

การพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ

นางสาวภัทรา ศรีสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

DEVELOPMENT OF A LOW ENERGY ELECTRON BEAM GENERATOR

Miss Patthra Srisawat

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ
โดย	นางสาวภัทรา ศรีสวัสดิ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา นิลสุวรรณโฆสิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี)

ภัทรา ศรีสวัสดิ์ : การพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (DEVELOPMENT OF A LOW ENERGY ELECTRON BEAM GENERATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก : ผศ.สุวิทย์ บุญณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.เดโช ทองอร่าม ; 89  
หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำแบบ  
ประหยัดขนาดพลังงานสูงสุด 100 keV ที่กระแสไฟฟ้า 2 mA สำหรับใช้ศึกษาวิจัยด้าน  
กระบวนการรังสีในพอลิเมอร์และการบำบัดก๊าซเสียจากการเผาไหม้ โดยโครงสร้างของระบบ  
เป็นแบบเร่งด้วยไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ห้องสุญญากาศ  
หน้าต่างสำหรับทางออกลำอิเล็กตรอน ระบบสูบสุญญากาศ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและ  
แหล่งจ่ายให้หลอด เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นออกแบบและสร้างจากวัสดุรวมทั้ง  
อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศ เช่น ประยุกต์ใช้ไส้ทั้งสแตนของหลอดฮาโลเจน เป็นต้น  
กำเนิดอิเล็กตรอนและใช้แผ่นฟอสฟอโรลูมิเนสเซนต์รองรับด้วยตะแกรงเป็นหน้าต่างทางออกลำ  
อิเล็กตรอน ในส่วนของคอลัมน์สุญญากาศทรงกระบอกกึ่งขึ้นรูปด้วยเหล็กสแตนเลสยึดติด  
กับโครงห้องใส่ตัวอย่างขนาด 22 cm x 26.5 cm x 22 cm ที่บุด้วยตะกั่วกำบังรังสีสำหรับ  
ป้องกันรังสีเอกซ์จากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอน

ผลทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นพบว่าที่แรงดันไฟฟ้า  
เร่ง 50 keV กระแสไฟฟ้า 0.3 mA และระดับสุญญากาศ  $10^{-6}$  Torr ระบบสามารถกำเนิดลำ  
อิเล็กตรอนส่งผ่านหน้าต่างที่ความเข้มของกระแสได้ต่ำมากส่วนใหญ่เป็นรังสีเอกซ์จากผล  
ของเบรมสตราห์ลุง มีระดับรังสีรั่วไหลที่ผนังภาชนะห้องทดลองน้อยกว่า 20  $\mu\text{Sv/h}$  และระบบ  
สามารถแปรเปลี่ยนพลังงานได้ระหว่าง 40-100 keV

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

การศึกษา 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5170419321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : LOW ENERGY ELECTRON BEAM / ELECTRON BEAM MACHINE /  
MINI E-BEAM / ELECTRON FLOOD GUN / LOW COST ELECTRON BEAM MACHINE

PATTHRA SRISAWAT : DEVELOPMENT OF A LOW ENERGY ELECTRON BEAM  
GENERATOR. ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, CO-ADