคลือบและวัสดุเป้าสำหรับเคลือบ



(ก). ชิ้นงานสำหรับวัสดุที่ต้องการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าโรสนิม ชนิด 304



(ข). ชิ้นงานสำหรับวัสดุเป่าสารเคลือบ ทองแดง

รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นงานจริงสำหรับวัสดุที่ต้องการเคลือบและวัสดุเป่าสารเคลือบ

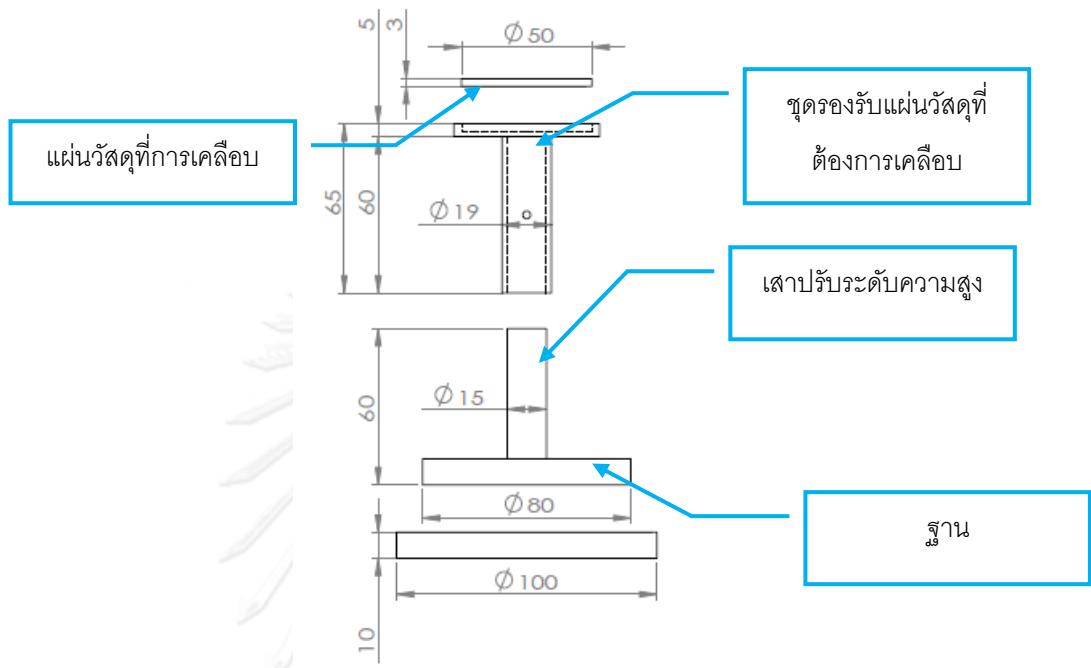
### 3.2.2 โครงสร้างของกระบอกสุญญากาศ

ส่วนของกระบอกสุญญากาศหลักประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ชุดวัสดุเป่าสารเคลือบ ,ชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ ,ชุดกระบอกเรโซแนนซ์ และชุดกระบอกสุญญากาศสำหรับบรรจุชุดเป่าสารเคลือบ และวัสดุที่ต้องการเคลือบโดยการออกแบบจะเริ่มออกแบบตามเงื่อนไขเบื้องต้นก่อน คือ ชุดวัสดุเป่าสารเคลือบและชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบดังนี้

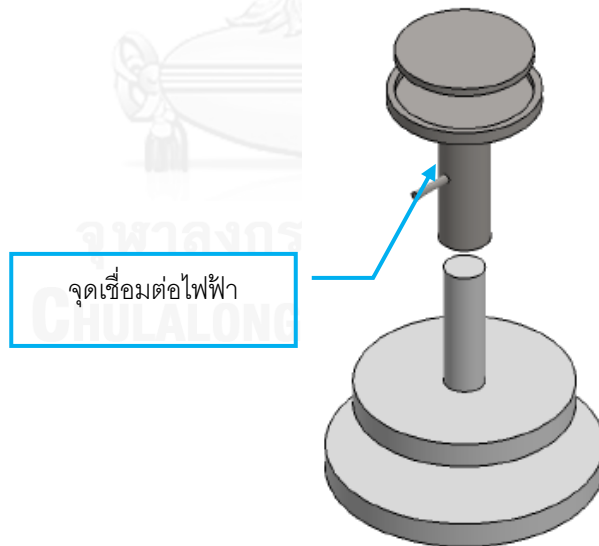
#### 3.2.2.1 ชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ

ชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบเป็นชุดที่ออกแบบไว้รองรับวัสดุที่ต้องการเคลือบโดยมีลักษณะเป็นจานรอง ทำจากเหล็กกล้าโรสนิม ชนิด 304 (Stainless Steel : SS304) มีลักษณะเป็นสื่อนำไฟฟ้า เพื่อต่อเชื่อมกับกราวด์ในระบบไว้วัดให้เกิดการนำทางไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดที่ใช้เป็นวัสดุเป่า

สารเคลือบและแอนโนดที่เป็นชุดแผ่นวัสดุที่ต้องการเคลือบ ซึ่งแบ่งส่วนประกอบเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.6



(ก).ขนาดของชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ



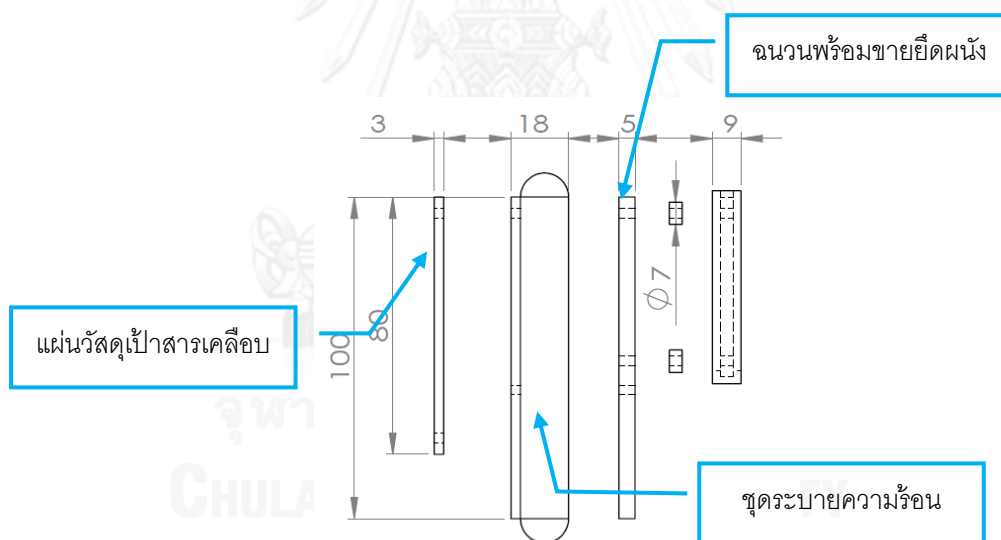
(ข).รูปไอโซเมตริกของชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ

รูปที่ 3.6 รูปโครงสร้างของชุดแผ่นวัสดุที่ต้องการเคลือบ

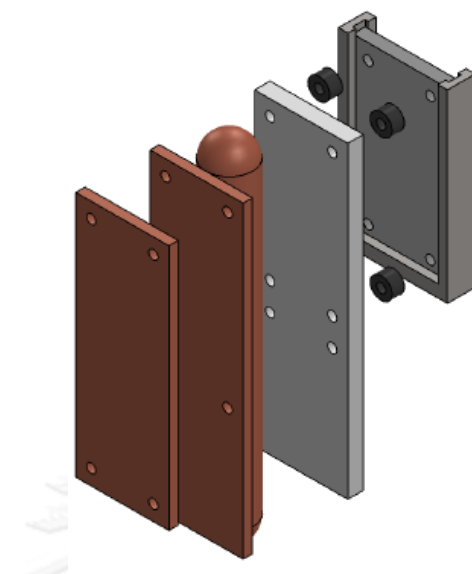
ชุดรองรับวัสดุที่ต้องการเคลือบทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 มิลลิเมตร สูง 56 มิลลิเมตรและมีแกนกลางกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร มีจุดเชื่อมต่อไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และยาว 15 มิลลิเมตร ส่วนฐานและเสาปรับระดับความสูงทำจากโพลีอะซีทิล (Polyacetel : POM) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและ 80 มิลลิเมตรตามลำดับ

### 3.2.2.2 ชุดวัสดุเป่าสารเคลือบ

เป็นชุดสำหรับติดตั้งวัสดุเป่าสารเคลือบซึ่งประกอบอยู่บนหัวของแคโทดซึ่งเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงด้านลบโดยต่อผ่านเข้ากับหัวเทียนภายในชุดวัสดุเป่าสารเคลือบที่ทำมาจากทองแดงซึ่งเลือกใช้ด้วยสาเหตุที่ทองแดงมีการระบายความร้อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม และทนความร้อนได้สูงกว่าอลูมิเนียม (Aluminum) เนื่องจากวัสดุเป่าสารเคลือบนั้นต้องสามารถรองรับการชนบนหน้าพื้นผิวของ อาร์กอนก๊าซด้วยพลังงานสูง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนสะสม และอาจทำให้ตัววัสดุเป่าสารเคลือบเกิดการแตกร้าวได้ ชุดวัสดุเป่าสารเคลือบจะวางไว้ด้านข้างติดกับผนังของกระบอกสุญญากาศไว้ทั้งหมด 2 ชุด โดยที่จะมีฉนวนกั้นกลางระหว่างผนังของกระบอกสุญญากาศและชุดวัสดุเป่าสารเคลือบเนื่องจากป้องกันการลัดวงจรกราวด์ เพราะว่าตัวฉนวนและโครงสร้างของกระบอกสุญญากาศนั้นต้องต่อเชื่อมกับกราวด์ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.7



(ก).ขนาดของชุดวัสดุเป่าสารเคลือบ



(ข).รูปไอโซเมตริกของชุดวัสดุเป้าสารเคลือบ

รูปที่ 3.7 รูปโครงสร้างของชุดวัสดุเป้าที่ต้องการเคลื่อน

โดยมีส่วนประกอบแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ แผ่นวัสดุสารเป้าซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นโลหะชนิดอื่นได้ขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร และมีความหนา 3 มิลลิเมตร ประกอบเข้ากับฐานรองที่เป็นทั้งชุดระบายความร้อนของแผ่นวัสดุเป้าสารเคลือบมีลักษณะ เป็นทรงกระบอกเชื่อมติดอยู่กับแผ่นรองรับวัสดุเป้าสารเคลือบมีขนาดเท่ากัน ด้านหลังเป็นชนวนทำจาก POM เสียบเข้ากับขาที่รองรับแผ่นเป้าสารเคลือบเชื่อมติดกับผนังด้านข้างของกระบอกสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.8



(ก).ด้านหน้าของวัสดุเป้าสารเคลือบ





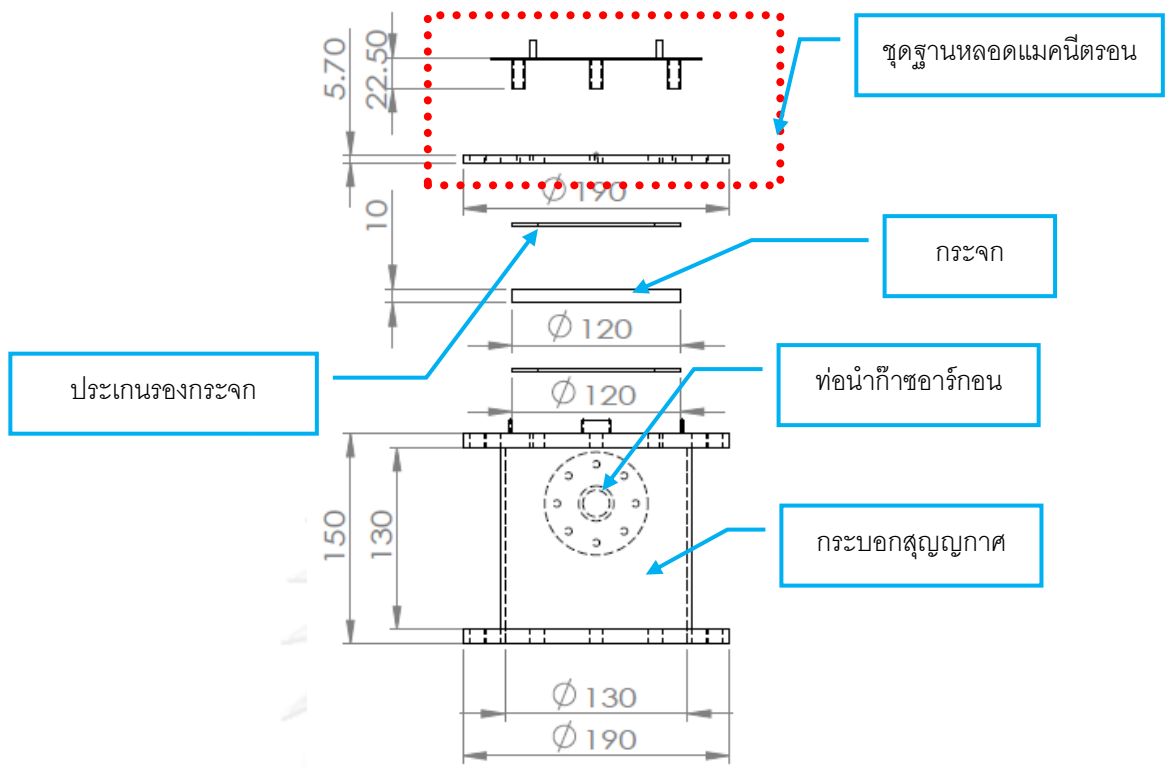
(ข). ด้านข้างของวัสดุเป้าสารเคลือบ

รูปที่ 3.8 ชุดวัสดุเป้าสารเคลือบที่ติดตั้งภายในกระบอกสุญญากาศหลัก

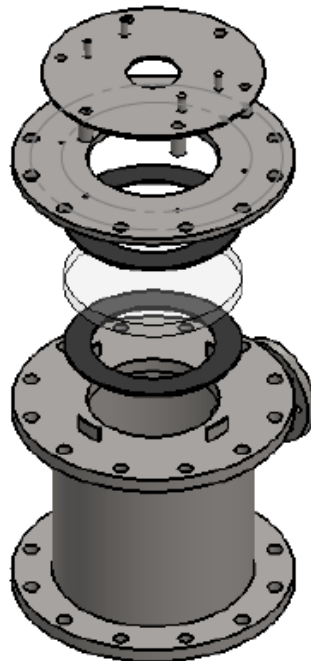
### 3.2.2.3 โครงสร้างกระบอกสุญญากาศสำหรับชุดเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟ

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำให้คลื่นไมโครเวฟลงมาจากหลอดแมกนีตรอนแล้วเกิดการเรโซแนนซ์นั้นจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่ 150 มิลลิเมตร จากสมการที่  $2.6 C = \lambda f$  จึงได้ความยาวคลื่นขนาด 122 มิลลิเมตร เพื่อระยะของการวางตำแหน่งหลอดแมกนีตรอนอีกประมาณ 30 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz เพราะฉะนั้นจึงออกแบบกระบอกส่วนนี้ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 130 มิลลิเมตร ที่ความสูง 170 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร เนื่องจาก ต้องการใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศ และง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียง 150 มิลลิเมตรที่สุด พร้อมทั้งมีจุดเชื่อมต่อกับระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน และ เก็บวัดความดันสุญญากาศอีกด้วย ด้านบนสุดของกระบอกสุญญากาศถูกติดตั้งด้วยกระจกใสมีความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร เพื่อเป็นช่องนำคลื่นไมโครเวฟลงมาจากหลอดแมกนีตรอนที่ถูกติดตั้งไว้ส่วนบนเครื่องดังรูปที่ 3.9 ซึ่ง จะแสดงถึงชิ้นส่วนประกอบภายใน กระบอกสุญญากาศ





(ก).ขนาดของส่วนประกอบระบอกสุญญากาศ

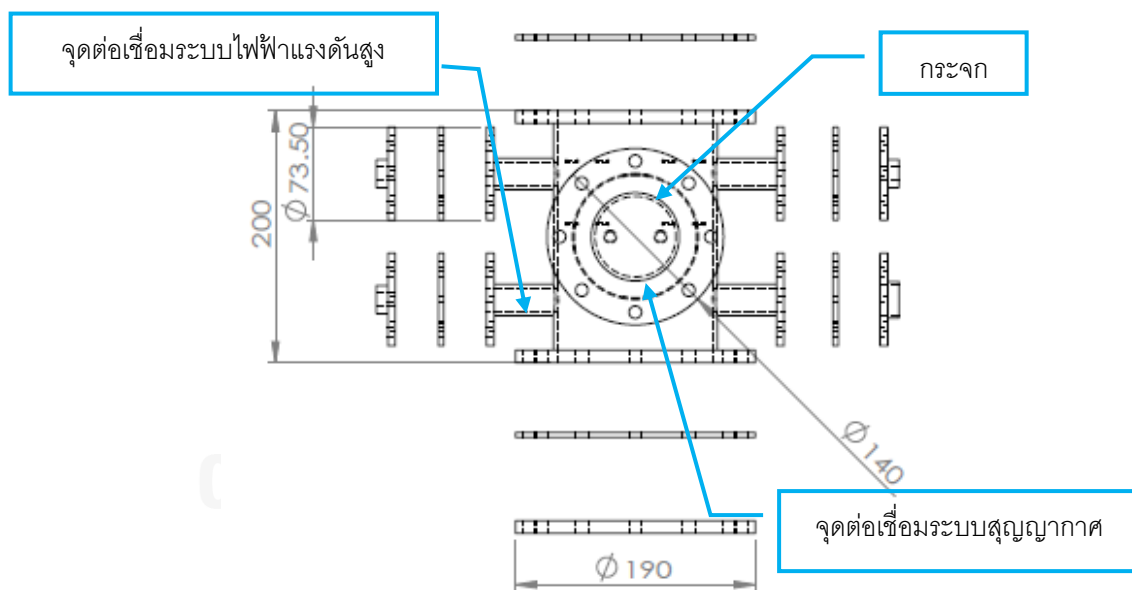


(ข).รูปไอโซเมตริกโดยการแยกส่วนประกอบ

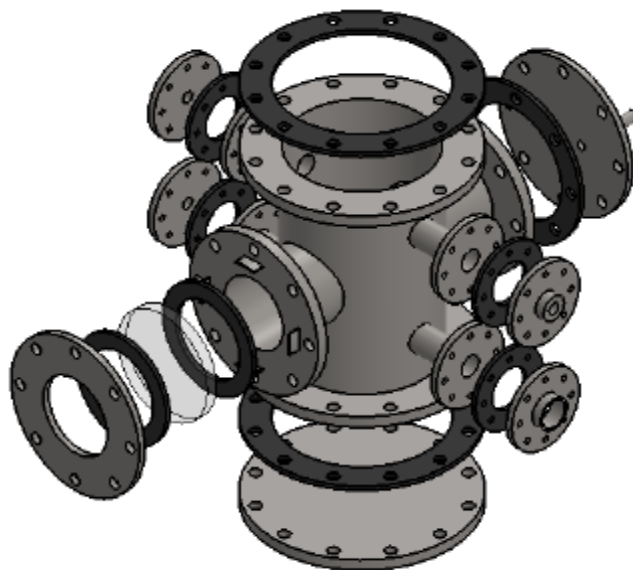
รูปที่ 3.9 รูปโครงสร้างของระบอกสุญญากาศสำหรับชุดเรโซแนนซ์คลื่นไมโครเวฟ

### 3.2.2.4 ชุดกระบอกสุญญากาศสำหรับการทดลอง

เมื่อเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆทั้งหมดถูกออกแบบตามโครงสร้างเบื้องต้นที่ได้กล่าวมา ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อให้ขนาดของกระบอกสุญญากาศสำหรับการทดลองมีขนาดแปรผันตามข้อจำกัดต่างไปด้วย เพื่อความเหมาะสม คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกของชุดเรโซแนนซ์มีความยาวเท่ากับ 130 มิลลิเมตร ผู้วิจัยจึงออกแบบให้มีขนาดเท่ากัน เพื่อที่จะใช้หน้าแปลนขนาด 190 มิลลิเมตร ให้มีขนาดเท่ากับส่วนด้านบน เพราะจะทำให้ลดขั้นตอนในการทำหน้าแปลนหลายขนาด และมีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ความสูงของกระบอกสุญญากาศเอง เมื่อชุดวัสดุเป่าสารเคลือบถูกจัดวางเป็นแนวตั้ง ซึ่งมีลักษณะตั้งฉากกับชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบนั้น ทำให้ต้องนำความสูงทั้งสองส่วนมาบวกกัน มีค่าประมาณ 165 มิลลิเมตร จึงได้เผื่อ พื้นที่ใช้งานระหว่าง ชุดวัสดุเป่าสารเคลือบ และชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบ อีกประมาณ 20% ไว้สำหรับปรับความสูงต่ำของชุดวัสดุเป่าสารเคลือบ จึงใช้ความสูงของกระบอกสุญญากาศ 200 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งภายในโครงสร้างประกอบด้วย ชุดต่อน้ำเข้าและออกสำหรับหล่อเย็นให้ชุดเป่าสารเคลือบ ชุดต่อระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และชุดต่อเชื่อมกับระบบทำสุญญากาศ ตรงด้านหน้าถูกออกแบบให้เป็นกระจกใสสำหรับเป็นช่องมองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร มีความหนา 10 มิลลิเมตร สำหรับสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ภายในกระบอกสุญญากาศ



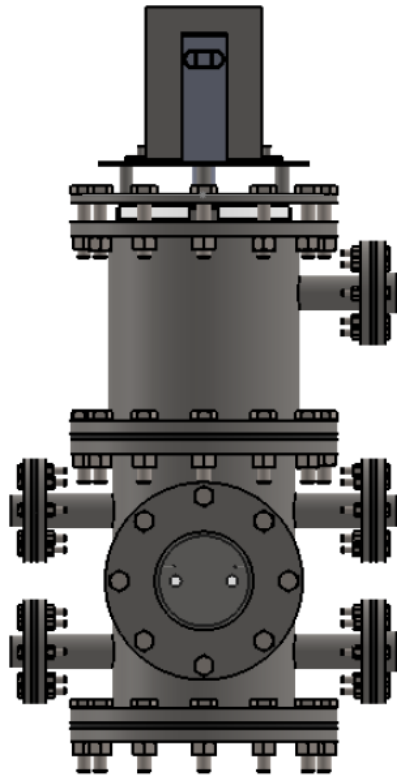
(ก).ขนาดของส่วนประกอบกระบอกสุญญากาศ



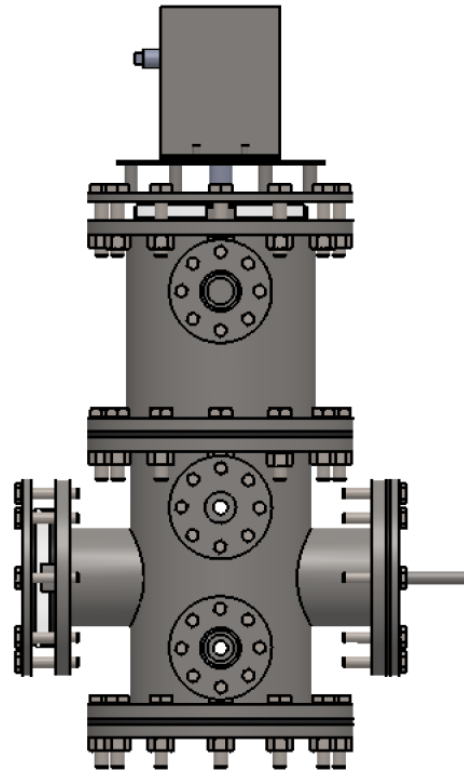
(ข).รูปไอโซเมตริกโดยการแยกส่วนประกอบ

รูปที่ 3.10 รูปโครงสร้างของกระบอกสุญญากาศสำหรับการทดลอง

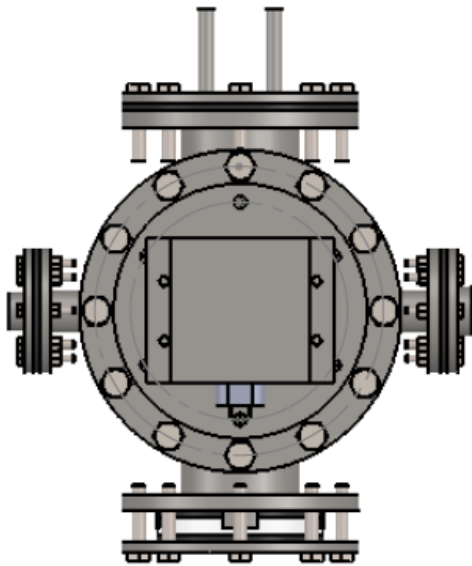
เมื่อนำทุกส่วนมาประกอบรวมกันดังรูปที่ 3.11 และรูป 3.12 ซึ่งแสดงโครงสร้างภายนอกและรูปตัดขวางภายในตามลำดับ โดยส่วนชุดวัสดุเป่าสารเคลือบและชุดวัสดุที่ต้องการเคลือบจะถูกติดไว้ภายในกระบอกสุญญากาศส่วนล่างและเชื่อมต่อเข้ากับชุดโครงสร้างของกระบอกสุญญากาศเรโซแนนซ์ของคลื่นไมโครเวฟโดยที่มีแผ่นประกนยางรองสำหรับกันสุญญากาศรั่วออกภายนอก และในส่วนนี้ยังเป็นช่องเปิดเพื่อใช้สำหรับการเปลี่ยนชนิดของวัสดุเป่าสารเคลือบและวัสดุที่ต้องการเคลือบอีกด้วย โดยเชื่อมต่อกันด้วยนอตขนาด M8 จำนวน 12 ตัว



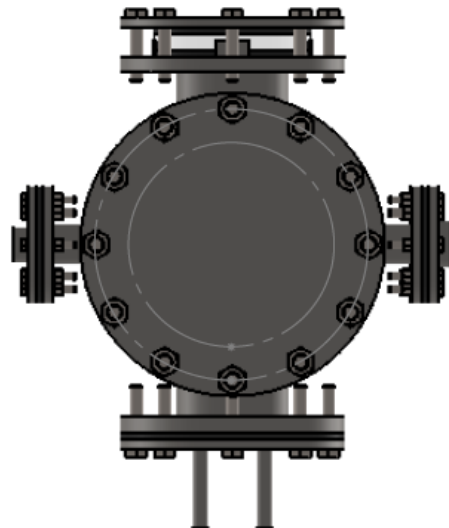
(ก).รูปด้านหน้า



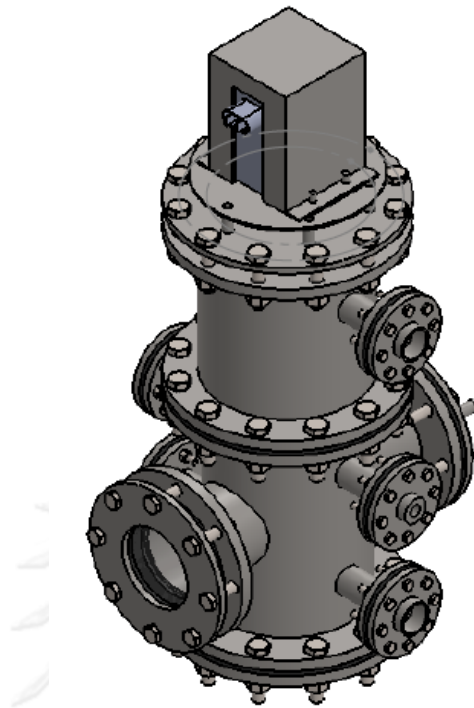
(ข).รูปด้านข้าง



(ค).รูปด้านบน

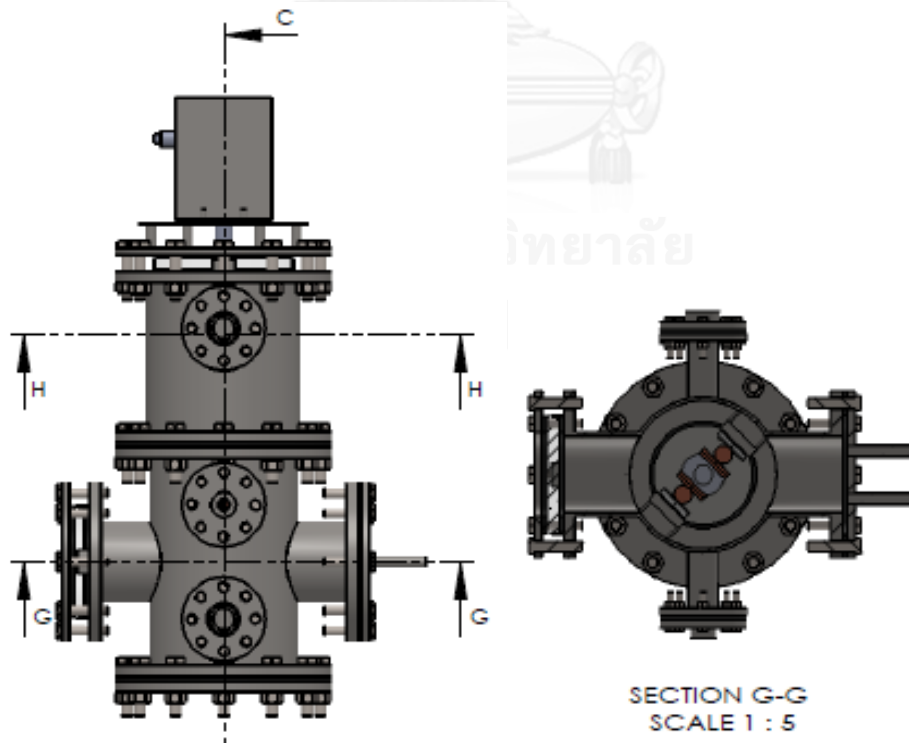


(ง).รูปด้านล่าง

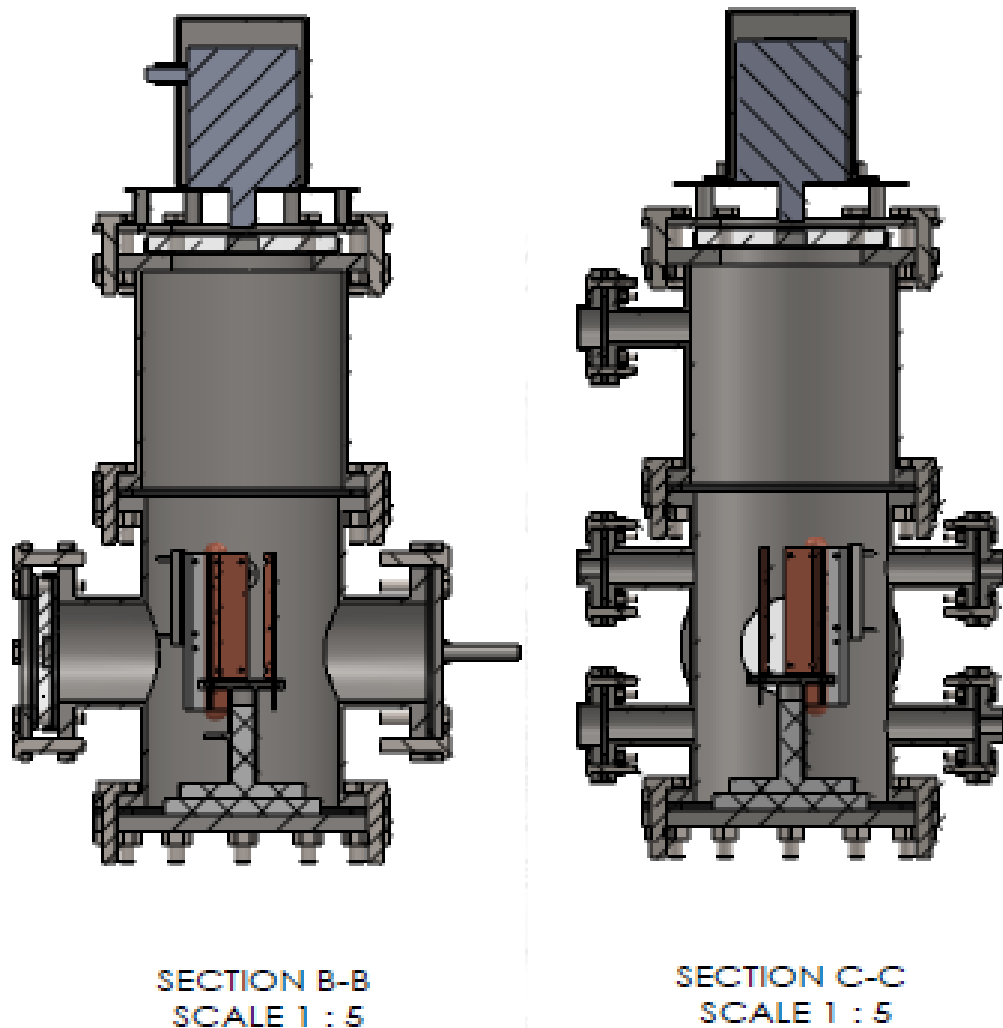


(จ).รูปไอโซเมตริก

รูปที่ 3.11 โครงสร้างภายนอกของกระบอกสูญญากาศ



(ก).รูปตัดขวางด้านบน



(ข).รูปตัดขวางด้านข้าง

(ค).รูปตัดขวางด้านหน้า

รูปที่ 3.12 รูปตัดขวางภายในกระบอกลูกสูบสุญญากาศหลัก

### 3.3 ระบบสุญญากาศ

#### 3.3.1 การออกแบบระบบสุญญากาศ

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าระดับความดันสุญญากาศในการใช้เทคนิค ดีซีสปัตเตอร์ริงนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับ  $10^{-3}$ - $10^{-1}$  ทอร์ [17] เพราะฉะนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระดับสุญญากาศที่ไม่สูงมากจึงเลือกใช้เครื่องสูบลูกสูบสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary pump) ของบริษัท Alcatel รุ่น Pascal 2005I ดังรูปที่ 3.13 เป็นปั๊ม 2 ระดับ ซึ่งมีอัตราการสูบลูกสูบอากาศ 5.4 ลูกบาศก์เมตร ต่อ ชั่วโมง ( $m^3/h$ ) หรือ ประมาณ 83.33 ลิตร ต่อ นาที ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3.14 เป็นตาราง

บอกคุณสมบัติของปั๊ม ที่อ้างอิงจากคู่มือของผู้ผลิต และ รูปที่ 3.15 เป็นกราฟแสดงค่าจำเพาะของปั๊ม สามารถลดความดันสุญญากาศลงได้ประมาณ ประมาณ  $10^{-2}$  ทอร์



รูปที่ 3.13 ปั๊ม Alcatel รุ่น 2005I

ความเร็วของปั๊มที่สามารถดูดอากาศจากกระบอกสุญญากาศคำนวณได้จากสมการ

$$T = \frac{F \times V}{S} \quad (3.1)$$

โดยที่

- $T$  คือ เวลาที่ใช้ในการปั๊มลงทั้งหมด
- $S$  คือ ความเร็วปั๊ม ( $m^3/h$ )
- $V$  คือ ปริมาตรความจุของภาชนะสุญญากาศหรือระบบ ( $m^3$ )
- $F$  คือ ค่าจำเพาะของปั๊ม (Pump down factor) ดังรูปที่ 3.10

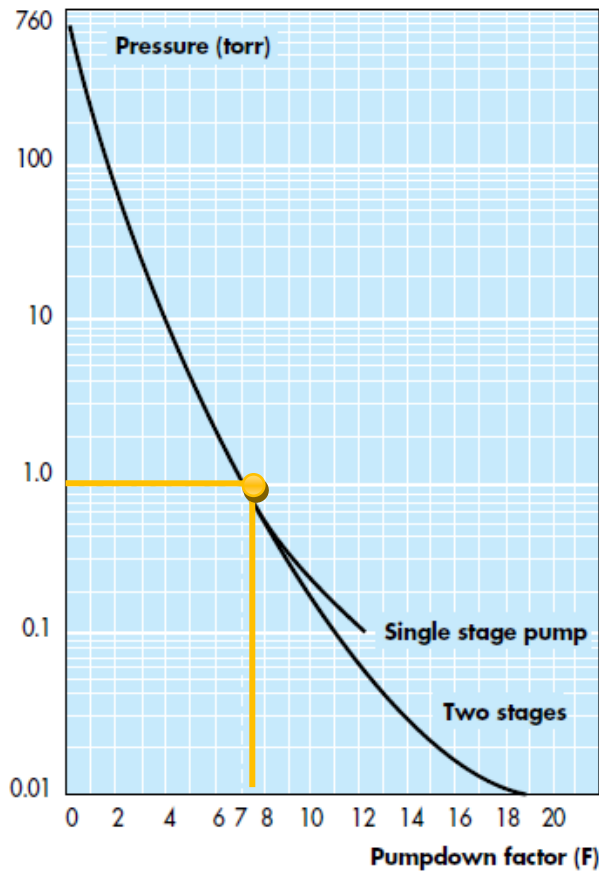
**For analytical instrumentation:  
I Series**

Two-stage pumps

รุ่น โรตารี ปั๊มที่เลือกใช้

Characteristics	Unit	2005 I		2010 I		2015 I		2021 I	
		50	60	50	60	50	60	50	60
Frequency	Hz	50	60	50	60	50	60	50	60
Number of stages		2		2		2		2	
Rotation speed	tr/mn	1500	1800	1500	1800	1500	1800	1500	1800
Nominal flow rate	m <sup>3</sup> /h	5.4	6.5	9.7	11.6	15	18	20.7	24.8
	cfm		3.8		6.8		10.6		14.6
Flow rate Pneurop method	m <sup>3</sup> /h	4.8	5.7	8.5	10.2	12.5	15	16.5	20
	cfm		3.4		6		8.8		11.8
Partial ultimate pressure* with A120 oil	Torr/mbar Pa					$7.5 \times 10^{-5} / 1 \times 10^{-4}$ $1 \times 10^{-2}$			
Ultimate pressure with gas ballast closed	Torr/mbar Pa					$1.5 \times 10^{-3} / 2 \times 10^{-3}$ $2 \times 10^{-1}$			
Ultimate pressure with gas ballast open	Torr/mbar Pa					$7.5 \times 10^{-3} / 1 \times 10^{-2}$ 1			
Oil capacity	l	0.83		0.95		0.95		0.98	
Maximum water vapour pumping capacity (Ballast flowrate 1.1 m <sup>3</sup> /h)	mbar Pa	35 $35 \cdot 10^2$	25 $25 \cdot 10^2$	20 $20 \cdot 10^2$	15 $15 \cdot 10^2$	12 $12 \cdot 10^2$	10 $1 \cdot 10^3$	7 $7 \cdot 10^2$	7 $7 \cdot 10^2$
	g/h	120	110	125	100	110	100	90	90
Weight (pump + motor)**	kg (lbs)	25 (55)		26 (57)		27 (59.5)		28 (62)	
Inlet and exhaust end fittings		DN 25 ISO-KF							

รูปที่ 3.14 คุณลักษณะปั๊มของบริษัท Alcatel



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงค่าจำเพาะของปั๊ม (Pump down factor) ของบริษัท Alcatel

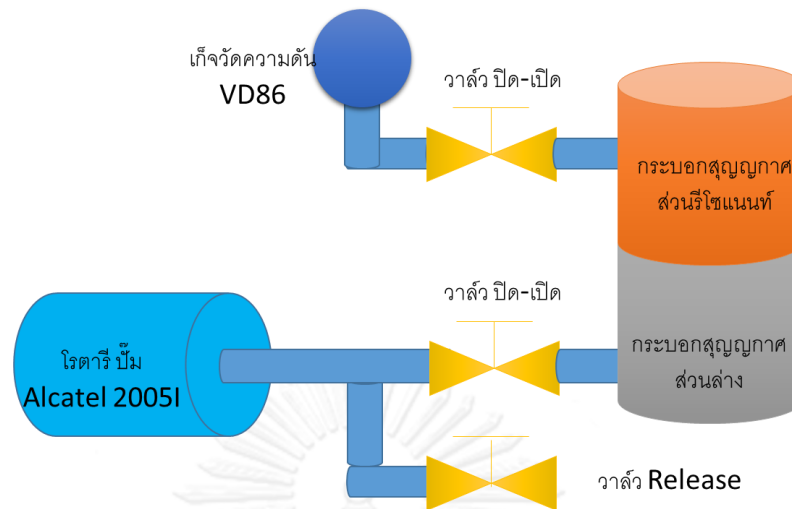


### 3.3.2 โครงสร้างระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศนั้นถูกต่อเข้าโดยตรงจากปั๊มโรตารีเข้าสู่ กระจกสุญญากาศหลักโดยตรง โดยมีบอลวาล์ว 1 ชุดสำหรับ ปิดกั้น และมีวาล์วปล่อยลมเข้าติดตั้งอยู่ใกล้ๆกัน ใช้สำหรับปล่อยลมเข้าเมื่อต้องการให้กระจกสุญญากาศมีค่าความดันบรรยากาศเท่ากับภายนอกเพื่อเปิดฝาของ กระจกสุญญากาศได้ ท่อนำสุญญากาศใช้ขนาด 1 นิ้ว หรือ 25 มิลลิเมตร หน้าแปลนใช้แบบ KF25 มีเกจวัดสุญญากาศ เป็นแบบ ดิจิตอล มิเตอร์ ยี่ห้อ THYRACONT รุ่น VD48 ดังรูปที่ 3.16 ติดตั้งอยู่ ส่วนบนของกระจกสุญญากาศหลัก ซึ่งมีโครงสร้างการติดตั้งดังรูปที่ 3.17



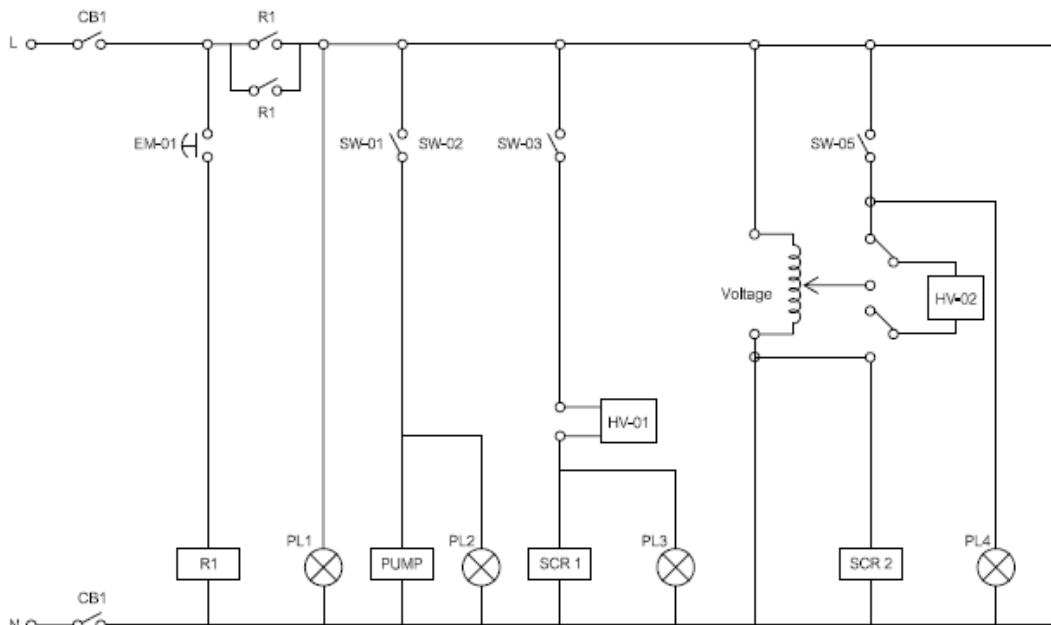
รูปที่ 3.16 เกจวัดความดันสุญญากาศ



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของระบบสุญญากาศ

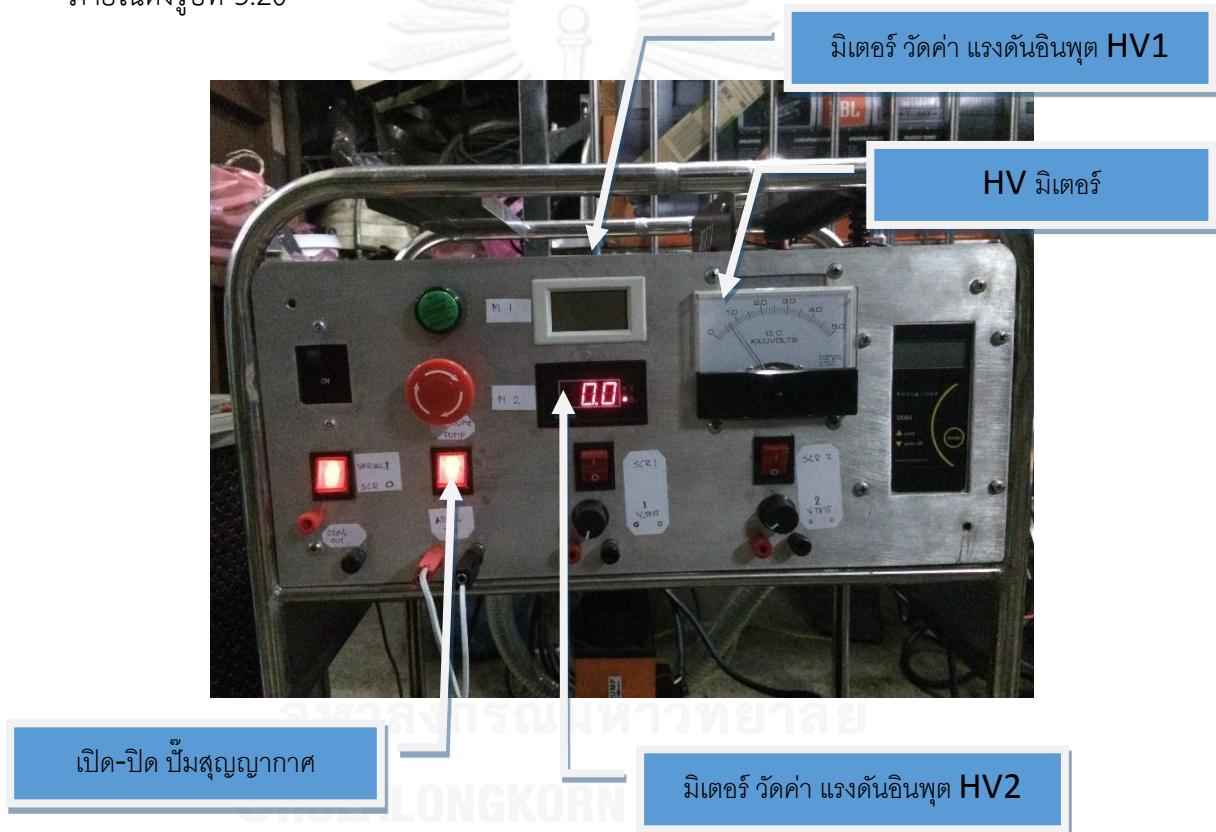
### 3.4 ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ระบบไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดจ่ายไฟสำหรับระบบเครื่องดีซี สปีดเตอร์ริง ที่ขั้วแคโทดและแอโนดสำหรับกระบวนการสปีดเตอร์ริงและ ชุดสำหรับคลื่นไมโครเวฟจากหลอดแมกนีตรอน โดยมีการออกแบบระบบไฟฟ้าให้ชุดจ่ายไฟฟ้าแต่ละส่วนถูกควบคุมจากส่วนกลาง ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดของเครื่อง ดีซี สปีดเตอร์ริง

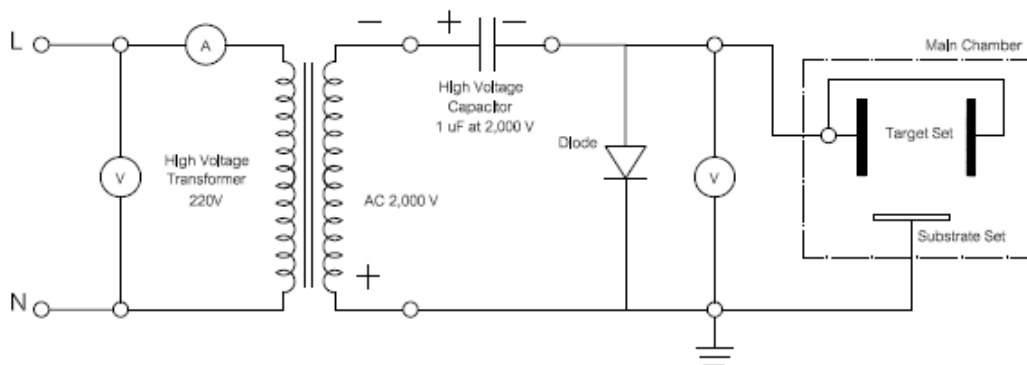
การทำงานเริ่มจาก เบรกเกอร์หลัก CB1 เป็นชุดอุปกรณ์ตัดต่อวงจรทั้งหมด โดยมี ปุ่มสำหรับ กดปิดฉุกเฉิน (Emergency stop) EM01 เมื่อเปิดเบรกเกอร์ไฟจะไหลไปที่คอล์ย รีเลย์ R1 ทำให้หน้า วงจรรีเลย์ จากปกติเปิด (Normally open) เปลี่ยนเป็น ปกติปิด (Normally close) ทำให้กระแส ไหลมาที่ หลอดไฟ PL1 แสดงว่าเครื่องพร้อมใช้งาน สามารถทำงานได้ โดยมี สวิตช์ SW1 เป็นสวิตช์ เปิดปิดปุ่มสัญญาณภาค ซึ่งจะแสดงผลพร้อมหลอดไฟ สวิตช์ SW2 จะเปิดวง SCR 1 ซึ่งเป็นวงจรตัด คลื่นแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุม power input ของ หลอดแมกนีตรอน ชุดจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าแรงสูงสำหรับระบบไมโครเวฟ ส่วนหม้อแปลงปรับแรงดันสำหรับควบคุมแรงดันจ่ายไฟให้แก่ชุด จ่ายไฟสำหรับระบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง ที่ขั้วแคโทดและแอโนด โดยมีวงจร SCR 2 เป็นตัววงจรสำรอง สำหรับการควบคุมแรงดัน โดยจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นรูปด้านหน้าของเครื่อง และวงจร ภายในดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 หน้าปัดชุดควบคุมระบบไฟฟ้า

### 3.4.1 ชุดจ่ายไฟ สำหรับระบบ ดีซี สเปคเตอร์ริง ที่ใช้แคโทดและแอโนด

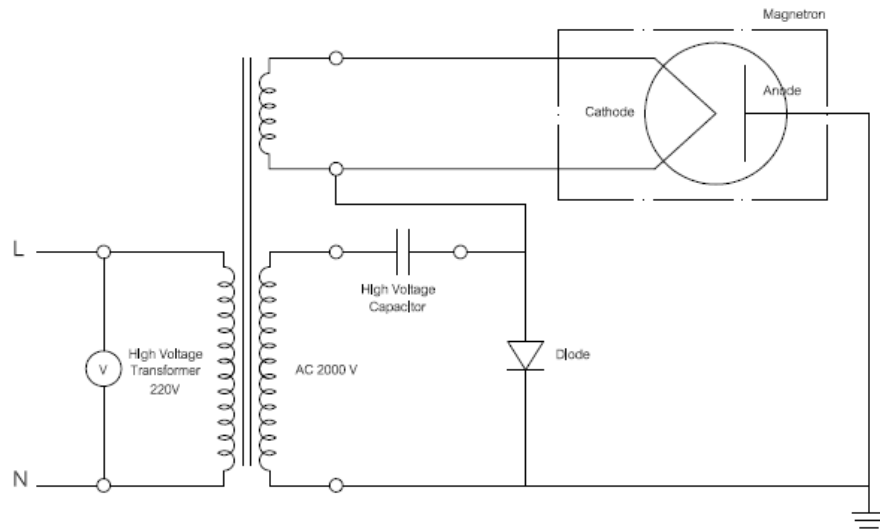
สำหรับป้อนไฟให้ชุดเป้าสารเคลือบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และ ขั้วแอโนด เป็นชุดแผ่นวัสดุที่ต้องการเคลือบ โดยที่ด้านไฟฟ้าขาเข้าเชื่อมต่อกับหม้อแปลงปรับย่านแรงดันสำหรับไฟด้านเข้า (Variable Voltage Transformer) แรงดันด้านออกจาก ชุดหม้อแปลงปรับย่านแรงดันต่อเชื่อมกับหม้อแปลงแรงดันสูง (High Voltage Transformer) โดยสามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 230 โวลต์ เป็น 2,000 โวลต์ และสามารถปรับย่านแรงดันจากแรงดันด้านขาเข้าหรือขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary Coil) จาก หม้อแปลงปรับย่านแรงดันไฟฟ้า ตั้งแต่ 0-230 โวลต์ ด้านขาออกหรือฝั่งทุติยภูมิ (Secondary Coil) เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุแรงดันสูง (High Voltage Capacity) ขนาด 1 ไมโครฟารัด ที่แรงดัน 2,300 VAC ดังรูปที่ 3.30 โดยที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุต่อเข้ากับ ขั้วของแคโทด และ ต่อเข้ากับไดโอดแรงดันสูง (High Voltage Diode) สำหรับเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น เมื่อเรียกรวมกับตัวเก็บประจุ จะเรียกว่า "วงจรแรงดันแบบทวีคูณ" (Voltage Multiply Circuit) ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงด้านทุติยภูมิ มีแรงดันเพิ่มเป็น 2 เท่า ซึ่งมีวงจรไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับชุด ดีซีสเปคเตอร์ริง

### 3.4.2 ชุดจ่ายไฟ สำหรับระบบไมโครเวฟ

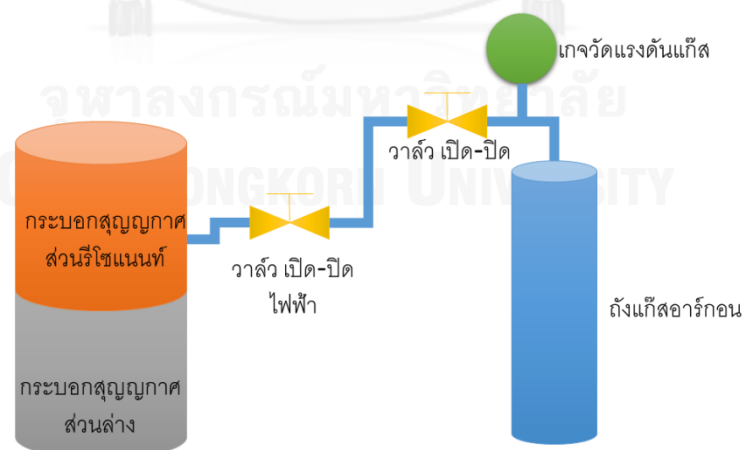
ใช้สำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบไมโครเวฟเพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟสำหรับงานวิจัยนี้ส่วนของระบบจ่ายไฟฟ้านั้นประกอบด้วย หม้อแปลง เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ โดยมีวงจรทวีแรงดัน (Voltage Multiply) ใช้เพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าตรงให้มีค่าสูงขึ้น โดยที่กระแสเอาต์พุตมาค่าลดลง เมื่อวงจรเริ่มทำงาน ในฝั่งบวกของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอดจะนำกระแสไหลผ่านไดโอด ทำให้ตัวประจุแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของวงจรจึงมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมไดโอด ในด้านฝั่งลบของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอดจะไม่นำกระแสกระแสไฟฟ้างจึงไหลผ่านไปยังโหลดเข้ามาที่เก็บประจุ และในจังหวะเดียวกัน ตัวเก็บประจุก็จะคายประจุออกมาในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร ดังนั้นจึงทำให้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันอินพุตรวมกับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ โดยที่ส่วนขั้วลบของตัวเก็บประจุจะต่อเข้ากับ ขั้วแคโทดของชุด แมกนีตรอน แล้วขั้วแอโนดของแมกนีตรอนจะต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สำหรับชุด ดีซี สปีดเตอร์ริง

### 3.5 ระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน

ก๊าซอาร์กอน เป็นส่วนสำคัญให้เกิดกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง เพราะเป็นตัวที่อิเล็กตรอนพุ่งเข้ามาชนแล้วเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงาน อนุภาคของอาร์กอน ถูกดึงดูดด้วยสนามไฟฟ้าของขั้วแคโทด ตกกระทบบกับวัสดุเป้าสารเคลือบ ทำให้ อนุภาคหลุดออกมา ซึ่งโครงสร้างระบบประกอบด้วย ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน , วาล์วเปิดการทำงาน และเกจวัดความดันก๊าซ โดยที่ ก๊าซอาร์กอนจะถูกปล่อยออกมาจากถังก๊าซ ซึ่งก่อนที่จะเข้ากระบอกสุญญากาศหลัก จะมีวาล์วไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับการปิดเปิดให้ก๊าซเข้าทำงานอย่างเป็นจังหวะ โดยที่รูก๊าซที่จ่ายเข้าที่ กระบอกสุญญากาศหลัก จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมก๊าซไม่ให้เข้า กระบอกสุญญากาศหลักมากเกินไป โดยมีไดอะแกรมโครงสร้างดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 โครงสร้างระบบ จ่ายก๊าซอาร์กอน

### 3.6 ระบบไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ถูกสร้างขึ้นจากหลอดแมกนีตรอนรุ่น 2M213 ยี่ห้อ LG Magnetron ดังรูปที่ 3.23 ต่อเข้าโดยตรงกับ กระจกบอกระเบิดสุญญากาศหลัก โดยติดตั้งเหนือกระจกบอกระเบิดสุญญากาศตรงช่องกระจก



รูปที่ 3.23 หลอดแมกนีตรอน

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่อง ดีซี สปีดเตอร์ริงไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องนี้ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นโดยประกอบด้วยระบบต่างๆที่สำคัญ คือ ระบบไฟฟ้าแรงสูง ,ระบบสุญญากาศ ระบบไมโครเวฟ และระบบก้ำซอาร์คอน ซึ่งการทดสอบจะแยกออกเป็นส่วนๆ สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่อง เช่น การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ,การทำสุญญากาศภายในกระบอกสุญญากาศ และสุดท้ายการทดสอบเคลือบผิวของวัสดุ เพื่อดูการกระจายตัวของโลหะที่เคลือบ และแนวโน้มการเคลือบตัวของอนุภาคลงบนผิว จากกระบวนการสปีดเตอร์ริง ดังนี้

#### 4.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง

##### 4.1.1 การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

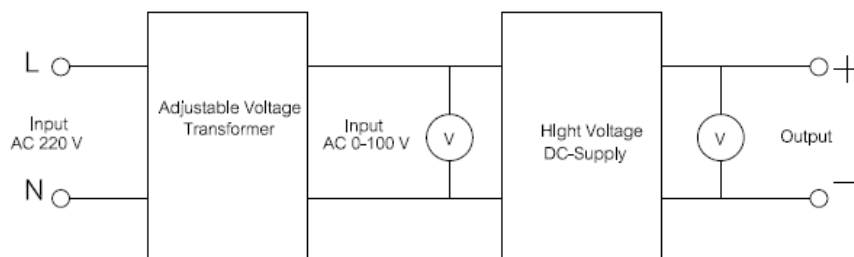
การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของ ระบบไฟฟ้าจ่ายให้ ขั้วแคโทดและแอโนด สำหรับระบบสปีดเตอร์ริงภายในกระบอกสุญญากาศ และส่วนระบบจ่ายไฟฟ้าให้ระบบปล่อยคลื่นไมโครเวฟ

##### 4.1.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- 1).ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า
- 2).มัลติมิเตอร์ แบบเข็ม
- 3).มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล
- 4).หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าแรงดัน

##### 4.1.1.2 ผลการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดและแอโนด

ได้ทำการจ่ายไฟฟ้าอินพุตเข้าที่ หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าแรงดัน โดยเริ่มปรับตั้งค่าแรงดันไฟกระแสสลับด้านอินพุต ตั้งแต่ 0-100 ดังรูปที่ 4.1 ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงด้านเอาต์พุต ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2

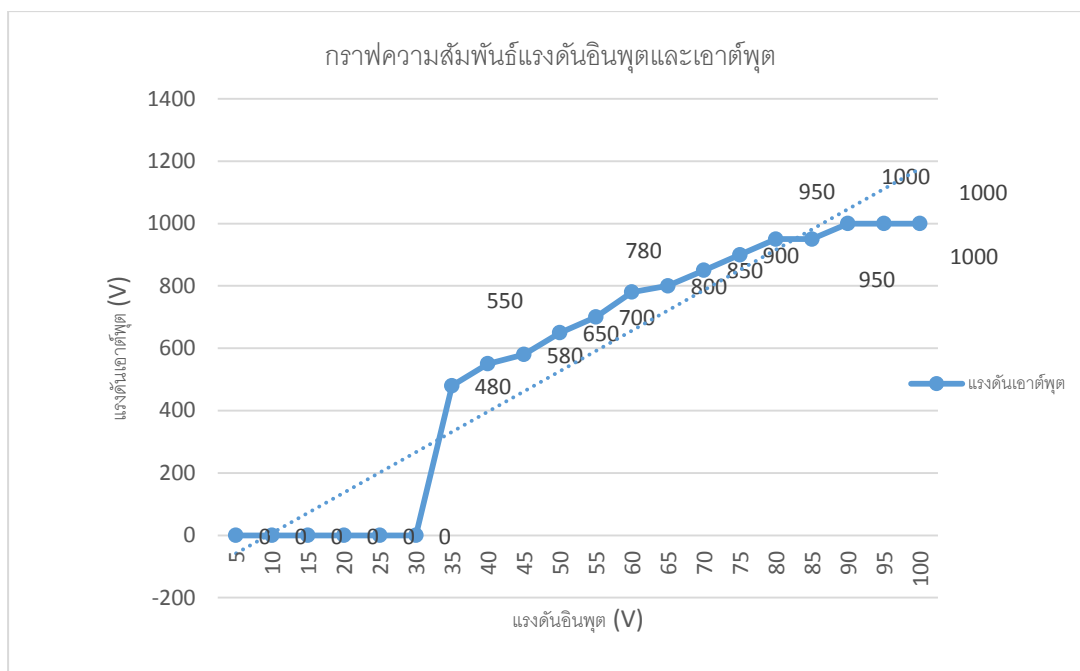


รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุต

แรงดันไฟฟ้าอินพุต AC (V)	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต DC (V)
0	0
5	0
10	0
15	0
20	0
25	0
30	0
35	480
40	550
45	580
50	650
55	700
60	780
65	800
70	850
75	900
80	950
85	950
90	1000
95	1000
100	1000





รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงดันอินพุตและเอาต์พุต

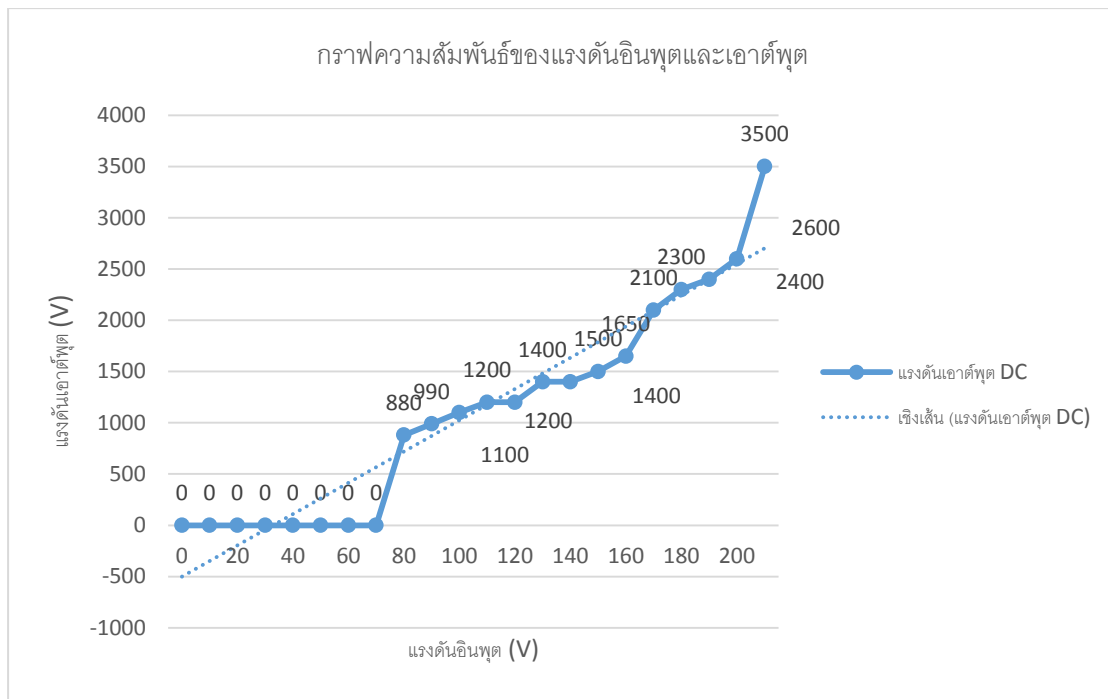
จากเส้นกราฟในภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่ากราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มแรงดันอินพุต ซึ่งแรงดันจะเห็นค่าตั้งแต่ 35 โวลต์ และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 90 โวลต์ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ 1,000 โวลต์ ดีซี จะเป็นจุดอิมิตัวของแรงดันภายในกระบอกสุญญากาศ เนื่องจาก เมื่อปรับแรงดันอินพุตที่สูงขึ้น แรงดันจะเหวี่ยงไปมา แรงดันมีการเบรกดาวลงกราวด์ ที่เป็นผนังของกระบอกสุญญากาศ เนื่องจากความเป็นสุญญากาศไม่เพียงพอต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1,000 โวลต์ ทำให้เกิดประจุกระโดดข้ามลงกราวด์

#### 4.1.1.3 ผลการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าให้ระบบคลื่นไมโครเวฟ

เมื่อจ่ายไฟอินพุตผ่านวงจร SCR ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต โดยมีการปรับระดับตั้งแต่ 0-220 โวลต์ บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจากวงจร SCR กับ แรงดันไฟฟ้าแรงสูงเอาต์พุต

แรงดันไฟฟ้าอินพุต AC (V)	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต DC (V)
0	0
10	0
20	0
30	0
40	0
50	0
60	0
70	0
80	880
90	990
100	1100
110	1200
120	1200
130	1400
140	1400
150	1500
160	1650
170	2100
180	2300
190	2400
200	2600
210	3500



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์แรงดันอินพุต SCR และเอาต์พุต

จากเส้นกราฟในรูปที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ 80 โวลต์ เป็นค่าแรงที่ทำให้มีแรงดันเอาต์พุตเกิดขึ้น

#### 4.1.2 การทดสอบระบบสุญญากาศ

การทดสอบระบบสุญญากาศเพื่อทดสอบการทำงานของระบบสุญญากาศ ว่ามีการรั่วออกของความดันสุญญากาศหรือไม่ และทดสอบเวลาในการทำความดันสุญญากาศภายในกระบอกสุญญากาศ

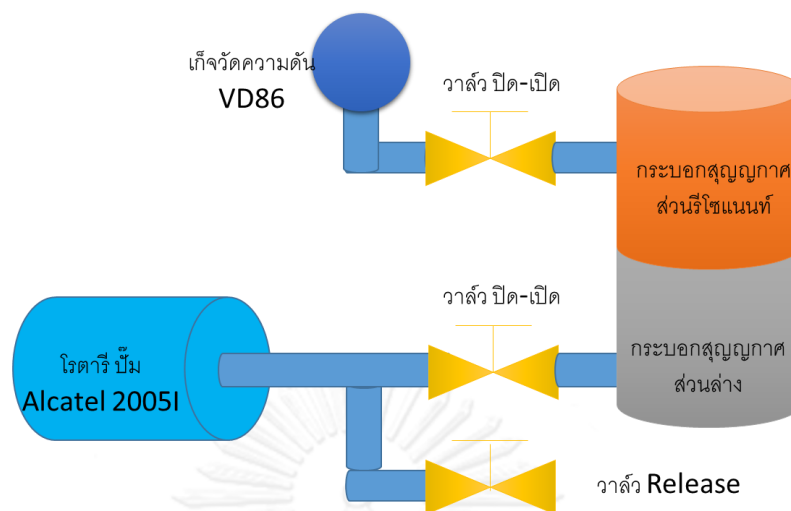
##### 4.1.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- 1).ระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น
- 2).มาตรวัดสุญญากาศของระบบ
- 3).นาฬิกาจับเวลา

##### 4.1.2.2 การทดสอบระบบสุญญากาศ

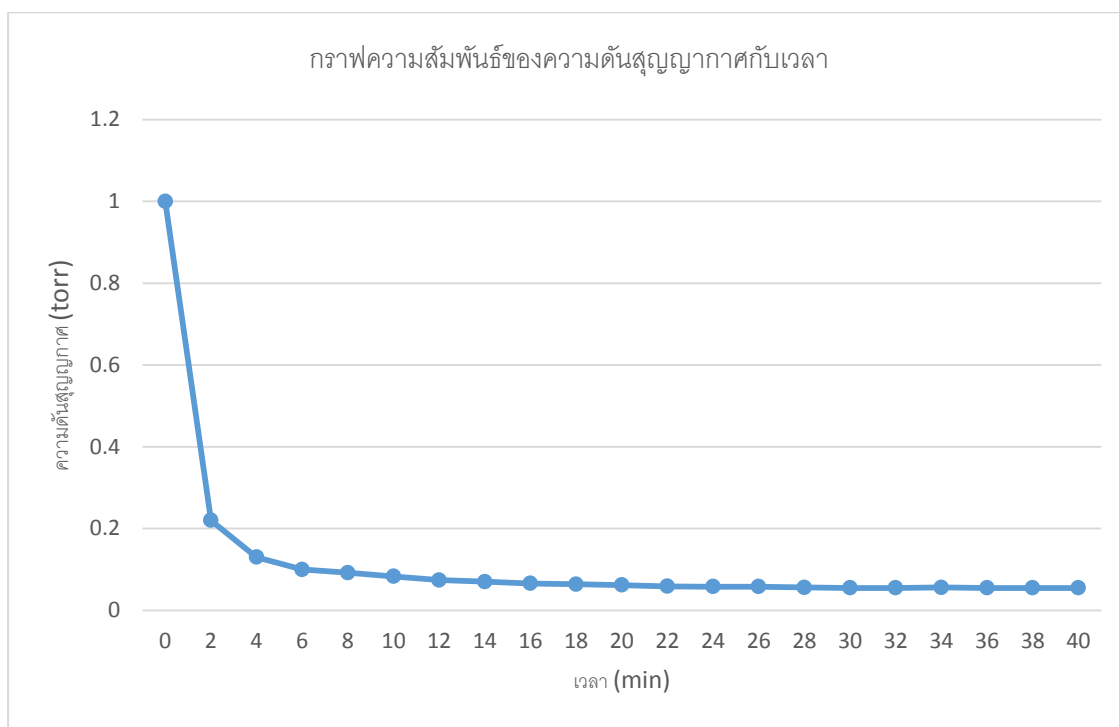
ใช้ระบบสุญญากาศโดยการ ปิดวาล์วสำหรับปล่อยอากาศ โดยอ้างอิงจากระบบตั้งรูปที่

4.4 ทำการเปิดระบบ ทดสอบโดยการจับเวลา จนป้มีค่าความดันสุญญากาศ ถึง  $10^{-2}$  ทอร์ บันทึกค่าความดันสุญญากาศ ที่เวลาเปลี่ยนไป ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 โครงสร้างระบบสุญญากาศ  
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบการทำงานของระบบสุญญากาศ

เวลา (นาที)	ระดับสุญญากาศที่เกจวัดความดัน (torr)
0	18
2	$2.2 \times 10^{-1}$
4	$1.3 \times 10^{-1}$
6	$1.0 \times 10^{-1}$
8	$9.2 \times 10^{-2}$
10	$8.3 \times 10^{-2}$
12	$7.4 \times 10^{-2}$
14	$7.0 \times 10^{-2}$
16	$6.6 \times 10^{-2}$
18	$6.4 \times 10^{-2}$
20	$6.2 \times 10^{-2}$
22	$5.9 \times 10^{-2}$
24	$5.8 \times 10^{-2}$
26	$5.8 \times 10^{-2}$
28	$5.6 \times 10^{-2}$
30	$5.5 \times 10^{-2}$
34	$5.6 \times 10^{-2}$
36	$5.5 \times 10^{-2}$
38	$5.5 \times 10^{-2}$
40	$5.4 \times 10^{-2}$



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศกับเวลา

จากรูปที่ 4.5 เมื่อเริ่มเดินระบบสุญญากาศภายในกระบอกสุญญากาศนั้น จะมีก๊าซชนิดอื่นๆ และความชื้นต่างๆ อยู่ภายใน สำหรับในช่วงแรกนั้นจะมีอัตราการดูดที่ลงเร็วมากจาก เริ่มสตาร์ทปั๊ม จนถึงประมาณ  $1 \times 10^{-1}$  ทอร์ หลังจากนั้นจะเข้าใกล้จุดอิ่มตัวที่ประมาณ  $5.5 \times 10^{-2}$  ทอร์ ซึ่งเข้าใกล้ประสิทธิภาพปั๊มที่สามารถทำได้ โดยจะใช้เวลาทั้งหมด ประมาณ 40 นาที หลังจากเดินปั๊มครั้งแรก และทำการเดินระบบใหม่อีกครั้ง เวลาในทำความดันสุญญากาศลดลง เหลือประมาณ 20-30 นาที

## 4.2 การทดสอบการทำงานของระบบเคลือบ

การทดสอบกระบวนการเคลือบถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการเตรียมวัสดุที่ต้องการเคลือบและ ส่วนการทดสอบกระบวนการเคลือบ

### 4.2.1 การเตรียมวัสดุที่ต้องการเคลือบ

เป็นการเตรียมวัสดุที่เป็นโลหะ สำหรับที่ต้องการเคลือบ โดยในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุโลหะที่ต้องการเคลือบเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304 โดยนำมาขัดผิวด้านหน้า และบันทึกภาพลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ ก่อนการเริ่มกระบวนการเคลือบ

#### 4.2.1.1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1). โลหะที่ต้องการเคลือบ เหล็กกล้าโรสนิม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร
- 2). เต้าไฟฟ้าให้ความร้อน
- 3). กาวสำหรับยึดโลหะ
- 4). กระดาษทรายเบอร์ P600 ,P800 ,P1200 ,P2500 และ P 4,000
- 5). เครื่องขัดผิว ยี่ห้อ Buehler<sup>®</sup> รุ่น MetaServ 250
- 6). กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ Motic<sup>®</sup>

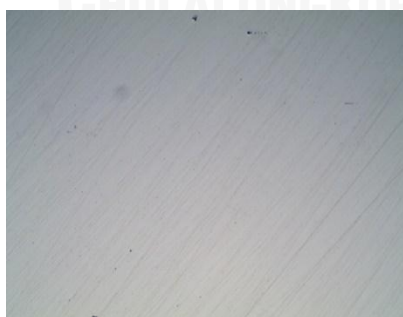
#### 4.2.1.2. การเตรียมวัสดุและบันทึกภาพก่อนการเคลือบ

นำแผ่นวัสดุโลหะ เหล็กกล้าโรสนิม ชนิด 304 มาขัดผิวหน้าออกโดยเริ่มจากใช้กระดาษทรายเบอร์หยาบที่สุด เบอร์ 600 แล้วเปลี่ยนไปเรื่อยๆจนถึงเบอร์ 4,000 ให้มีรอยขีดข่วนน้อยที่สุด เพื่อให้ผิวหน้าเรียบที่สุดโดยสังเกตถึงความเงาของวัสดุ จะมีลักษณะเงาเหมือนกับกระจกดังรูปที่ 4.6 รูปก่อน และหลังการขัด



รูปที่ 4.6 เหล็กกล้าโรสนิม ด้านซ้ายก่อนและด้านขวาหลังการขัดผิวหน้า

เมื่อทำการขัดพื้นผิวเสร็จจึงนำเข้ากล้องจุลทรรศน์เพื่อบันทึกภาพ พื้นผิวสำหรับเปรียบเทียบ ลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังกระบวนการเคลือบจะได้ บันทึกภาพโดยใช้กำลังขยายที่ 5 เท่าและ 50 เท่า ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งทำการเตรียมตัวอย่างทั้งหมด 20 ตัวอย่าง



(ก).กำลังขยาย 5 เท่า



(ข).กำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 4.7 รูปพื้นผิวของแผ่นเหล็กกล้าโรสนิม ชนิด 304

#### 4.2.2 การทดสอบกระบวนการเคลือบ

หลังจากที่ได้ขึ้นงานจากการเตรียมในส่วนแรกแล้ว จึงนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบกระบวนการเคลือบ จากสมรรถนะของเครื่องสามารถทำงานได้เป็นไปตามตารางที่ 4.4 และเงื่อนไขสำหรับการทดสอบดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 สมรรถนะของเครื่อง ดีซี สปีดเตอร์ริง

เงื่อนไข	ขอบเขต
ความดันสูญญากาศ	$1 \times 10^{-1}$ ทอร์ ถึง $4.5 \times 10^{-2}$ ทอร์
แรงดันไฟฟ้าขั้วแคโทด	-400 ถึง - 1,000 โวลต์ ดีซี
กำลังไฟฟ้า ของหลอดแมกนีตรอน	700 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขสำหรับการทดสอบการเคลือบ

ตัวอย่างที่	วัสดุ	แรงดันไฟฟ้า (V)	เวลา (min)	คลื่นไมโครเวฟ (W)
1	SS 304	500	5	-
2	SS 304	500	10	-
3	SS 304	500	15	-
4	SS 304	800	5	-
5	SS 304	800	10	-
6	SS 304	800	15	-
7	SS 304	500	5	700 W
8	SS 304	500	10	700 W
9	SS 304	500	15	700 W

เงื่อนไขการทดสอบถูกแบ่งออกเป็นแบบใส่คลื่นไมโครเวฟและไมใส่คลื่นไมโครเวฟโดยพลังงานสำหรับคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ มีพลังงาน 700 วัตต์ โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 500 โวลต์ และ 800 โวลต์ และใช้เวลาเป็นตัวกำหนด ในการทดสอบการเคลือบแต่ละช่วงแรงดัน ที่เวลา 5 - 15 นาที แล้วบันทึกค่า แรงดันที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้วัสดุเป้าสารเคลือบ เป็น ทองแดง ดังนี้

#### 4.2.2.1 ผลการทดสอบการเคลือบ

ที่เวลา 5 นาที บันทึกค่า แรงดันเอาต์พุต ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 บันทึกค่าแรงดัน เอาต์พุตที่เวลา 5 นาที

เวลา (วินาที)	แรงดันไฟฟ้า ที่ 500 V	แรงดันไฟฟ้า ที่ 800 V	แรงดันไฟฟ้า ที่ 500 V (Microwave)
0	500	800	500
30	200	500	200
60	500	750	400
90	300	450	100
120	450	750	300
150	300	300	200



ที่เวลา 10 นาที บันทึกค่า แรงดันเอาต์พุต ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 บันทึกค่าแรงดัน เอาต์พุตที่เวลา 10 นาที

เวลา (วินาที)	แรงดันไฟฟ้า ที่ 500 V	แรงดันไฟฟ้า ที่ 800 V	แรงดันไฟฟ้า ที่ 500 V (Microwave)
0	450	800	500
30	250	600	200
60	450	700	300
90	200	500	200
120	450	750	350
150	250	550	100
180	400	650	300
210	300	350	200
240	450	700	350
270	250	400	100
300	300	200	300

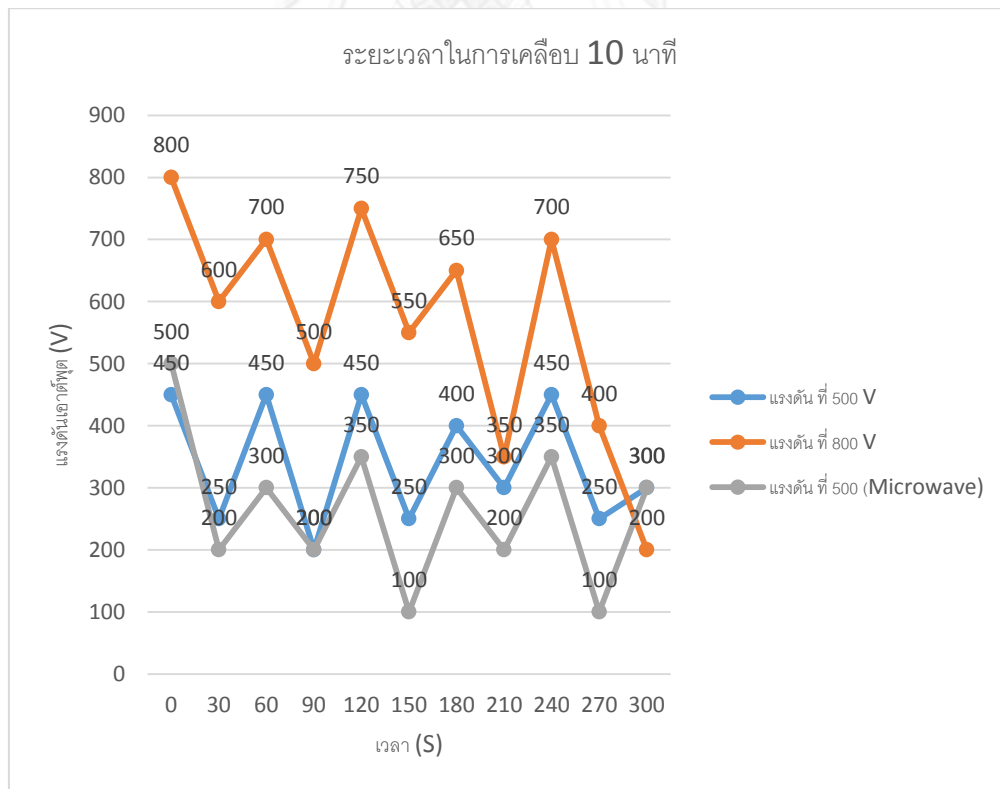
ที่เวลา 15 นาที บันทึกค่า แรงดันเอาต์พุต ดังตารางที่ 4.7 สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ 500 โวลต์ และเพิ่มคลื่นไมโครเวฟ เข้ากระบอกสุญญากาศ เป็นเวลา 15 นาที ไม่สามารถ ทำการทดลองที่สูงกว่า 10 นาทีได้ เพราะว่าหลังจากที่ 10 นั้่นกระบอกความร้อยไมไหวจึงแตก ทำให้ไม่สามารถทดลองได้

ตารางที่ 4.8 บันทึกค่าแรงดัน เอาต์พุตที่เวลา 15 นาที

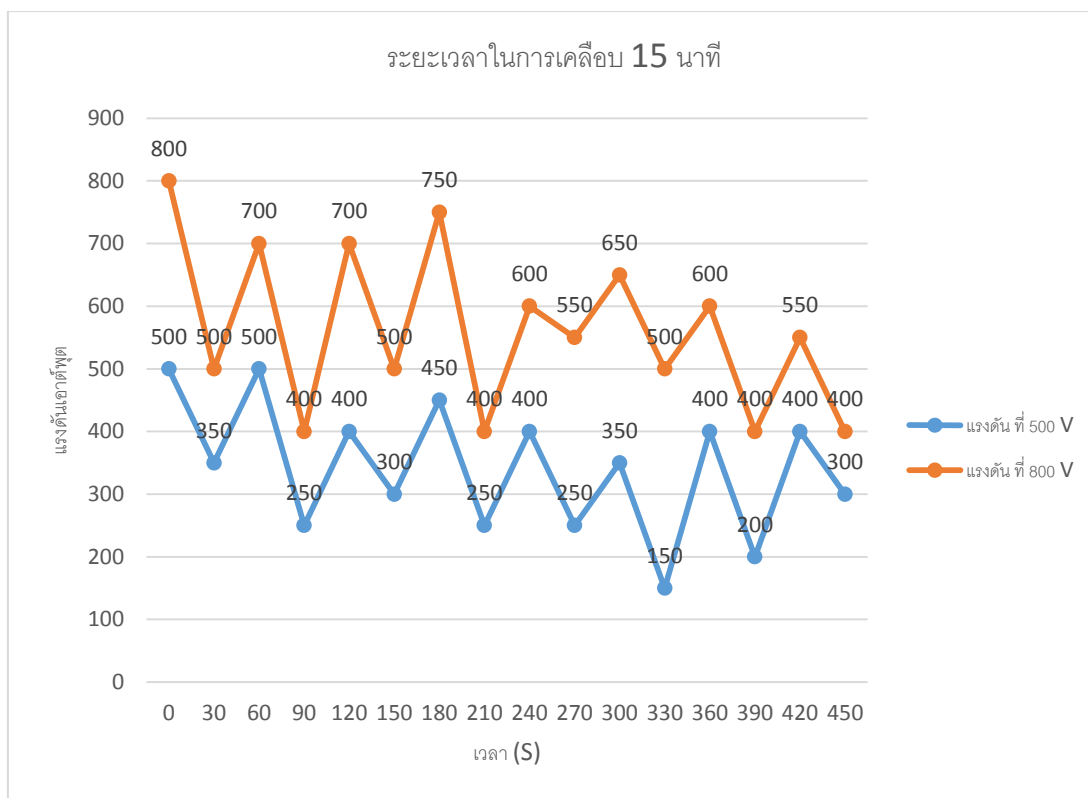
เวลา	แรงดัน ที่ 500 V	แรงดัน ที่ 800 V	แรงดัน ที่ 500 V (Microwave)
0	500	800	กระจกด้านทางเข้าของคลื่น ไมโครเวฟ แตก
30	350	500	
60	500	700	
90	250	400	
120	400	700	
150	300	500	
180	450	750	
210	250	400	
240	400	600	
270	250	550	
300	350	650	
330	150	500	
360	400	600	
390	200	400	
420	400	550	
450	300	400	



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่เวลา 5 นาที



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่เวลา 15 นาที

จากรูปที่ 4.8 – 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกไบอัสเข้าไปที่ขั้วแคโทดมีลักษณะขึ้นลงไม่คงที่เนื่องจากช่วงขณะที่มีการจ่ายก๊าซอาร์กอนเข้ากระบอกสุญญากาศ ในช่วงนี้แรงดันจะตกลง เพราะความหนาแน่นของก๊าซภายในกระบอกสุญญากาศมีค่ามากขึ้น แรงดันสุญญากาศตกลงทำให้สภาพความเป็นสุญญากาศลดลง ทำให้แรงดันตกลง ไม่สามารถไอออนไนซ์ทำให้ก๊าซอาร์กอนแตกตัวด้วยได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณก๊าซลดลง ทำให้แรงดันกลับขึ้นมา

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ทางกายภาพของพื้นผิว

หลังจากทำการสปัตเตอร์ริง ตามเงื่อนไขและเวลาที่กำหนด ก็นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูสภาพพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไป ดังต่อไปนี้ ที่เวลา 5 นาที สภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 5 เท่า และ 50 เท่า ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พื้นผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นหลังการสปัตเตอร์ริงนั้น สิ่งที่ให้ชัดเจนคือ สีพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงมีลักษณะสีเหลืองกึ่งน้ำตาล ที่ใช้เวลาสำหรับการเคลือบ 5 นาที ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 (รอยขีดข่วนบนผิววัสดุเกิดจากการขัดในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งไม่ได้เกิดจากการสปัตเตอร์ริง) พื้นผิวสีมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย มีร่องรอยอนุภาค หรือ บางสิ่งที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกับ โลหะบนชิ้นงาน ที่ใช้เวลาสำหรับการเคลือบ 10 นาที ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 เมื่อเวลาสำหรับการเคลือบมากขึ้น สีของพื้นผิวเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับ 5 นาที ในขณะที่ ความแตกต่างที่แรงดันไฟฟ้า เท่ากัน แต่ เพิ่มพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ปริมาณร่องรอยมี

เพิ่มมากขึ้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางร่องขนาดใหญ่ขึ้น ที่ใช้เวลาสำหรับการเคลือบ 15 นาที ที่แรงดัน 500 โวลต์ เริ่มมีกลุ่มของร่องรอยกว้างขึ้น และ ที่แรงดัน 800 โวลต์ มีลักษณะพื้นผิวเป็นรูปพรุน น่าจะเกิดจากการสเปตเตอร์ริงเป็นเวลานาน ที่แรงดันสูง เมื่อเทียบกับ เงื่อนไขอื่นๆ



(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์

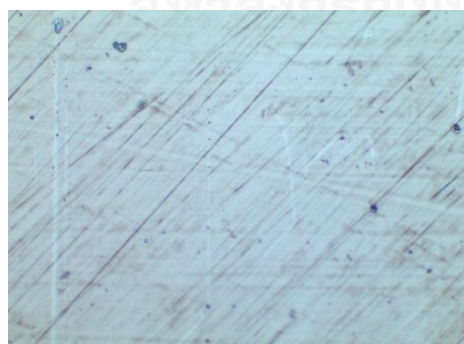


(ข).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์



(ค).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และ Microwave

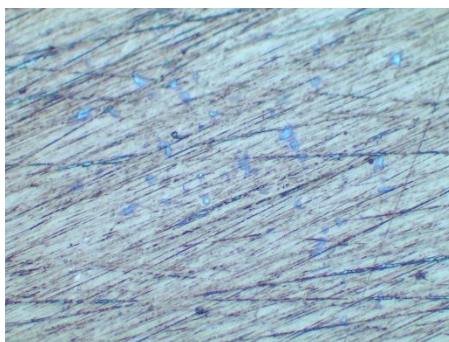
รูปที่ 4.11 สภาพพื้นผิวหลังการสเปตเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 5 นาที



(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์



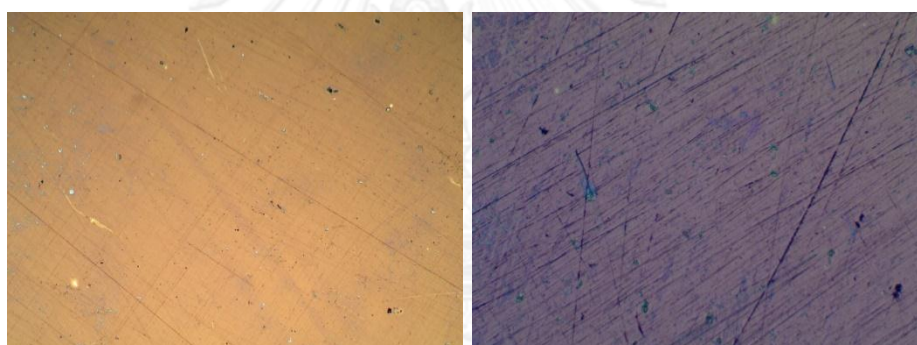
(ข).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์



(ค).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และ Microwave

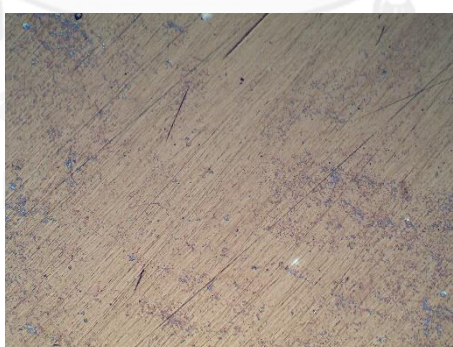
รูปที่ 4.12 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 50 เท่า ที่เวลา 5 นาที

ที่เวลา 10 นาทีสภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 5 เท่า และ 50 เท่า ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์

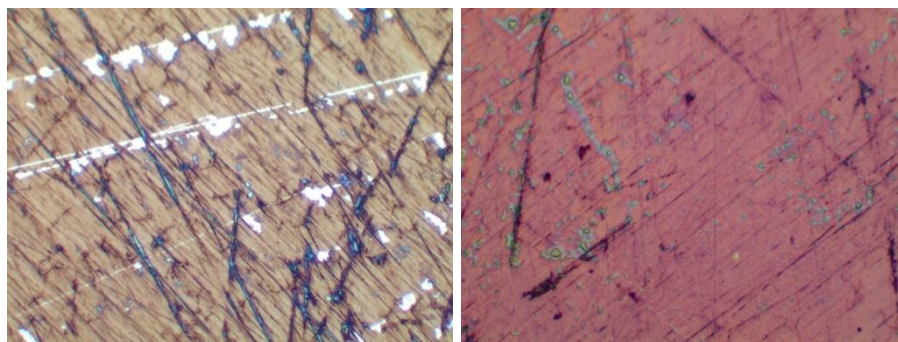
(ข).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์



(ค).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และ Microwave

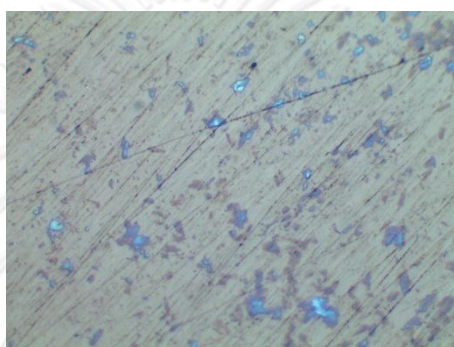
รูปที่ 4.13 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 10 นาที





(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์

(ข).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์



(ค).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และ Microwave

รูปที่ 4.14 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 50 เท่า ที่เวลา 10 นาที

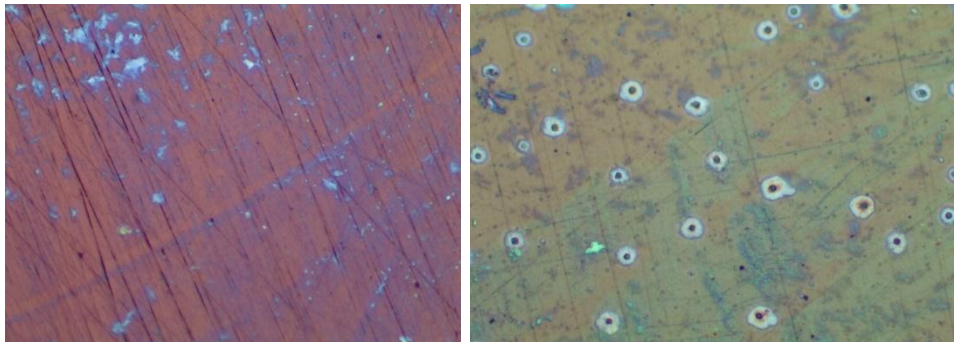
ที่เวลา 15 นาที สภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 5 เท่า และ 50 เท่า ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์

(ข).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์

รูปที่ 4.15 สภาพพื้นผิวหลังการสปัตเตอร์ริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 15 นาที

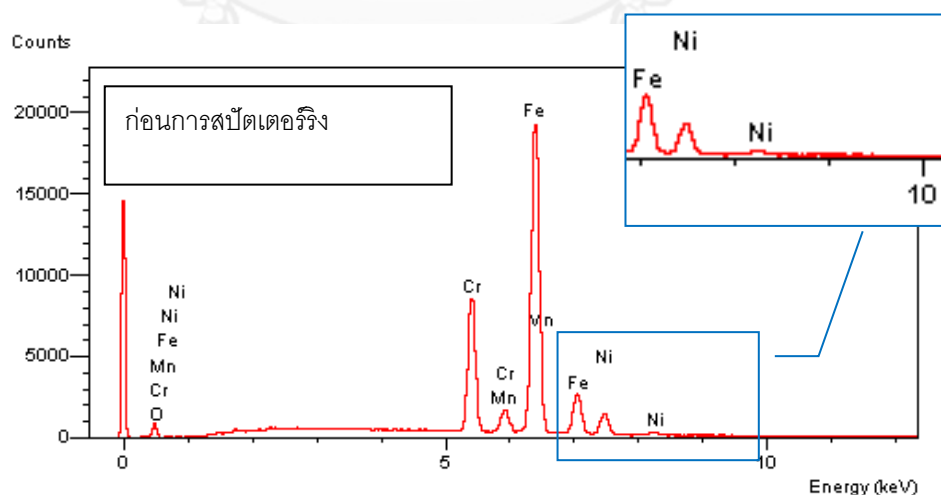


(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ (ข).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์  
รูปที่ 4.16 สภาพพื้นผิวหลังการสัต์เตอรัริง กำลังขยาย 5 เท่า ที่เวลา 15 นาที

#### 4.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุจาก EDS

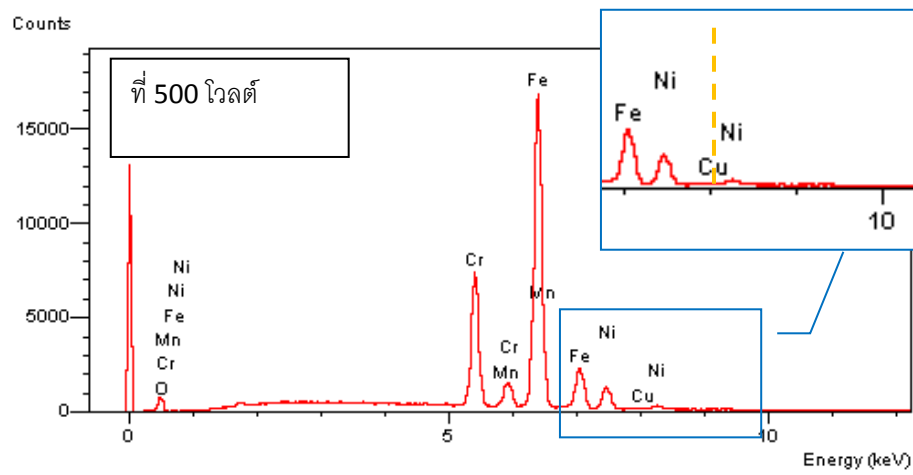
จากเงื่อนไขข้างต้น จึงเลือกกลุ่มที่มีความเป็นไปได้ของการทดสอบที่มีทองแดงเคลือบอยู่บนชิ้นตัวอย่าง โดยใช้เงื่อนไขที่ 500 โวลต์ ใช้เวลา 10 นาที สำหรับการเคลือบ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectrometry) ส่งทำพร้อม SEM และหาจุดยอด (Peak) ของทองแดง ( $K\alpha$ ) ที่ 8.04 keV แล้ววัดสเปกตรัมดังรูปที่ 4.17 และสามารถสร้าง mapping สำหรับการกระจายของทองแดงดังรูปที่ 4.18

จากสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะสังเกตได้ว่า วัสดุที่ต้องการเคลือบ หรือ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 นั้น ไม่มีส่วนประกอบของทองแดง ดังรูปที่ 4.17 (ก). ทำให้เห็นได้ว่าสเปกตรัมหลังการสัต์เตอรัริงในกระบวนการเคลือบ สามารถสามารถวัดทองแดงได้บนผิวโลหะ บนเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304 ได้ ดังรูปที่ 4.17 (ข). (ค). และ (ง). โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป มีผลต่อปริมาณทองแดงที่ลงไปเคลือบบนพื้นผิวโดยตรง การวิเคราะห์สัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุหลักที่พบบนโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304 แสดงดังตารางที่ 4.8

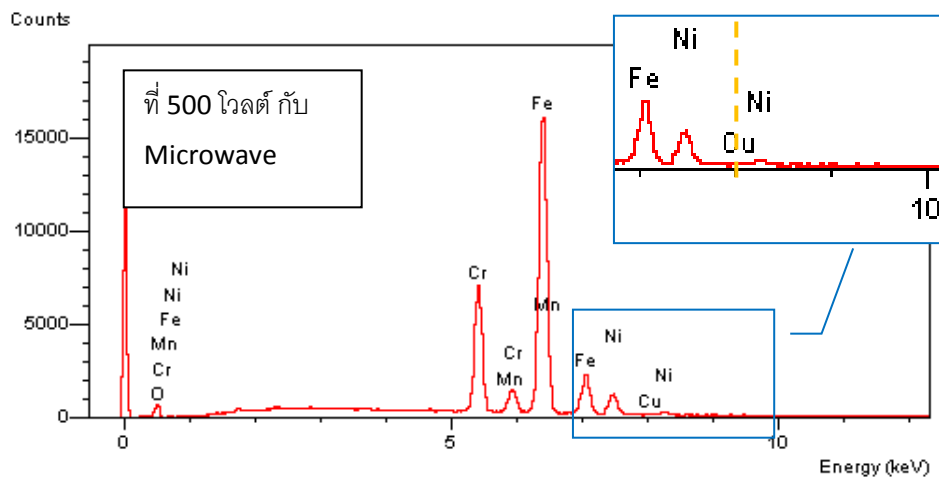


(ก).ก่อนการสัต์เตอรัริง

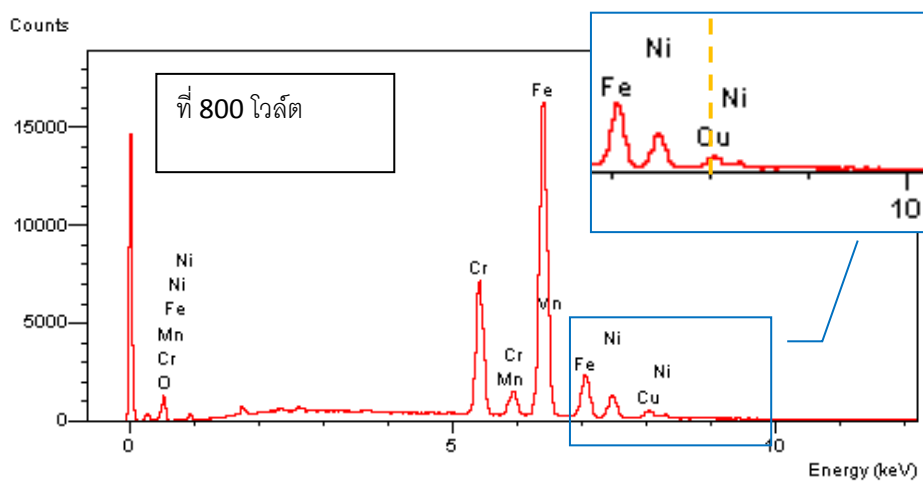




(ข).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ ที่เวลา 10 นาที



(ค).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และ Microwave ที่เวลา 10 นาที



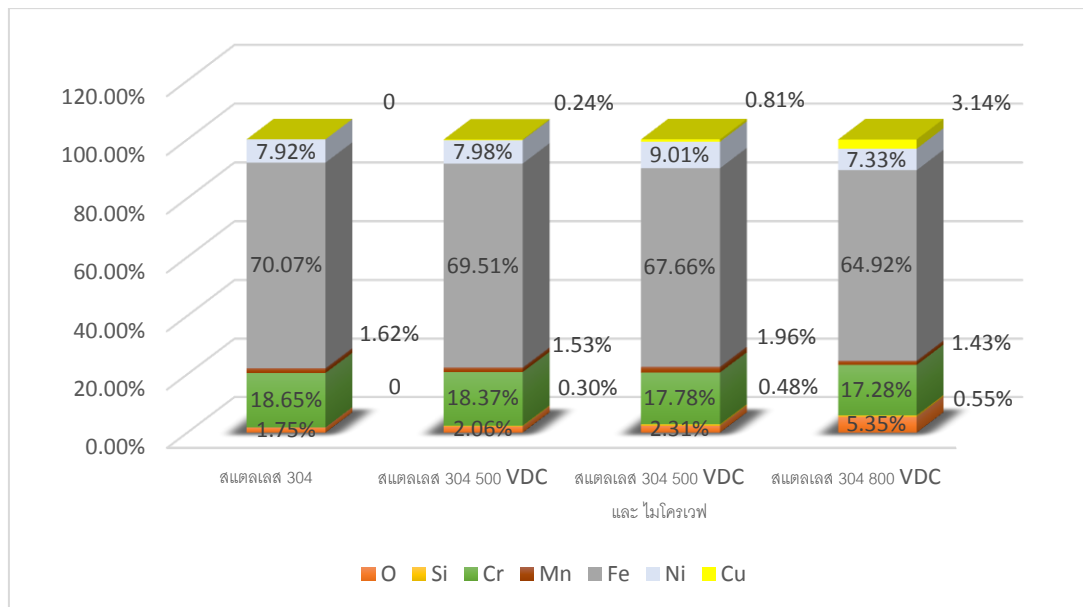
(ง).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์ ที่เวลา 10 นาที

รูปที่ 4.17 สเปกตรัมองค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ต้องการเคลือบ ก่อนและหลัง กระบวนการเคลือบ

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนของธาตุองค์ประกอบบนผิวตัวอย่าง ของโลหะเหล็กกล้าชนิด 304 จากการวิเคราะห์โดย EDS

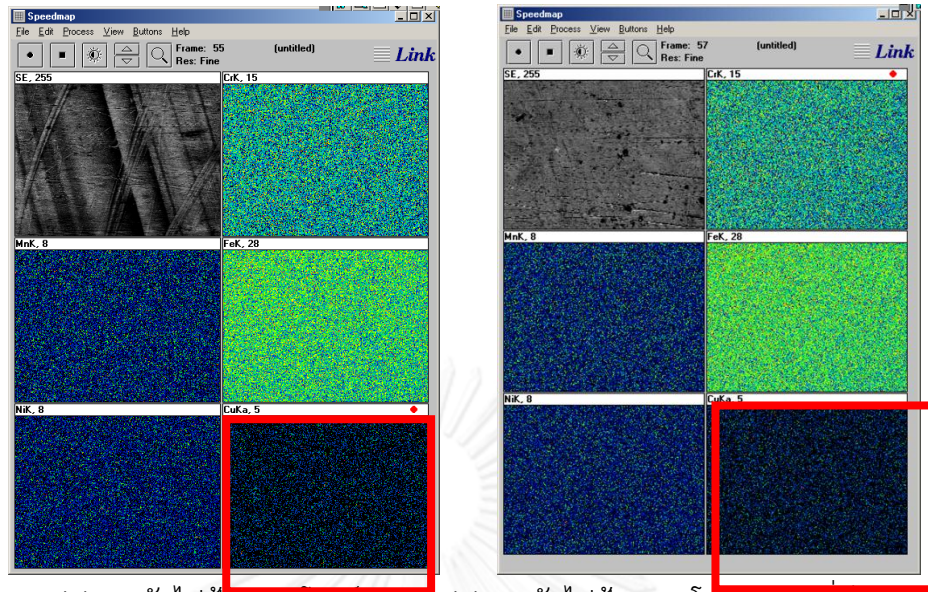
เงื่อนไข	เวลา	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
โลหะเหล็กกล้า ชนิด 304	-	1.75%	-	18.65%	1.62%	70.07%	7.92%	-
เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้า 500 VDC	10 นาที	2.06%	0.30%	18.37%	1.53%	69.51%	7.98%	0.24%
เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้า 500 VDC และ ไมโครเวฟ	10 นาที	2.31%	0.48%	17.78%	1.96%	67.66%	9.01%	0.81%
เคลือบด้วยแรงดันไฟฟ้า 800 VDC	10 นาที	5.35%	0.55%	17.28%	1.43%	64.92%	7.33%	3.14%

จากผลการทดลองพบแนวโน้มของปริมาณของทองแดงที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการทดลองโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจาก 500 โวลต์ เป็น 800 โวลต์ ทั้งนี้เนื่องจากจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสเปคโตรริงมากขึ้น ทองแดงมีโอกาที่จะหลุดออกจากขั้วแคโทดมากขึ้น ทำให้ปริมาณการเคลือบตัวสูงขึ้น โปรดสังเกตว่าค่าจากการวิเคราะห์โดยวิธี EDS แสดงเป็นสัดส่วน (เปอร์เซ็นต์) โดยคิดเปรียบเทียบกับความเข้มของพีคของธาตุอื่นที่วัดได้ ดังนั้น ปริมาณในหน่วยเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้นจึงแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณที่มากขึ้น ไม่ได้หมายถึงค่า Absolute value ของปริมาณ การวิเคราะห์พบว่าสัดส่วนของทองแดงที่วัดได้ที่แรงดันไฟฟ้าที่ 500 โวลต์ เพิ่มขึ้นจาก 0.24% เป็น 3.14% ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วน 13 เท่าของแรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ เมื่อโดยเพิ่มเงื่อนไขของคลื่นไมโครเวฟประกอบกับใช้แรงดันที่ 500 โวลต์ และเวลาการเคลือบที่ 10 นาที จะสังเกตได้ว่า ที่แรงดันที่เท่ากัน คลื่นไมโครเวฟมีส่วนเพิ่มโอกาสในกระบวนการเคลือบที่สูงขึ้น จากสัดส่วนปริมาณทองแดงที่ 0.24% เพิ่มขึ้นเป็น 0.81% ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วน 3.4 เท่าของแรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ที่ไม่มีคลื่นไมโครเวฟ จะสังเกตได้ว่า ค่าของ ออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนตัวชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากความชื้นภายนอก ส่วนซิลิกอนที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากหัววัดที่มีส่วนประกอบของซิลิกอน ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วน ขององค์ประกอบธาตุที่เปลี่ยนแปลง



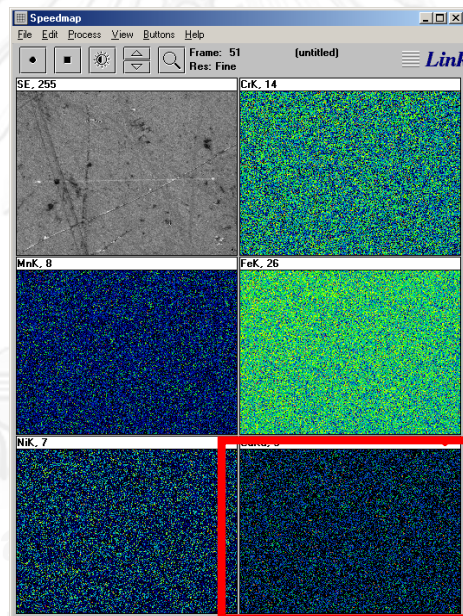
รูปที่ 4.18 อัตราส่วน ขององค์ประกอบธาตุที่เปลี่ยนแปลง ก่อนและหลังการกระบวนการเคลือบ

Mapping ที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ถึงการกระจายตัวของทองแดงบนพื้นผิวของโลหะเหล็กกล้าชนิด 304 มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 4.19 ที่แรงดันต่างกันนั้น มีการกระจายตัวที่ต่างกัน สังเกตได้จาก ที่แรงดันไฟฟ้า ที่ 800 โวลต์มีสีเข้มกว่าตัวที่มากกว่า แรงดันไฟฟ้าที่ 500 โวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณทองแดงมากกว่า ในรูป 4.19 ก). ร่องรอยที่เกิดขึ้น เกิดจากรอยขีดข่วนจากการเตรียมตัวอย่าง ไม่ได้เกิดจากเคลือบผิว



(ก).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์.

(ข).แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ กบ คลนไมโครเวฟ



(ค).แรงดันไฟฟ้า 800 โวลต์

รูปที่ 4. 19 Mapping

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์เรโซแนนซ์ ซึ่งอาศัยพื้นฐานการพัฒนามาจากเทคนิค ดีซี สเปคโตรริง โดยอาศัยวัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศเพื่อนำมาออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อศึกษาถึงหลักการและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไมโครเวฟอิเล็กทรอนิกส์เรโซแนนซ์ โดยสามารถสรุปจากผลการทดสอบและสมรรถนะเครื่องได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการออกแบบและพัฒนา

ผลการการพัฒนาและออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้ในกระบอกสุญญากาศเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304 ทั้งหมดซึ่งสามารถหาได้ภายในประเทศโดยที่อาศัยขนาดที่มีใช้อยู่โดยทั่วไปนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งยึดหลักตามขนาดของวัสดุเป่าสารเคลือบ และวัสดุที่ต้องการเคลือบเป็นเงื่อนไขหลัก

##### 5.1.2 ผลการทดสอบระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ผลทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วนที่จ่ายให้ขั้วแคโทดและส่วนที่จ่ายให้ระบบไมโครเวฟพบว่าสามารถปรับค่าได้ต่อเนื่องที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยการปรับค่า อินพุต โดยเริ่มปรับตั้งแต่ 35 โวลต์ ถึง 100 โวลต์ ทำให้ได้ค่าเอาต์พุต ที่อยู่ในช่วง 480 โวลต์ ถึง 1,000 โวลต์ สำหรับชุดจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูงให้ขั้วแคโทด และ ชุดจ่ายไฟฟ้าให้ระบบไมโครเวฟ สามารถปรับค่าอินพุตได้ตั้งแต่ 75 โวลต์ ถึง 220 โวลต์ ทำให้ได้ค่า เอาต์พุต ที่อยู่ในช่วง 880 โวลต์ ถึง 3,500 โวลต์

##### 5.1.3 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศ

ทดสอบระบบสุญญากาศพบว่าคอลลิมน์สุญญากาศที่ออกแบบสามารถรองรับระดับความเป็นสุญญากาศได้ถึง  $5.4 \times 10^{-2}$  ทอร์ ใช้เวลาในการสูบอากาศครั้งแรกจะใช้เวลา นานกว่าครั้งหลัง เมื่อสูบสุญญากาศ จะใช้เวลาทั้งหมด 30-40 นาที

##### 5.1.4 ผลการทดสอบกระบวนการทำงานของเครื่อง

ผลทดสอบการทำงานของระบบ พบว่าค่า แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วแคโทดนั้นมีผลต่อกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ที่เวลาเท่ากัน แต่แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ของทองแดงที่เคลือบลงบนวัสดุมีแนวโน้มการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขลองปรับเปลี่ยนเรื่องเวลาที่ แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน หรือ เพิ่มคลื่นไมโครเวฟเข้าไปช่วยกระตุ้นให้เกิดอัตราการชนมากขึ้น ก็ยังทำให้เปอร์เซ็นต์ของทองแดงเพิ่มเท่ากันกับเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จึงกล่าวได้ว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้น สามารถเคลือบได้จริงโดยมี ผลจากค่าตัวแปร ของแรงดันไฟฟ้า ,คลื่นไมโครเวฟ และ เวลา ซึ่งแรงดันมีที่เพิ่มขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้น สามารถส่งพลังงานให้อิเล็กตรอนอิสระได้มากขึ้น ทำให้เกิดอัตราการแตกตัวของประจุในพลาสมา สูงขึ้น คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งให้อิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานจลน์ มากขึ้น ทำให้ค่าพลังงานจลน์ มีค่าสูงกว่าพลังงานไอออนไนเซชัน

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 ระบบสุญญากาศยังมีอัตราในการสูบอากาศต่ำไปเนื่องจากการทดสอบการสปัตเตอร์ริงนั้นควรมีความดันสุญญากาศ ขณะสปัตเตอร์ริงนั้น ประมาณ  $5.4 \times 10^{-3}$  ทอร์ หลังจากใส่ก๊าซอาร์กอนเข้าไป

5.2.2 ภายในกระบอกสุญญากาศควรมีขนาดใหญ่กว่านี้เพื่อให้ง่ายในการเปลี่ยนชิ้นงานวัสดุเป้าและวัสดุที่ต้องการเคลือบ อีกทั้งต้องขันนอตจำนวนมากสำหรับการเปิด หรือปิด กระบอกสุญญากาศ

5.2.3 กระจกที่ใช้ไม่สามารถทนความร้อนได้ เมื่อเปิดคลื่นไมโครเวฟนานกว่า 10 นาที ส่งผลให้กระจกแตก และทำให้ภายในสูญเสียนิวเคลียสความเป็นสุญญากาศ

5.2.4 ระบบไฟฟ้า ที่จ่ายให้ขั้วแคโทดและระบบไมโครเวฟ ไม่มีความเสถียรพออาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน อีกทั้งประกอบกับผู้ทำวิจัย ไม่มีเครื่องมือวัดไฟฟ้าแรงดันสูงที่เป็น ดิจิตอล ทำให้ต้องใช้เครื่องวัดแบบเข็มอาจทำให้คลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก

5.2.5 ไม่มีชุดวัดอุณหภูมิภายในกระบอกสุญญากาศจึงไม่สามารถทราบอุณหภูมิภายในห้องทดลองขณะเกิดพฤติกรรมต่างๆในกระบวนการเคลือบได้และควรเพิ่มชุดวัดอุณหภูมิสำหรับพลาสมาเพื่อใช้สังเกตพฤติกรรมของพลาสมาเพิ่มเติม

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ชุด ECR สามารถนำไปพัฒนาต่อโดยการเพิ่มเติมแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น จะส่งผลให้อิเล็กตรอนหมุนตัวเกลียว และทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มระยะในกาชนกับอนุภาคของก๊าซมากขึ้น

5.3.2 การออกแบบกระบอกสุญญากาศควรเปลี่ยนจากนอตเป็นลักษณะ แคลม ยึดแทนเพื่อง่ายต่อการถอดเข้าถอดออกขึ้นและ เปลี่ยนจากประเกนเป็นโอริงแทนเพื่อให้ระบบสุญญากาศไม่รั่วไหลออก

5.3.3 ควรเพิ่มขนาดปั๊มในระดับ High vacuum ปั๊มอีก 1 ชุด โดยใช้ diffusion pump หรือ turbo pump เพื่อทำให้ความดันสุญญากาศภายในมีค่าสูงกว่า  $5.4 \times 10^{-5}$  ทอร์

5.3.4 ควรมีวัสดุกำบังและป้องกันรังสี เอ็กซ์-เรย์ ที่เกิดขึ้นจากการถ่ายโอนพลังงานของอิเล็กตรอนกับอนุภาคของก๊าซอาร์กอน

5.3.5 ควรมีการทำความสะอาดตัวอย่าง ก่อนเข้าทำการทดลองและก่อนกระบวนการวิเคราะห์ เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในอากาศอาจจะส่งผลให้ เกิดออกไซด์บนตัวชิ้นงานได้ ทำให้การวิเคราะห์มีสิ่งเจือปน

5.3.6 กระจกสำหรับคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านควรเปลี่ยนจากกระจกธรรมดาเป็นแบบ กระจกสำหรับห้องทดลองสุญญากาศเพื่อสามารถทนความร้อนได้สูงขึ้น เนื่องจากกระจกทำธรรมดาเมื่อได้รับความร้อนทำให้อุณหภูมิตรงกลางและด้านข้างได้รับความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้กระจกเกิดความเครียดและแตกออก

5.3.7 วิธีการชั้นสกรูยีตอุปกรณ์สุญญากาศควรที่จะทำให้ระดับความดันภายในห้องทดลอง เป็นสุญญากาศก่อนที่จะชั้นสกรูยีตเพราะจะทำให้หน้าสัมผัสด้านหน้าแปลนดูตติดกันและไม่ จำเป็นต้องชั้นสกรูยีตแน่นมาก

5.3.8 ควรเพิ่มอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในกระบอกสุญญากาศ เพื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงพฤติกรรม ต่างๆของกระบวนการเคลือบที่มีผลต่ออุณหภูมิและสิ่งแวดล้อมภายในกระบอกสุญญากาศ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## รายการอ้างอิง

1. วัฒนสุภิญญา, น., สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม เตรียมโดย เทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ., 2553.
2. ผศ.บดินทร์ชาติ สุขบท , น.ส., นางสาวอัญชัน หมวกงาม , นายกมล เอี่ยมพนากิจ, การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง. สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551.
3. Tengcai Ma , X.D., Wenqi Lu and Jialiang Zhang *Synthesis of ceramic films on metallic substrates using magnetron-sputtering deposition synchroenhanced by microwave ECR plasma source ion.* Dalian University of Technology. China, 1998.
4. Jun Xu , X.D., Jialiang Zhang , Wenqi Lu and Tengcai Ma, *Characterization of CNx films prepared by twinned ECR plasma source enhanced DC magnetron sputtering.* Dalian University of Technology. China, 2001.
5. Weerasak Somkhunhot , t.B., Ian Thomas , Tosawat Seetawan and Vittaya Amornkitbamrung, *Bipolar Pulsed-DC Power Supply for Magnetron Sputtering and Thin Films Synthesis.* Sakon Nakhon Rajabath University. Thailand, 2007.
6. J.F. Chang , H.Y.U., T.F Young , Y.C Wang ,W.C. Hwang *Combined magnetron sputtering and ECR-CVD deposition of diamond like carbon films.* National Cheng Kung University Business Incubation Center. Taiwan, 2002.
7. Kiyotaka Wasa , M.K.a.H.A., *THIN FILM MATERIALS Sputtering of Compound Materials.* 2004.
8. Bunshah , R.F., (ed) , Noyes Publications NJ *Deposition Technology for file and Coating.* 1982.
9. Lichtenberg, M.A.L.a.A.J., *Principle of Plasma Discharge and Material Processing.* 1994.
10. Wasa, K.a.H.S.J.J., *Electric Engineering.* 1965.
11. Von Engel, A., and Steenbeck, M., *Elektrische Gasentladung II.* 1932.
12. N, M.E.D.a.L., *Sputtering by Particle Bombardment III” , Springer-Verlag , Berlin 1991.*
13. ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, L. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า Available from: <http://www.lesa.biz/astronomy/light/em-waves>.
14. สารานุกรมเสรี, ว. ไมโครเวฟ (microwave). 26 March 2014; Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
15. Tr., A.S.G., *Microwave tubes.* 1986.



16. K.Iwasaki, C.P.L.a., *In situ monitoring of plasma parameter in the after glow region of ECR sputtering system tribological coating*. 2002.
17. ศิวาว์ชนาโน, ด.ช., ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.






ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

1.มาตรฐานการออกแบบระบบสุญญากาศ (ISO Standard)

อ้างอิงบริษัท MDC Vacuum Limited®



ISO KF Assembly

**Features**

- Fast connect and disconnect
- 316L (1.4301) Stainless steel fittings
- All-metal aluminium clamps
- Viton® O-ring bakeable to 150°C
- Single wing nut closure
- ISO compatible

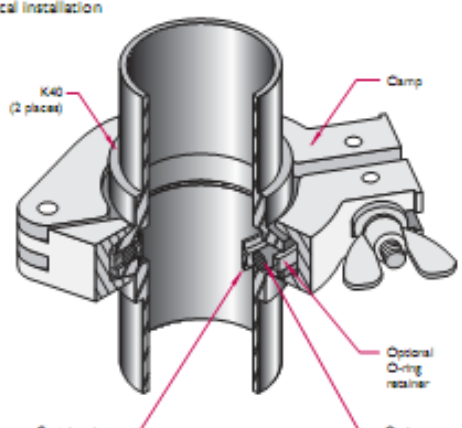
**Specifications**

<b>Material</b>	304 Stainless steel/TIG welded
<b>Fittings</b>	Aluminium
<b>Clamps</b>	Du Pont/Viton® fluoroelastomer
<b>Standard O-rings</b>	
<b>Vacuum</b>	O-ring compression by uniform pressure application around the 15° outer flange surfaces
<b>Flanges</b>	ISO standard dimensions 360° rotatable
<b>Tube bore sizes<sup>1</sup></b>	Four standard flange sizes for use with four tube sizes
<b>Tube bore sizes<sup>1</sup></b>	12.7, 15.8, 22.1, 38.1 and 50mm
<b>Maximum temperature</b>	150°C
<b>Components</b>	Reusable and interchangeable with other ISO dimension components of the same size

<sup>1</sup> MDC Vacuum reserves the right to substitute a larger-bore tube according to availability

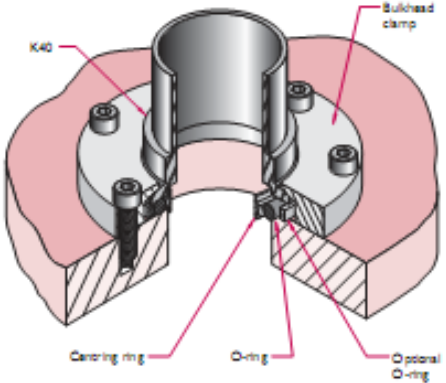
**UHV Series**

**ISO KF**  
Typical installation



Labels: K40 (2 pieces), Clamp, Centering ring, Optional O-ring retainer, O-ring

**Bulkhead clamp**  
Typical installation



Labels: K40, Bulkhead clamp, Centering ring, O-ring, Optional O-ring retainer

รูปที่ ก. 1 รูปแบบในการเชื่อมต่อหน้าแปลนและคุณสมบัติ



ISO KF vacuum systems employ components with metric interface dimensions which have been defined by the International Standards Organisation (ISO). This ensures a high degree of compatibility between components obtained from different sources. MDC Vacuum ISO KF are compatible with Klein Flange (KF) types.

Use ISO KF for tube sizes DN16 to DN50.

Our standard range of KF flanges and fittings are manufactured from 304 (1.4301) stainless steel.

ISO KF constitutes an economical system of reusable interfacing stainless steel vacuum fittings and components for 19.1, 25.4, 38.1 and 50.8mm OD tubing. Assemblies are usable to  $10^{-8}$  mbar. Maximum temperature for sustained use is 150°C. They are ideal for vacuum systems requiring regular assembly and disassembly.

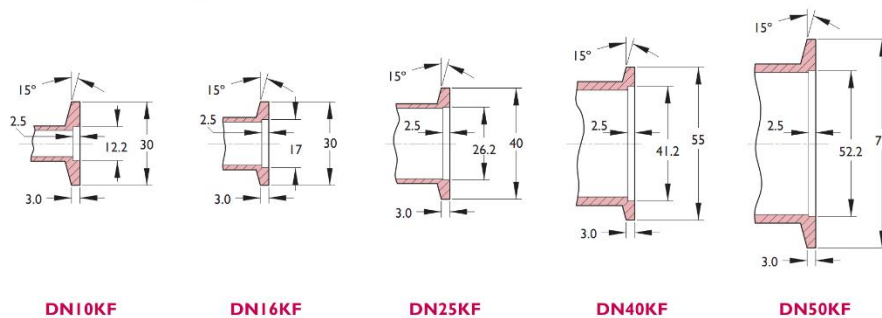
Each vacuum seal is made by compression of an O-ring on a centring ring between mating flanges. The seal is made in seconds by finger-closure of a wing nut on the all-metal hinged aluminium clamp.

The ISO KF family of modular building block components includes all commonly used standard fittings, feedthroughs and accessories. Reducing flanges are available to connect different size components. Mating flanges are offered to interface with pipe and other flange systems including LF and CF.

#### Inch-metric ISO comparison

Tube OD inches	MDC Vacuum reference	ISO	Nominal tube ID mm
0.75	K16	DN16KF	16
1.00	K25	DN25KF	25
1.50	K40	DN40KF	40
2.00	K50	DN50KF	50
2.50	L63	DN63LF	63.5
4.00	L100	DN100LF	102
6.00	L160	DN160LF	153
8.00	L200	DN200LF	212
10.00	L250	DN250LF	254
12.75	L320	DN320LF	316
16.00	L400	DN400LF	400
20.00	L500	DN500LF	500

#### Dimensions with ISO industry cross-references



MDC Vacuum reserves the right to substitute a larger-bore tube according to availability

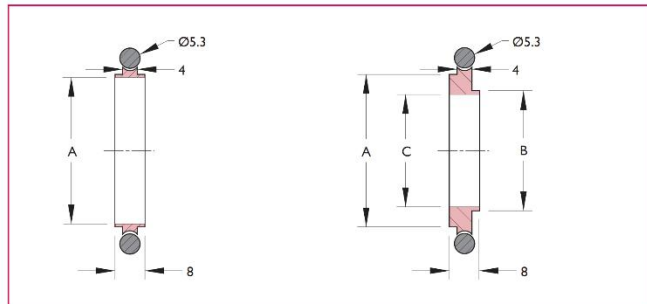
รูปที่ ก. 2 ขนาดของหน้าแปลน

## Centring rings



### Features

- Standard ring mates ISO KF of equal size
- Adaptor ring mates ISO KF of unequal size
- Includes elastomer O-ring
- Stainless steel or aluminium construction



Centring ring assemblies are placed between two ISO flanges with matching outer diameters. The widest portion of the centring ring rests inside a capture groove on the flange and the O-ring rests on the flat polished surface outside the capture groove. On a blank flange, the groove seen on the face of a flange is the capture groove, with the O-ring making contact with this flange face just outside the groove.

### Aluminium Viton® O-ring

- Maximum bakeout temperature 200°C
- Sustained use to 150°C
- Aluminium

KF Flange	A	Reference	Part number	£	€
DN16KF	16	K16-CRA	<b>7710013</b>	2	3
DN25KF	25	K25-CRA	<b>7710014</b>	2	3
DN40KF	40	K40-CRA	<b>7710015</b>	3	5
DN50KF	50	K50-CRA	<b>7710016</b>	5	8

### Aluminium Buna-N® O-ring

- Maximum bakeout temperature 100°C
- Sustained use to 80°C
- Aluminium

KF Flange	A	Reference	Part number	£	€
DN16KF	16	K16-CRAB	<b>7710017</b>	1	2
DN25KF	25	K25-CRAB	<b>7710018</b>	2	3
DN40KF	40	K40-CRAB	<b>7710019</b>	2	3
DN50KF	50	K50-CRAB	<b>7710020</b>	2	3

### Stainless steel Viton® O-ring

- Maximum bakeout temperature 200°C
- Sustained use to 150°C
- Stainless steel

KF Flange	A	Reference	Part number	£	€
DN16KF	16	K16-CR	<b>7710000</b>	2	3
DN25KF	25	K25-CR	<b>7710001</b>	3	5
DN40KF	40	K40-CR	<b>7710002</b>	3	5
DN50KF	50	K50-CR	<b>7710003</b>	5	8

### Stainless steel silicone O-ring

- For use in corrosive environments where silicone is acceptable
- Maximum bakeout temperature 200°C
- Sustained use to 150°C
- Stainless steel

KF Flange	A	Reference	Part number	£	€
DN16KF	16	K16-CRS	<b>7710021</b>	4	6
DN25KF	25	K25-CRS	<b>7710022</b>	6	9
DN40KF	40	K40-CRS	<b>7710023</b>	8	12
DN50KF	50	K50-CRS	<b>7710024</b>	10	15

### Adaptor rings

- Viton® O-ring
- Maximum bakeout temperature 200°C
- Sustained use to 150°C
- Stainless steel

KF Flange	A	B	C	Reference	Part number	£	€
DN16KF-10KF	17	12	10	K16-10-CR	<b>7710010</b>	4	6
DN25KF-20KF	26	22	20	K25-20-CR	<b>7710011</b>	6	8
DN40KF-32KF	41	34	32	K40-32-CR	<b>7710012</b>	7	11

รูปที่ ก. 3 ชนิดและขนาดของ โอริง



ISO LF

### Features

- HV rated to  $1 \times 10^{-8}$  mbar
- High-temperature rated to 200°C
- Symmetric and non-rotatable geometry
- Rotatable bolt ring available
- Elastomer O-ring seal
- Two methods of fastening
- ISO-compatible and modified ISO design

### Specifications

#### Material

Flanges	304ss
Rotatable bolt ring	Aluminium
O-rings	Viton® or Buna-N® elastomer
Claw-clamps	Aluminium

#### Fastening

Claw-clamp	M8, (8 required)
Bolt type	Hexagonal head, M8
Nut type	Hexagonal
Torque	Bolts: 9-14 Nm

**Vacuum range**  $1 \times 10^{-8}$  mbar

Temperature range	Minimum	Intermittent	Sustained
Viton®	-20°C	200°C	150°C
Buna-N®	-20°C	100°C	80°C

**Weight** 27 kg maximum

#### Dimensions

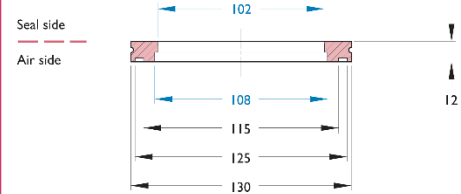
Clamp style	130.0 OD x 108 ID maximum
Bolt style	165.1 OD x 108 ID maximum

A rotatable bolt ring assembly is used to add bolt holes to a standard claw-clamp style ISO LF flange. An assembly consists of one aluminium bolt ring and one retaining ring. The retaining ring fits into a groove on a claw-clamp style flange and holds the bolt ring onto the flange. Replacement retaining rings are also available separately.

Tube OD nominal	Figure	Flange reference	Fastening method	Wt kg	Reference	Part number	£	€
-	1	Blank	Claw-clamp	0.4	LI00-B	<b>812001</b>	50	75
-	2	Blank	Bolt	2.0	LI00-BB	<b>852001</b>	79	119
108	2	Weld	Bolt	2.0	LI00-BVW	<b>850010</b>	71	106
108	1	Weld	Claw-clamp	0.3	LI00-W	<b>813024</b>	35	53
<b>Optional flange converter</b>				<b>Wt kg</b>	<b>Reference</b>	<b>Part number</b>	<b>£</b>	<b>€</b>
Rotatable bolt ring assembly				0.9	LI00-RBF	<b>853001</b>	32	47
Retaining ring				0.1	LI00-RR	<b>853021</b>	8	12

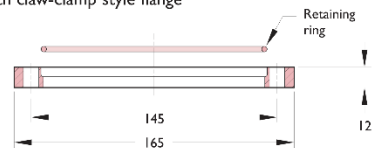
## HV Series

**Figure 1** Claw-clamp style

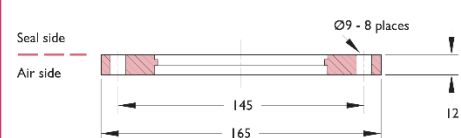


**Rotatable bolt ring option**

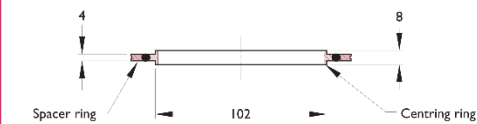
Used with claw-clamp style flange



**Figure 2** Bolt style



**Figure 3** Centring ring assembly



Dimensions in blue are common to all flanges

Centring ring capture groove on blank flanges is 6.4 wide

รูปที่ ก. 4 หน้าแปลนขนาดใหญ่ สำหรับช่องมอง



### Features

- HV rated to  $1 \times 10^{-8}$  mbar
- High-temperature rated to 200°C
- Symmetric and non-rotatable geometry
- Rotatable bolt ring available
- Elastomer O-ring seal
- Two methods of fastening
- ISO-compatible and modified ISO design

### Specifications

#### Material

Flanges	304ss
Rotatable bolt ring	Aluminium
O-rings	Viton® or Buna-N® elastomer
Claw-clamps	Aluminium

#### Fastening

Claw-clamp	M8, (4 required)
Bolt type	Hexagonal head, M8
Nut type	Hexagonal
Torque	Bolts: 9-14 Nm

#### Vacuum range

$1 \times 10^{-8}$  mbar

Temperature range	Minimum	Intermittent	Sustained
Viton®	-20°C	200°C	150°C
Buna-N®	-20°C	100°C	80°C

#### Weight

27 kg maximum

#### Dimensions

Clamp style	95 OD x 76 ID maximum
Bolt style	130 OD x 76 ID maximum

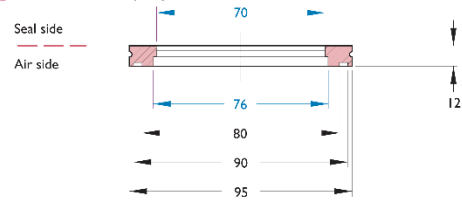
A rotatable bolt ring assembly is used to add bolt holes to a standard claw-clamp style ISO LF flange. An assembly consists of one aluminium bolt ring and one retaining ring. The retaining ring fits into a groove on a claw-clamp style flange and holds the bolt ring onto the flange. Replacement retaining rings are also available separately.

Tube OD nominal	Figure	Flange reference	Fastening method	Wt kg	Reference	Part number	£	€
-	1	Blank	Claw-clamp	0.5	L63-B	812000	33	49
-	2	Blank	Bolt	1.3	L63-BB	852000	48	72
76	2	Weld	Bolt	1.3	L63-BW	850009	46	68
76	1	Weld	Claw-clamp	0.3	L63-W	813023	45	68

Optional flange converter	Wt kg	Reference	Part number	£	€
Rotatable bolt ring assembly	0.9	L63-RBF	853000	26	39
Retaining ring	0.1	L63-RR	853020	6	9

## HV Series

Figure 1 Claw-clamp style



Rotatable bolt ring option

Used with claw-clamp style flange

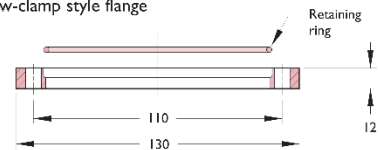


Figure 2 Bolt style

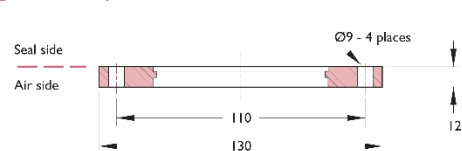
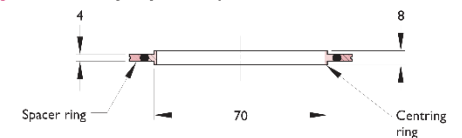


Figure 3 Centring ring assembly



Dimensions in blue are common to all flanges

Centring ring capture groove on blank flanges is 6.4 wide

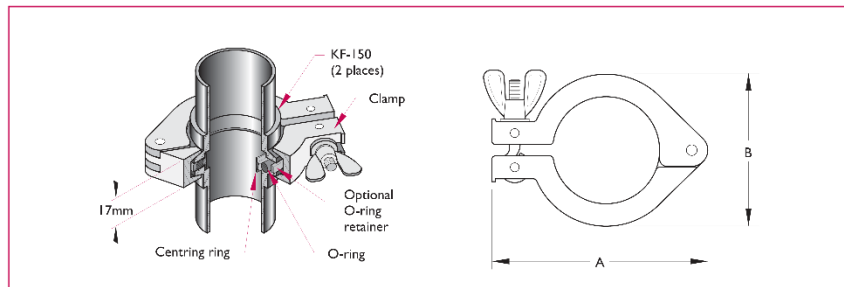
รูปที่ ก. 5 หน้าแปลน สำหรับจุดต่อขั้วไฟฟ้า

## Hinged clamp



### Features

- Fastens ISO KF of comparable size
- Quick make and break
- Stainless steel wing nut and bolt
- Aluminium construction
- Requires centring ring with elastomer gasket



Flange size	Tube size	A	B	Wt (kg)	Reference	Part number	£	€
DN10/16KF	12.7-19.0	71	45	0.2	K16-C	<b>7701000</b>	2	3
DN20/25KF	25.4	80	55	0.2	K25-C	<b>7701001</b>	2	3
DN32/40KF	38.1	96	70	0.3	K40-C	<b>7701002</b>	3	5
DN50KF	50.8	123	95	0.5	K50-C	<b>7701003</b>	4	6

Hinged clamp assemblies are the most commonly used method for making ISO KF vacuum seal connections. Prior to clamping, flanges can be rotated 360° and accept self-centring centring ring seals. Pressure is applied uniformly around the 15° outer surface of both flanges by finger-tightening

the single wing nut until the first metal-to-metal contact is made between the spacing lips of the centring ring and the inner surface of the mating flanges. This compresses the O-ring between the flanges and makes the vacuum seal.

รูปที่ ก. 6 ชนิดแคล้ม และขนาด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## 1.คุณสมบัติของ โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304



AK Steel Type 304 is a variation of the basic 18-8 grade, Type 302, with a higher chromium and lower carbon content. Lower carbon minimizes chromium carbide precipitation due to welding and its susceptibility to intergranular corrosion. In many instances, it can be used in the "as-welded" condition, while Type 302 must be annealed in order to retain adequate corrosion resistance.

Type 304L is an extra low-carbon variation of Type 304 with a 0.03% maximum carbon content that eliminates carbide precipitation due to welding. As a result, this alloy can be used in the "as-welded" condition, even in severe corrosive conditions. It often eliminates the necessity of annealing weldments except for applications specifying stress relief. It has slightly lower mechanical properties than Type 304.

Typical uses include architectural moldings and trim, kitchen equipment, welded components of chemical, textile, paper, pharmaceutical and chemical industry processing equipment.

### AVAILABLE FORMS

AK Steel produces Type 304 Stainless Steel in thicknesses from 0.01" to 0.25" (0.025 to 6.35 mm) max. and widths up to 48" (1219 mm). For other thicknesses and widths, inquire.

### COMPOSITION

	Type 304 %	Type 304L %
Carbon	0.08 max.	0.03 max.
Manganese	2.00 max.	2.00 max.
Phosphorus	0.045 max.	0.045 max.
Sulfur	0.030 max.	0.030 max.
Silicon	0.75 max.	0.75 max.
Chromium	18.00-20.00	18.0-20.0
Nickel	8.00-12.00	8.0-12.0
Nitrogen	0.10 max.	0.10 max.
Iron	Balance	Balance

### SPECIFICATIONS

AK Steel Types 304 and 304L Stainless Steels are covered by the following specifications:

Type 304	Type 304L
AMS 5513	AMS 5511
ASTM A 240	ASTM A 240
ASTM A 666	ASTM A 666

### MECHANICAL PROPERTIES

Typical Room Temperature Mechanical Properties

	UTS ksi (MPa)	0.2% YS ksi (MPa)	Elongation % in 2" (50.8 mm)	Hardness Rockwell
Type 304L	85 (586)	35 (241)	55	B80
Type 304	90 (621)	42 (290)	55	B82

304/304L-S-8-01-07

(ก). องค์ประกอบธาตุของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304

**AK STEEL****304/304L STAINLESS STEEL DATA SHEET****PHYSICAL PROPERTIES**

Density, 0.29 lbs/in<sup>3</sup>  
8.03 g/cm<sup>3</sup>

Electrical Resistivity, microhm-in  
(microhm-cm)  
68°F (20°C) – 28.4 (72)  
1200°F (659°C) – 45.8 (116)

Specific Heat, BTU/lb/°F (kJ/kg•K)  
32 - 212°F (0 - 100°C) – 0.12 (0.50)

Thermal Conductivity, BTU/hr/ft<sup>2</sup>/ft/°F  
(W/m•K)  
at 212°F (100°C) – 9.4 (16.2)  
at 932°F (500°C) – 12.4 (21.4)

Mean Coefficient of Thermal Expansion,  
in/in/°F (µm/m•K)  
32- 212°F (0- 100°C) – 9.4 x 10<sup>-6</sup> (16.9)  
32- 600°F (0- 315°C) – 9.6 x 10<sup>-6</sup> (17.3)  
32-1000°F (0- 538°C) – 10.2 x 10<sup>-6</sup> (18.4)  
32-1200°F (0- 649°C) – 10.4 x 10<sup>-6</sup> (18.7)

Magnetic Permeability, H = 200  
Erstedts, Annealed - 1.02 max.

Modulus of Elasticity, ksi (MPa)  
28.0 x 10<sup>3</sup> (193 x 10<sup>3</sup>) in tension  
11.2 x 10<sup>3</sup> ( 78 x 10<sup>3</sup>) in torsion

Melting Range, °F (°C) – 2550 - 2650  
(1399 - 1454)

**CORROSION RESISTANCE**

These steels exhibit excellent resistance to a wide range of atmospheric, chemical, textile, petroleum and food industry exposures.

**OXIDATION RESISTANCE**

The maximum temperature to which Types 304 and 304L can be exposed continuously without appreciable scaling is about 1650°F (899°C). For intermittent exposure, the maximum exposure temperature is about 1500°F (816°C).

**HEAT TREATMENTS**

Type 304 is non-hardenable by heat treatment. Annealing: Heat to 1900 - 2050°F (1038 - 1121°C), then cool rapidly. Thin strip sections may be air cooled, but heavy sections should be water quenched to minimize exposure in the carbide precipitation region.

Stress Relief Annealing: Cold worked parts should be stress relieved at 750°F (399°C) for 1/2 to 2 hours.

**FORMABILITY**

Types 304 and 304L have very good drawability. Their combination of low yield strength and high elongation permits successful forming of complex shapes. However, these grades work harden rapidly. To relieve stresses produced in severe forming or spinning, parts should be full annealed or stress-relief annealed as soon as possible after forming.

**WELDABILITY**

The austenitic class of stainless steels is generally considered to be weldable by the common fusion and resistance

techniques. Special consideration is required to avoid weld "hot cracking" by assuring formation of ferrite in the weld deposit. Types 304 and 304L are generally considered to be the most common alloys of this stainless class. When a weld filler is needed, AWS E/ER 308, 308L or 347 are most often specified. Types 304 and 304L Stainless Steels are well known in reference literature and more information can be obtained in this way.

**METRIC CONVERSION**

Data in this publication are presented in U.S. customary units. Approximate metric equivalents may be obtained by performing the following calculations:

Length (inches to millimeters) –  
Multiply by 25.4

Strength (ksi to megapascals or  
meganewtons per square meter) –  
Multiply by 6.8948

Temperature (Fahrenheit to Celsius) –  
(°Fahrenheit - 32) Multiply by 0.5556

Density (pounds per cubic inch to  
kilograms per cubic meter) –  
Multiply by 27,670

The information and data in this product data sheet are accurate to the best of our knowledge and belief, but are intended for general information only. Applications suggested for the materials are described only to help readers make their own evaluations and decisions, and are neither guarantees nor to be construed as express or implied warranties of suitability for these or other applications.

Data referring to mechanical properties and chemical analyses are the result of tests performed on specimens obtained from specific locations with prescribed sampling procedures; any warranty thereof is limited to the values obtained at such locations and by such procedures. There is no warranty with respect to values of the materials at other locations.

AK Steel and the AK Steel logo are registered trademarks of AK Steel Corporation.



Customer Service 800-331-5050

AK Steel Corporation  
9227 Centre Pointe Drive  
West Chester, OH 45069

www.aksteel.com

© 2007 AK Steel Corporation

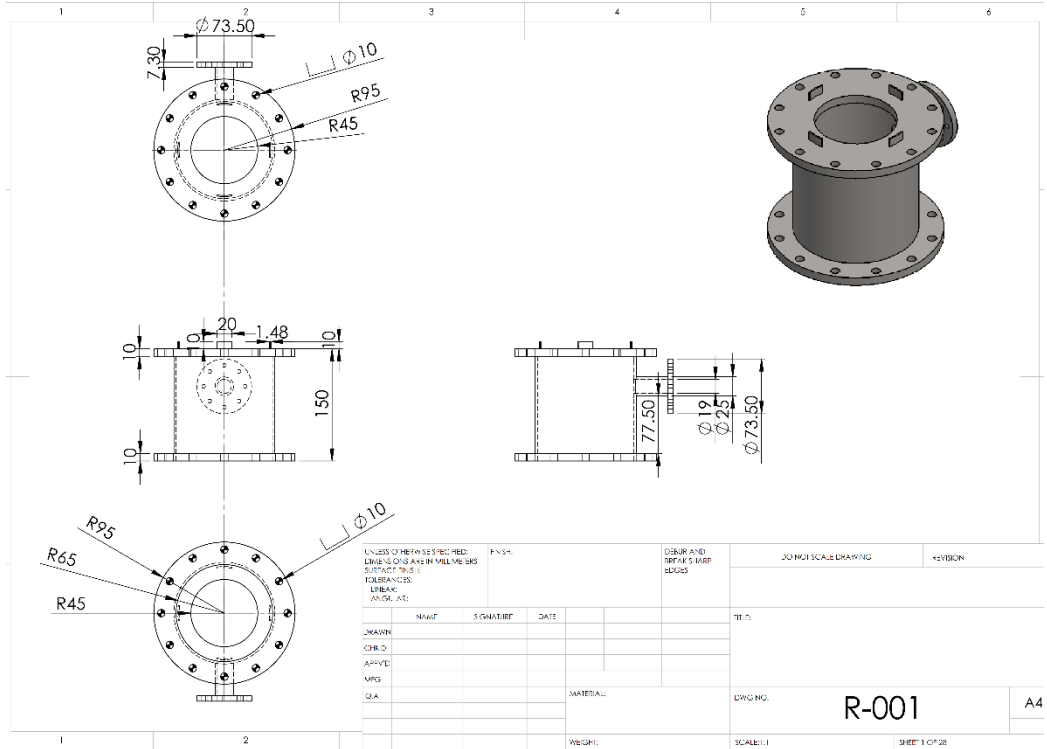


7100-0096 7/07

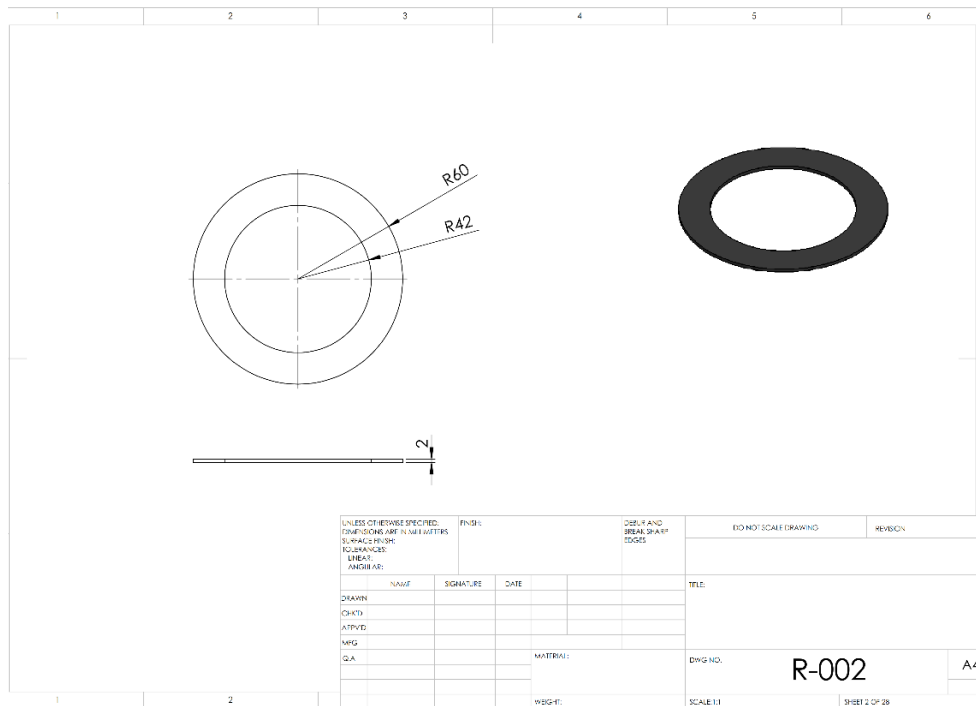
(ข). คุณสมบัติของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304  
รูปที่ ก. 7 องค์ประกอบและคุณสมบัติของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 304

ภาคผนวก ข

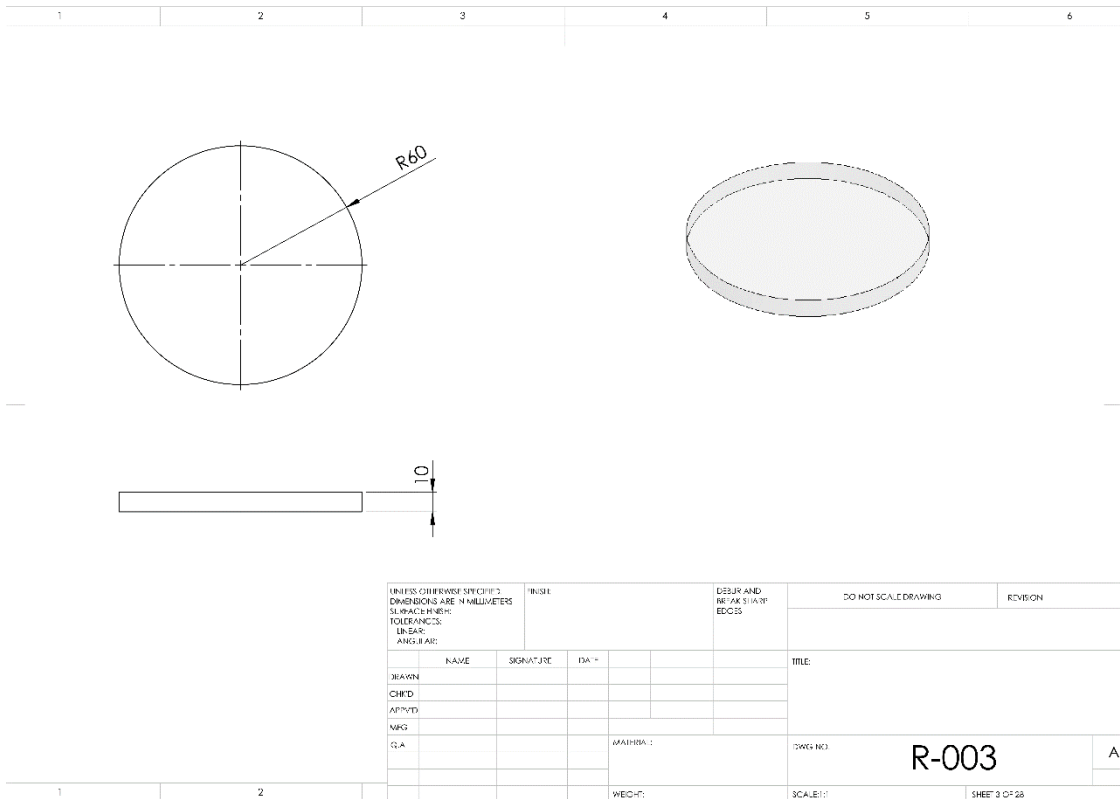
1. แบบเครื่องกำเนิดพลาสมา ไมโครเวฟ ดีซีสปัตเตอร์ริง



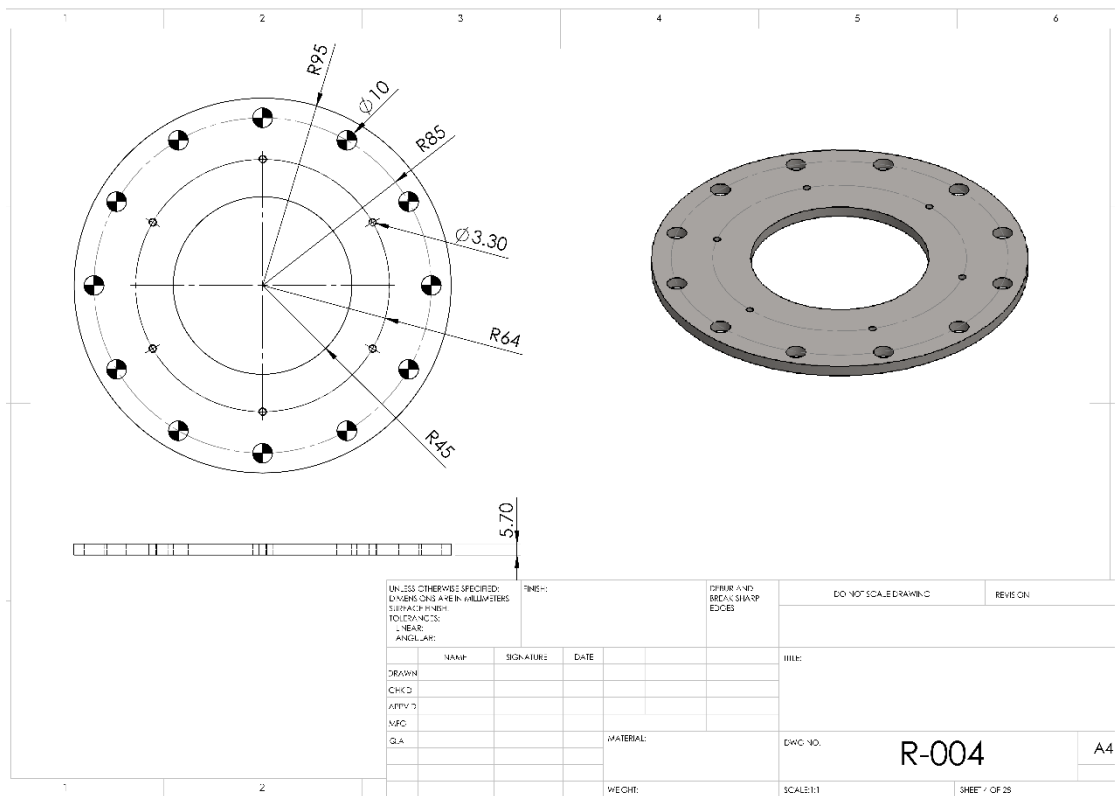
รูปที่ ข. 1 แบบแปลน R-001



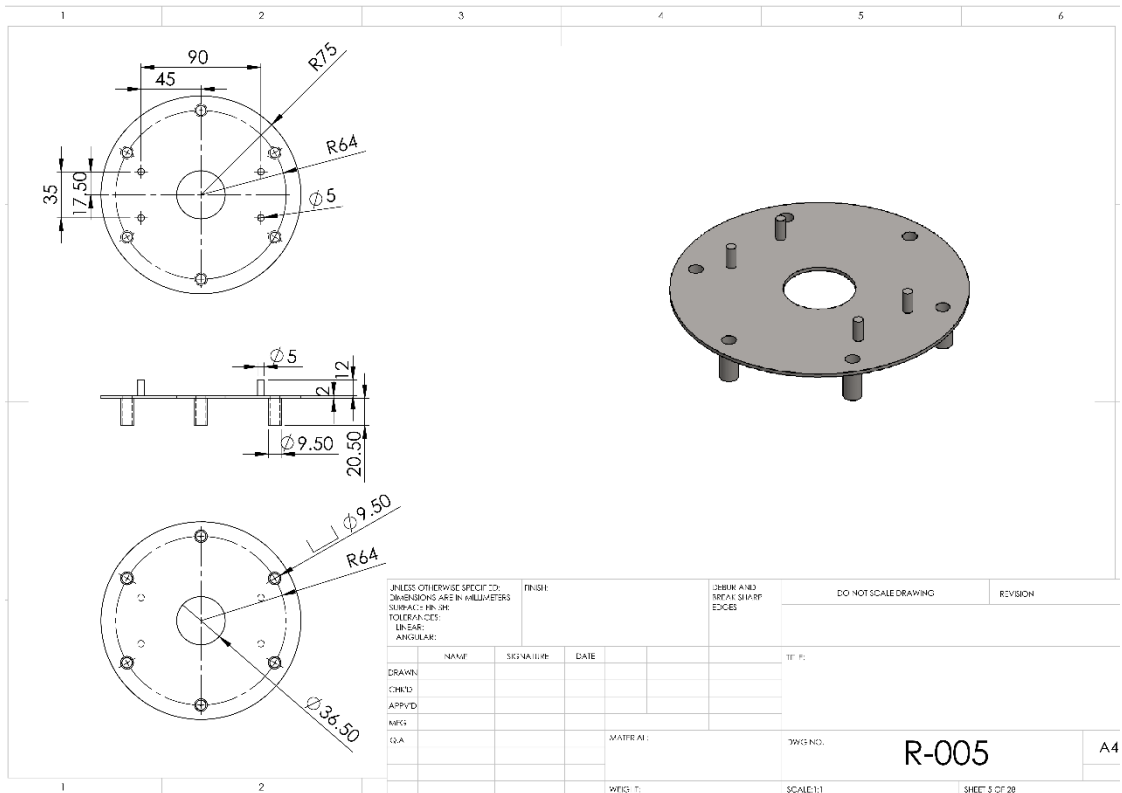
รูปที่ ข. 2 แบบแปลน R-002



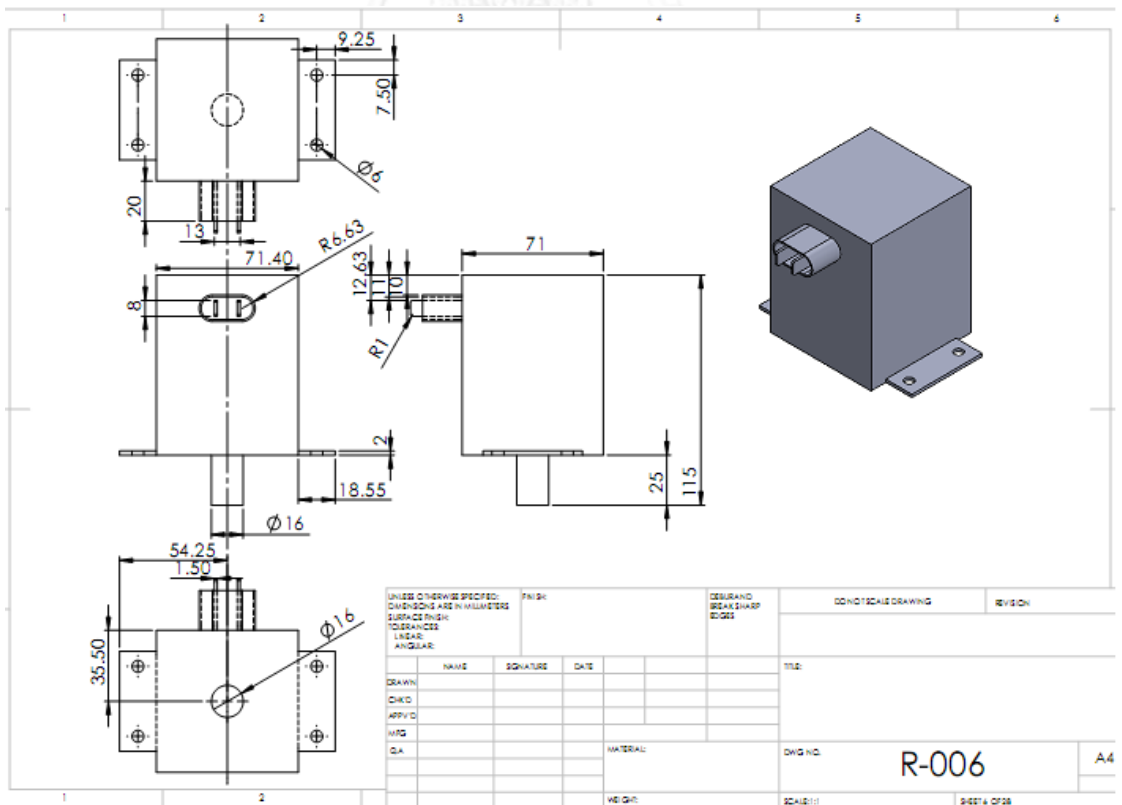
รูปที่ ข. 3 แบบแปลน R-003



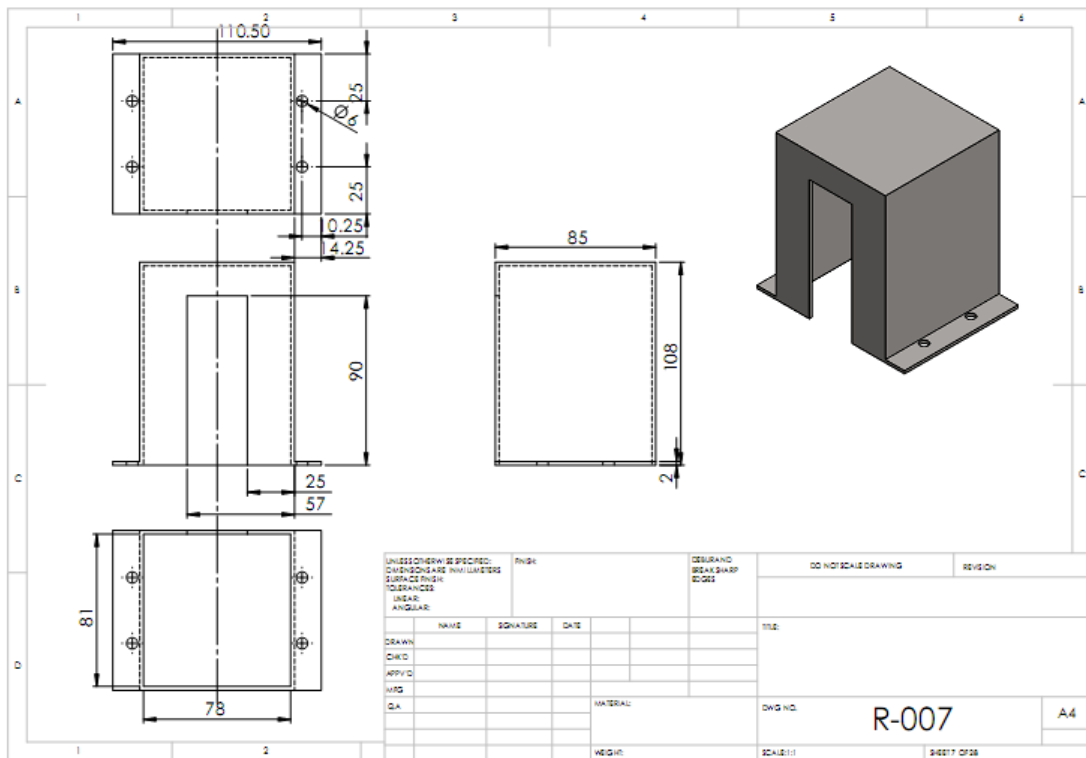
รูปที่ ข. 4 แบบแปลน R-004



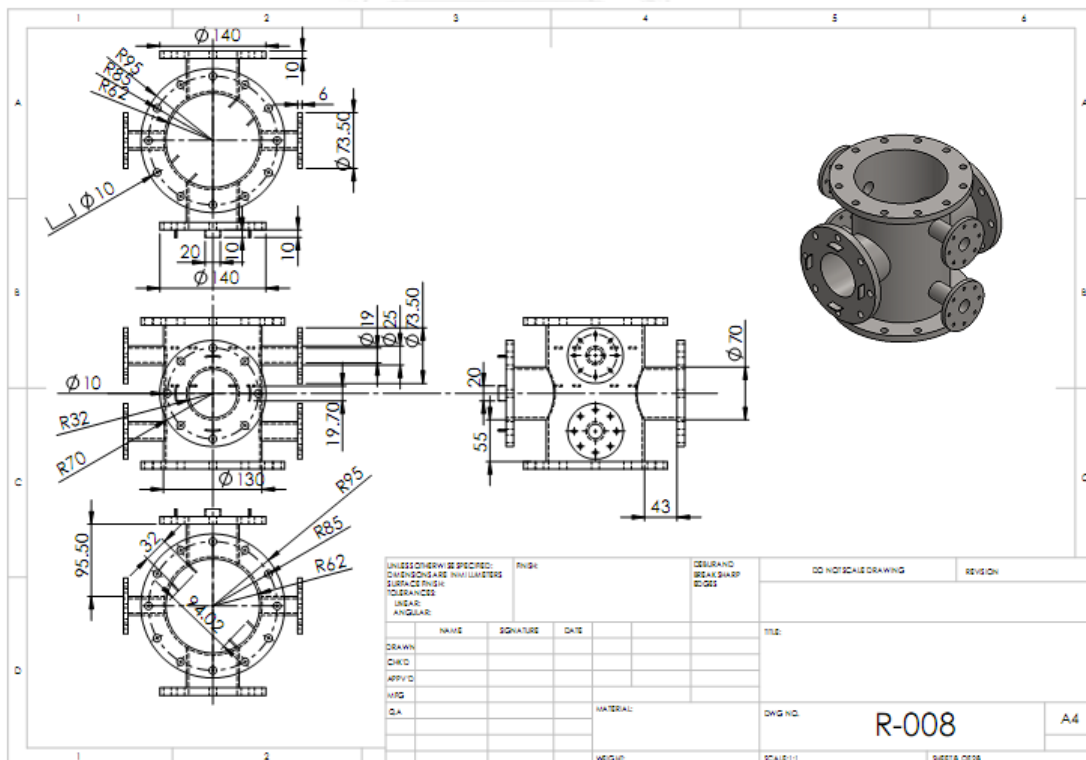
รูปที่ ข. 5 แบบแปลน R-005



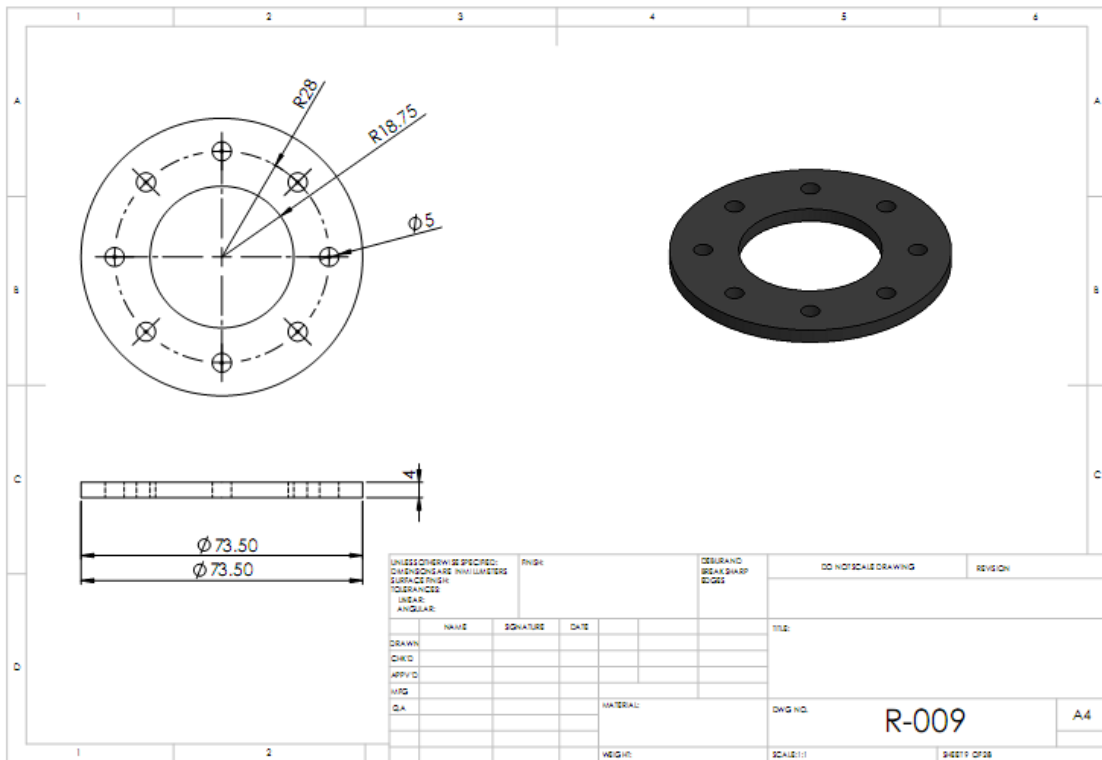
รูปที่ ข. 6 แบบแปลน R-006



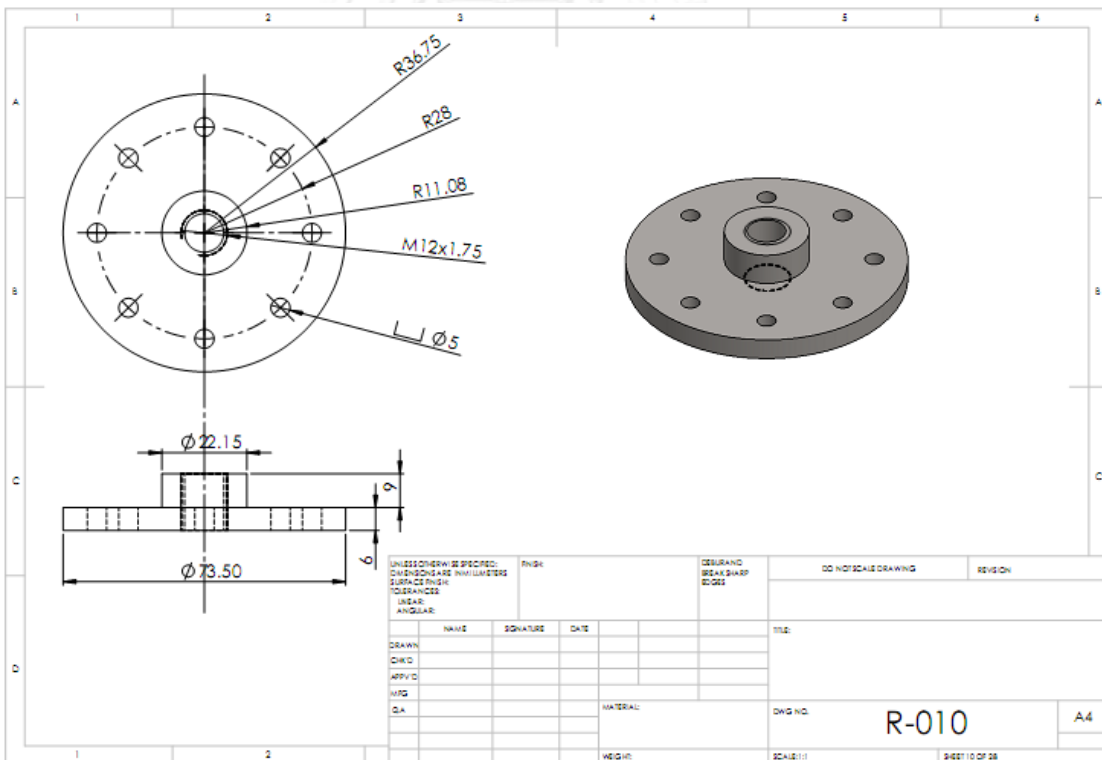
รูปที่ ข. 7 แบบแปลน R-007



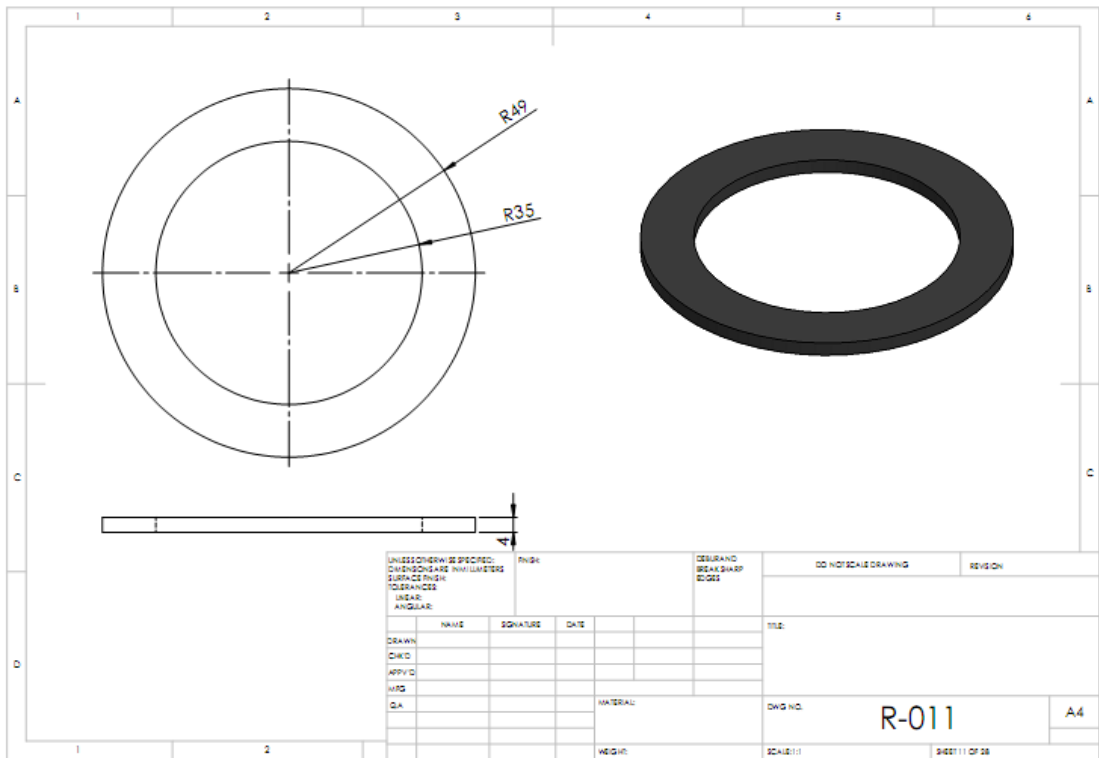
รูปที่ ข. 8 แบบแปลน R-008



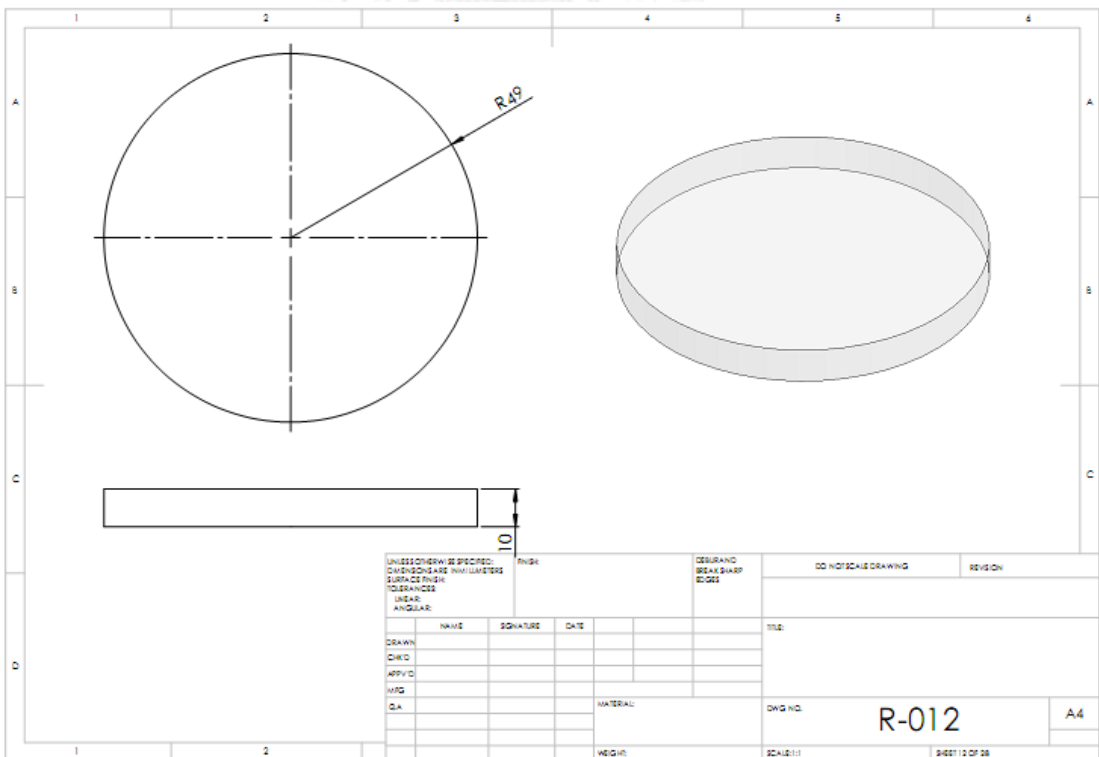
รูปที่ ข. 9 แบบแปลน R-009



รูปที่ ข. 10 แบบแปลน R-010

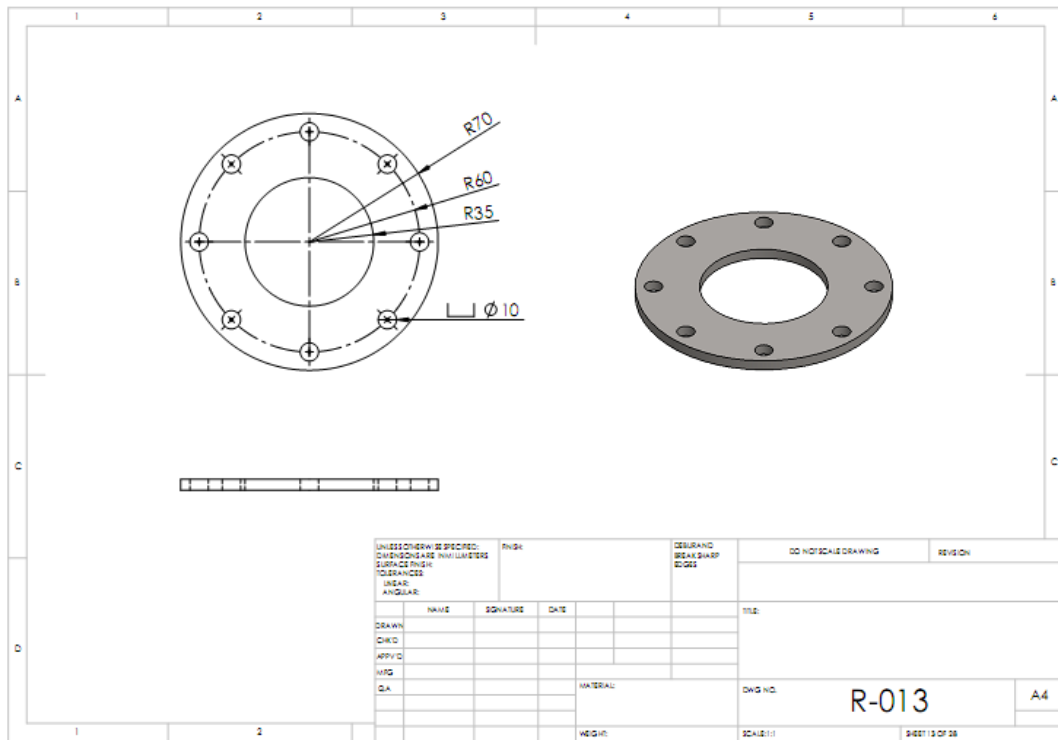


รูปที่ ข. 11 แบบแปลน R-011

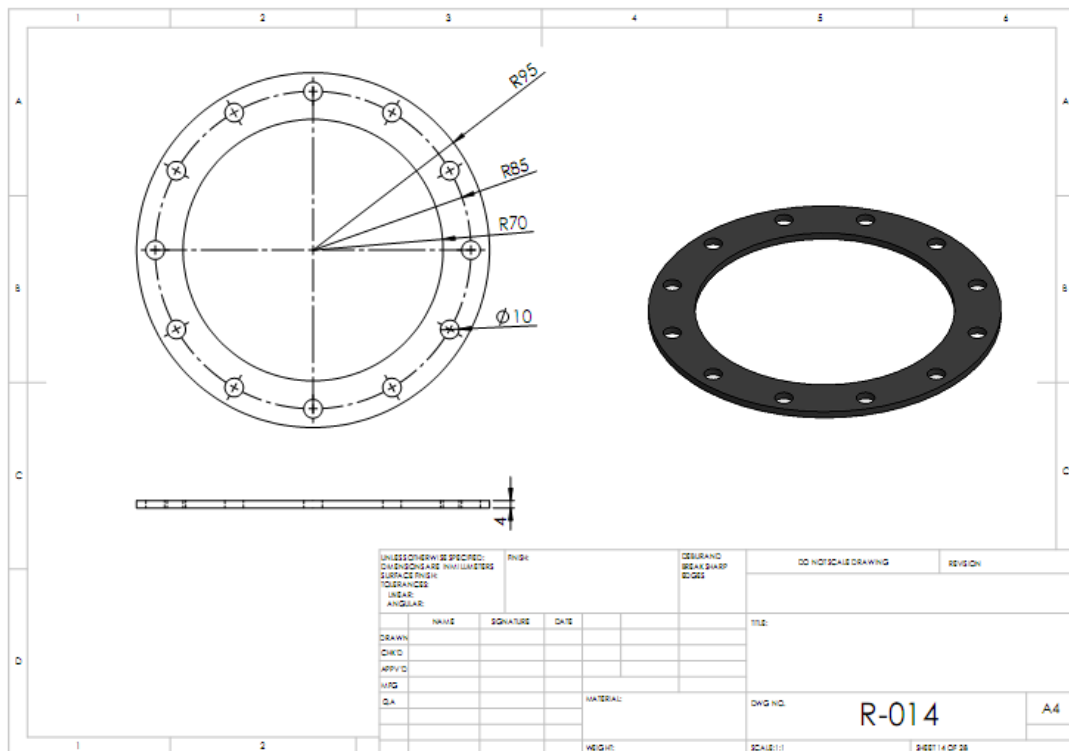


รูปที่ ข. 12 แบบแปลน R-012

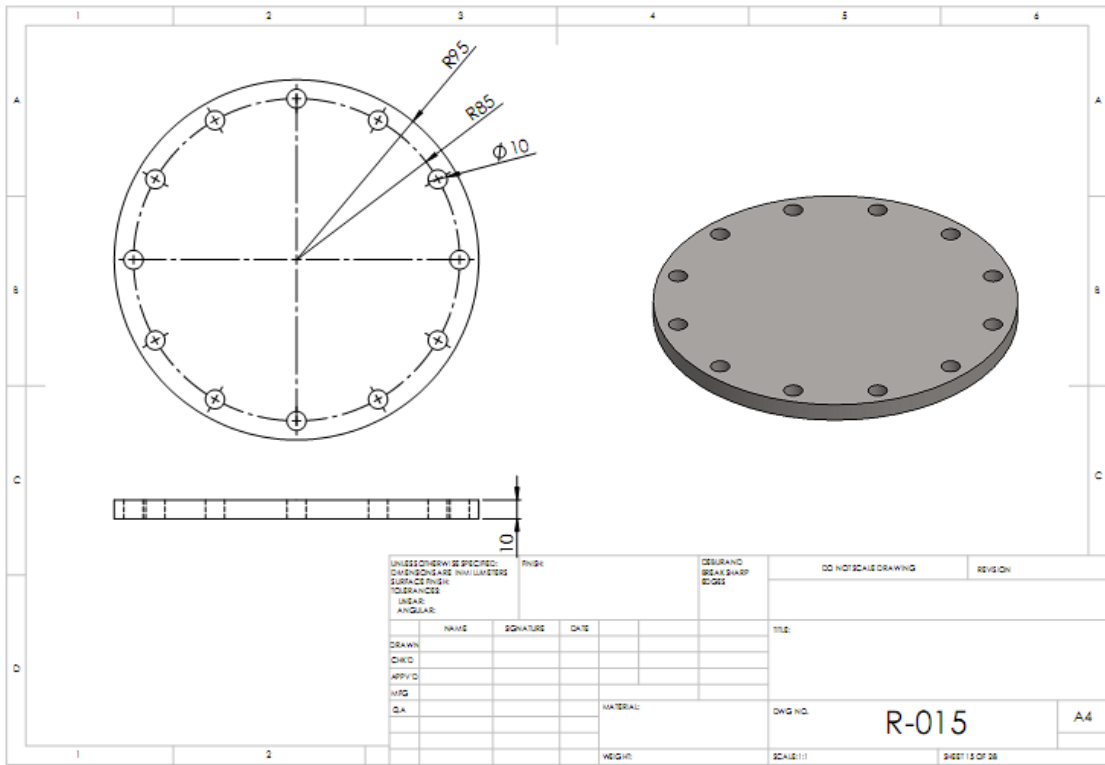




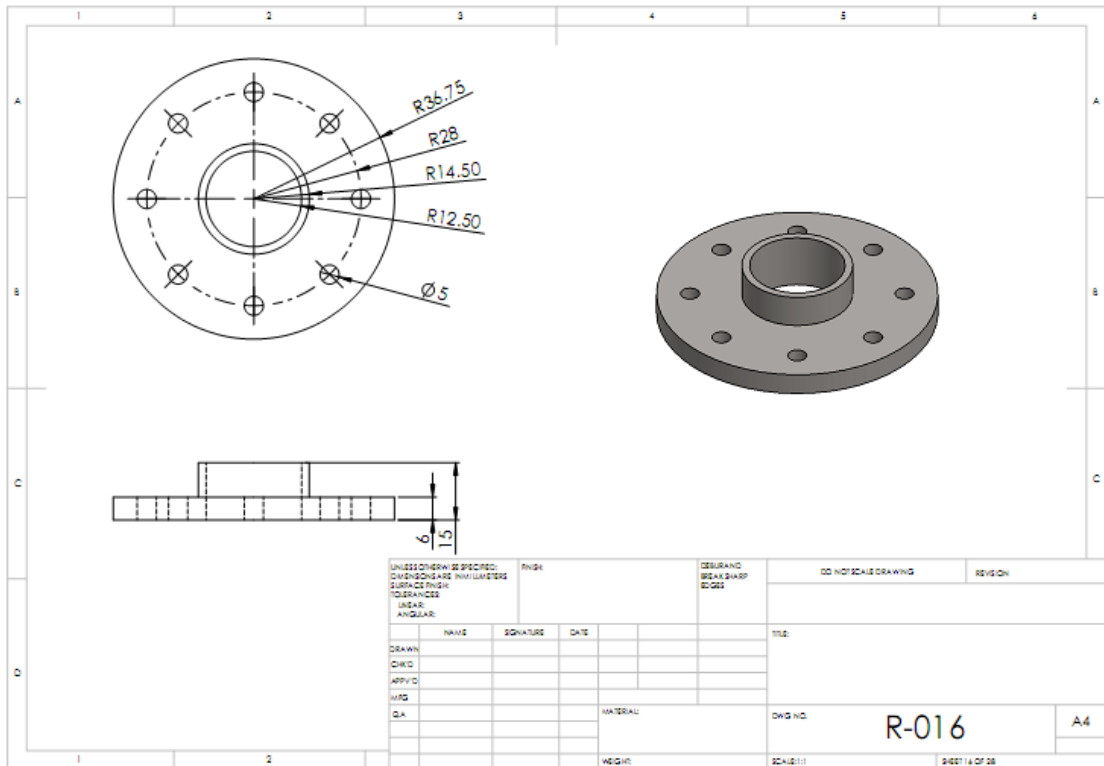
รูปที่ ข. 13 แบบแปลน R-013



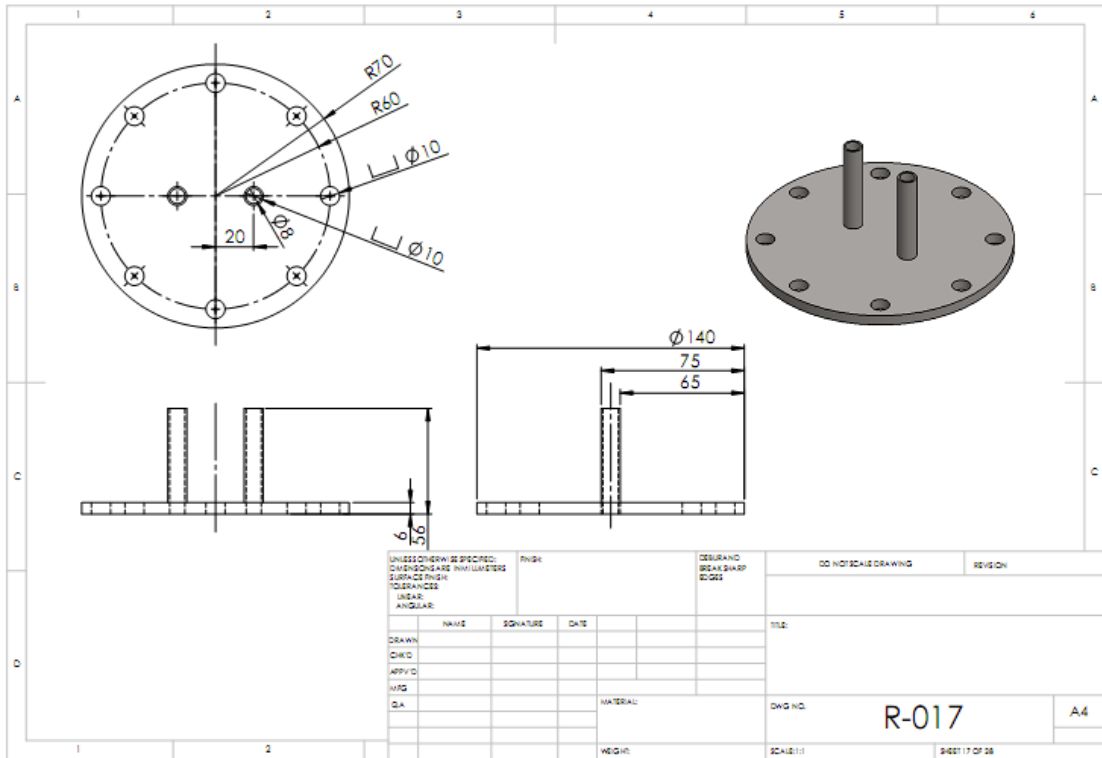
รูปที่ ข. 14 แบบแปลน R-014



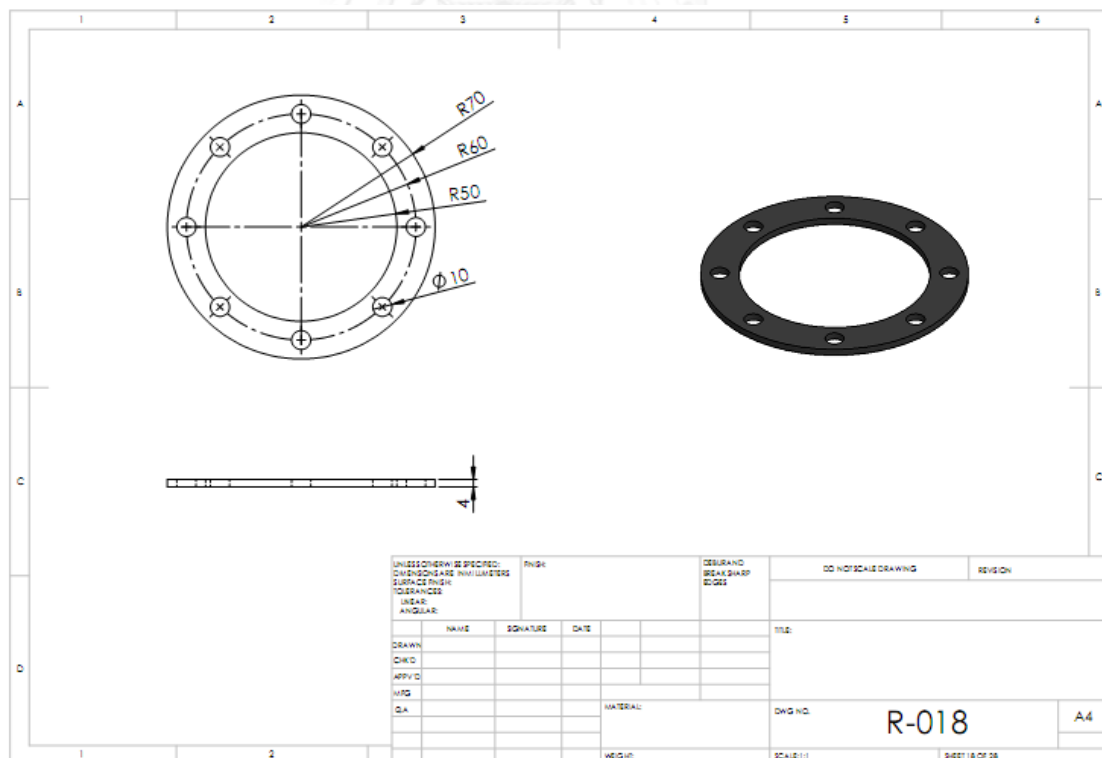
รูปที่ ข. 15 แบบแปลน R-015



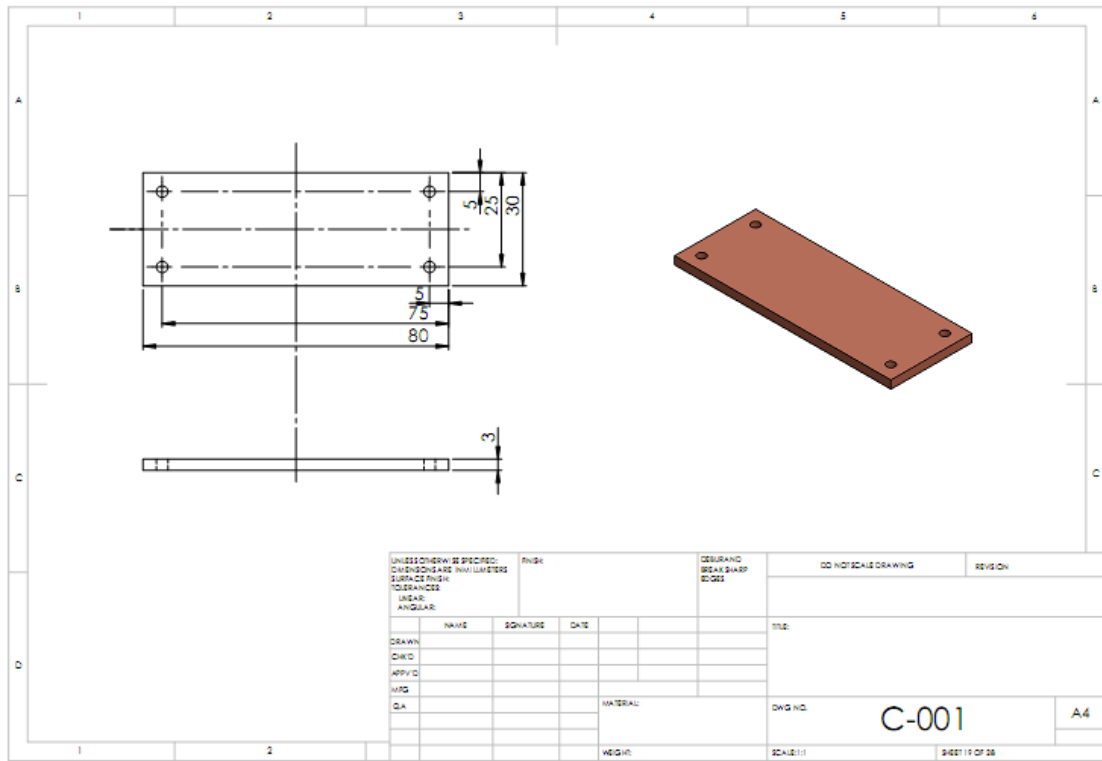
รูปที่ ข. 16 แบบแปลน R-016



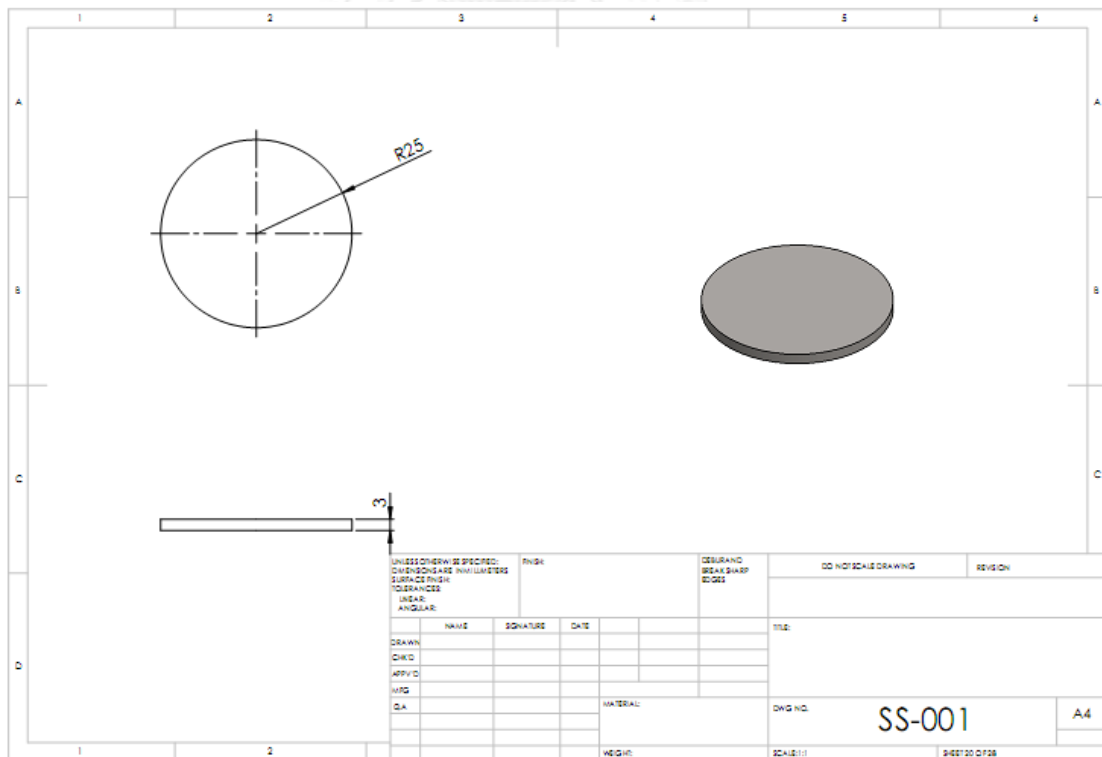
รูปที่ ข. 17 แบบแปลน R-017



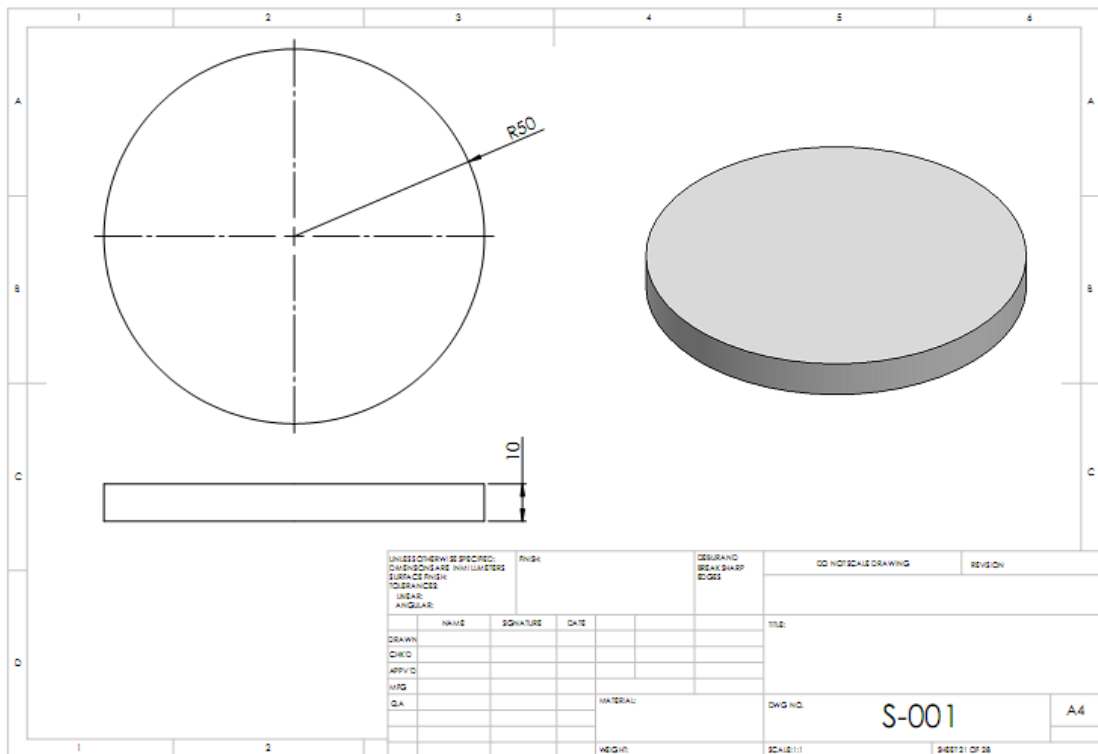
รูปที่ ข. 18 แบบแปลน R-018



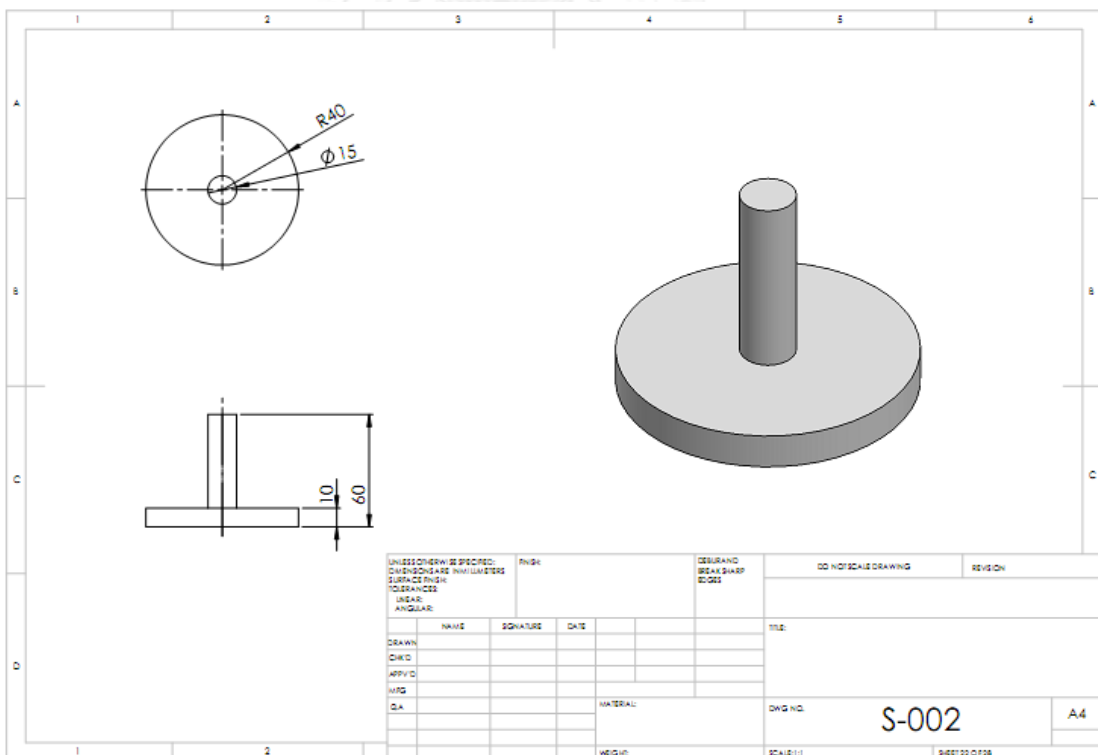
รูปที่ ข. 19 แบบแปลน C-001



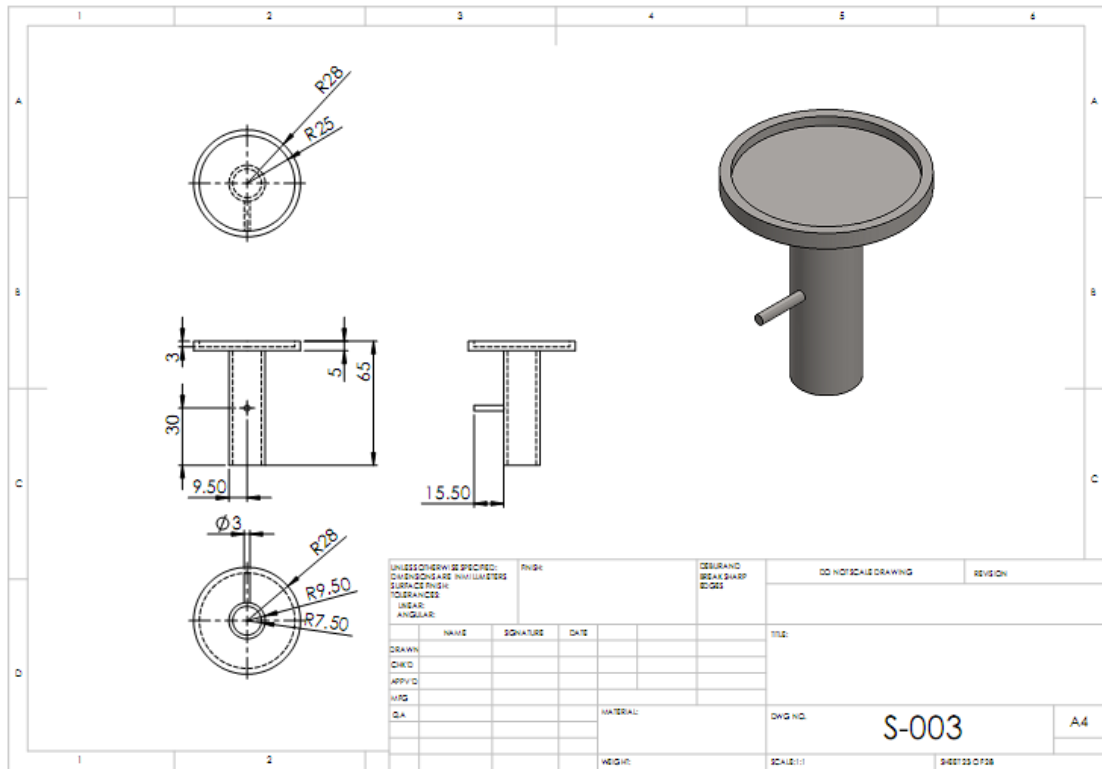
รูปที่ ข. 20 แบบแปลน SS-001



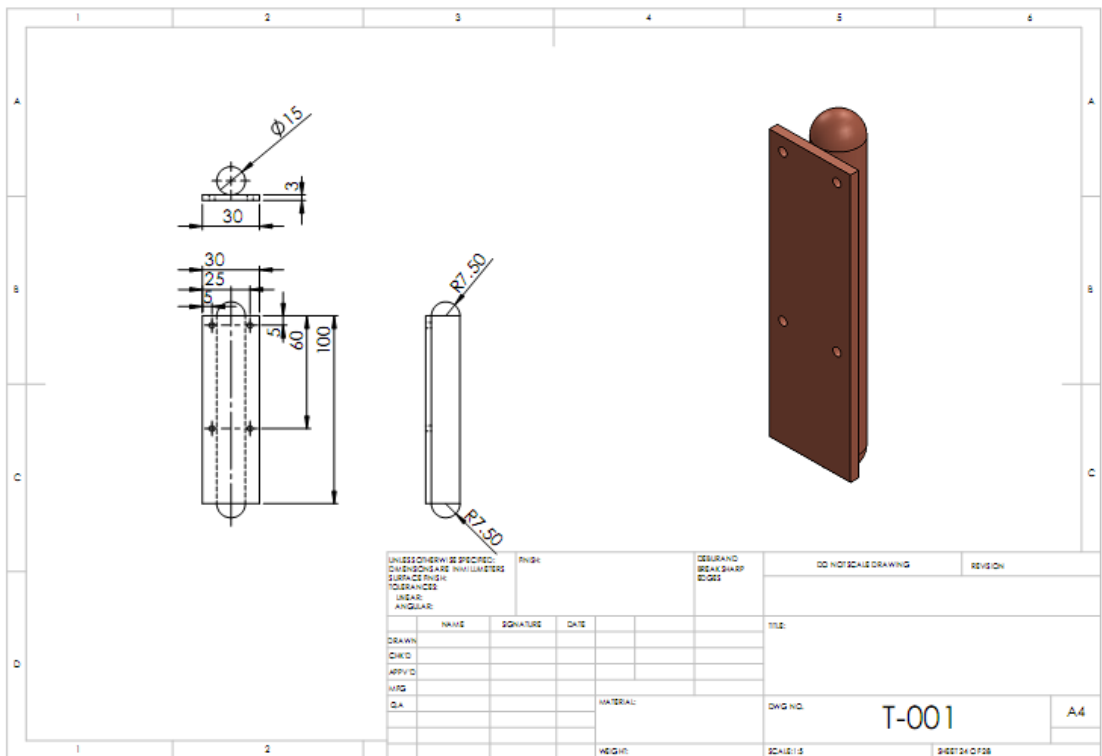
รูปที่ ข. 21 แบบแปลน S-001



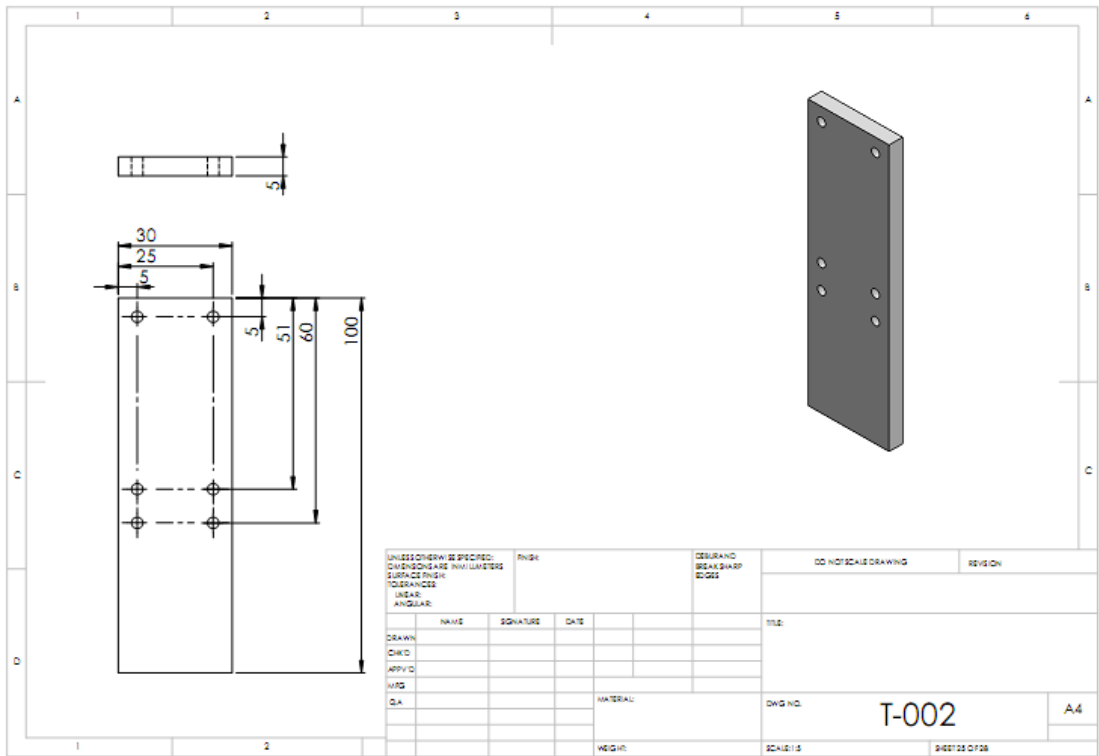
รูปที่ ข. 22 แบบแปลน S-002



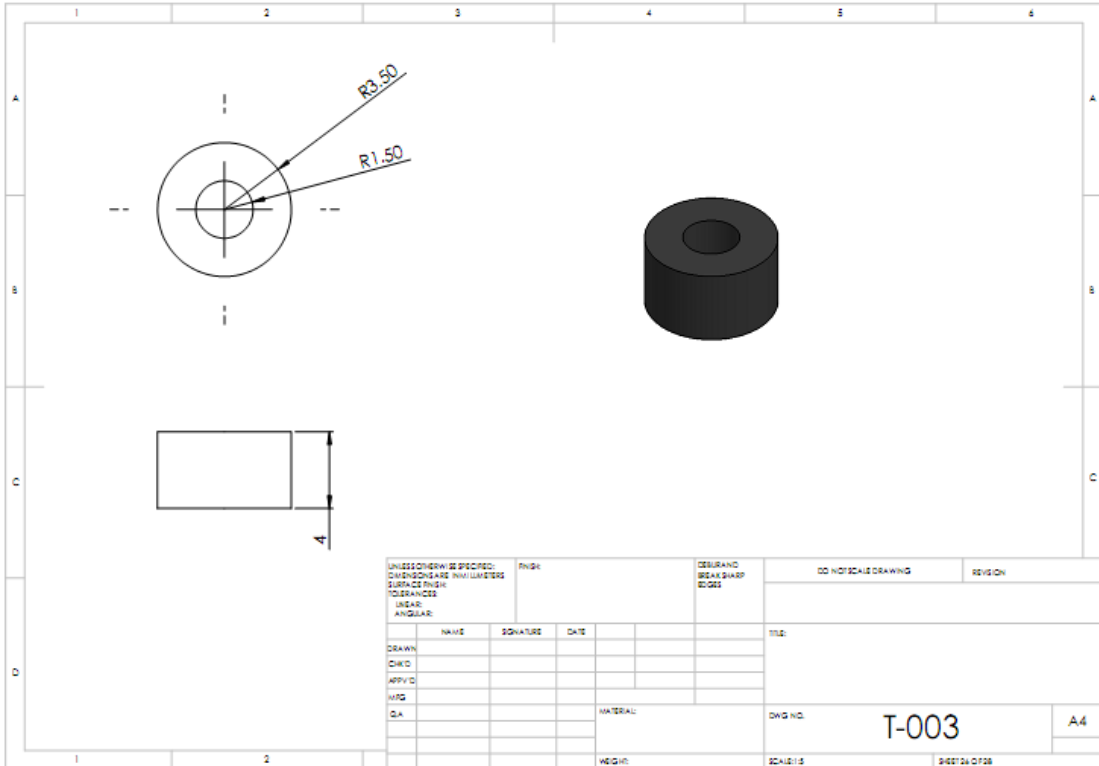
รูปที่ ข. 23 แบบแปลน S-003



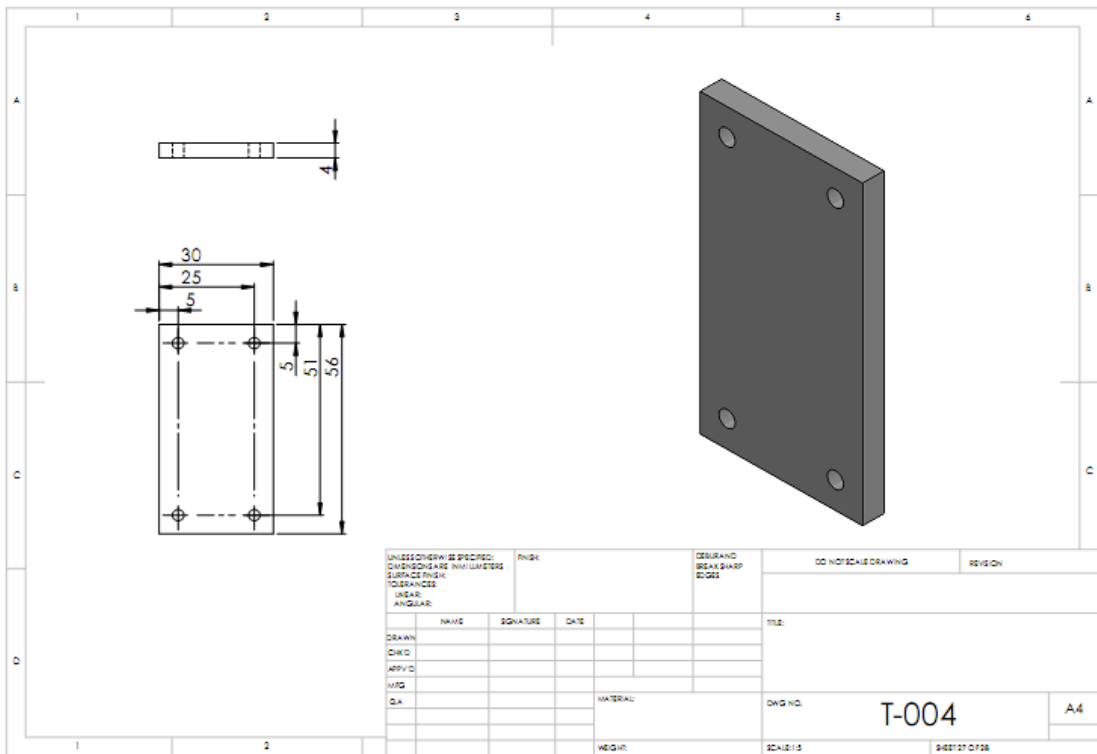
รูปที่ ข. 24 แบบแปลน T-001



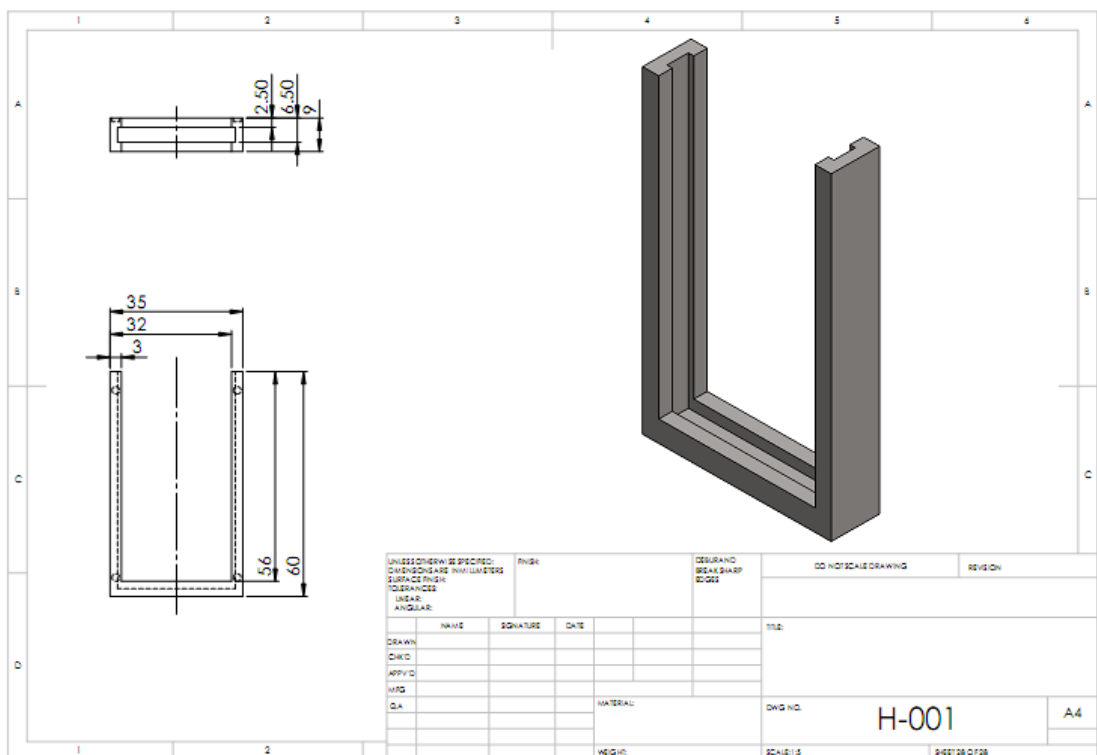
รูปที่ ข. 25 แบบแปลน T-002



รูปที่ ข. 26 แบบแปลน T-003



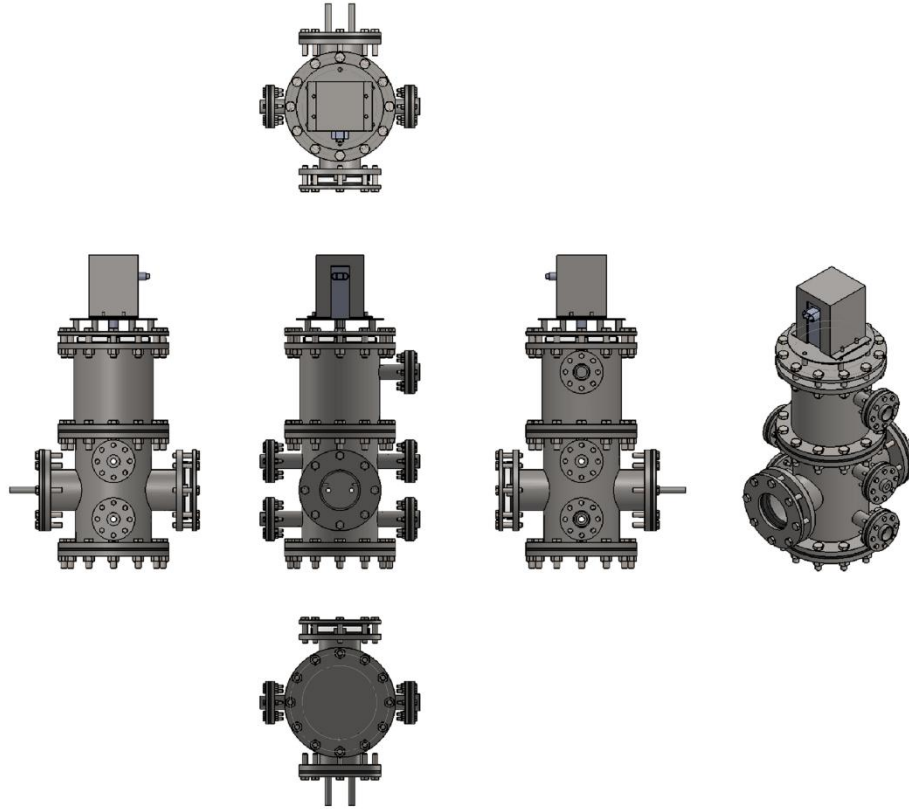
รูปที่ ข. 27 แบบแปลน T-004



รูปที่ ข. 28 แบบแปลน H-001

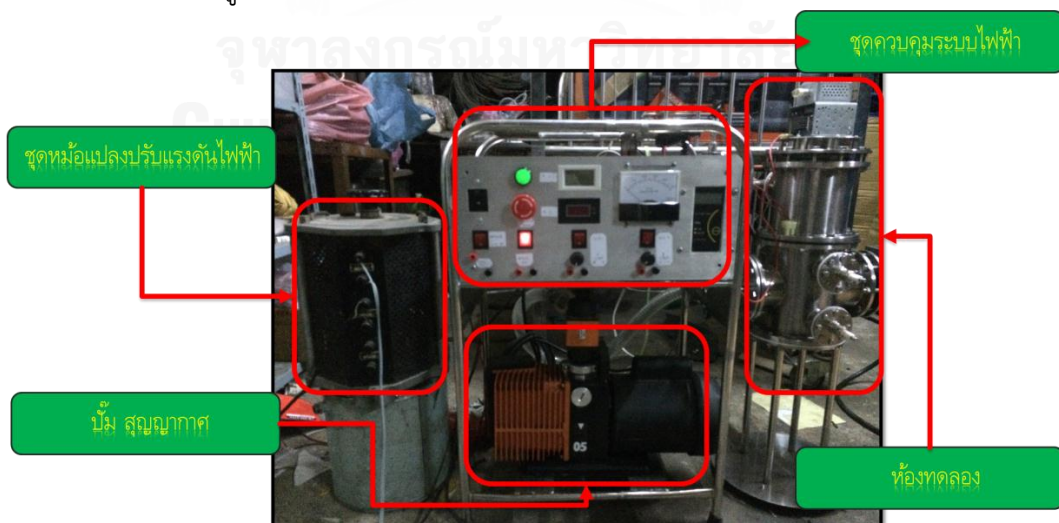


## 2. แบบแปลนประกอบของเครื่อง



รูปที่ ข. 29 แบบแปลนประกอบของเครื่อง

## 2. เครื่องที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ ข. 30 ส่วนประกอบเครื่องที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ ข. 31 ด้านหน้าเครื่อง

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายถิระยุ สันทนา เกิดวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ.2529 ที่จังหวัดปทุมธานี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2550 และในปีการศึกษา 2553 ได้เข้าศึกษาระดับปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY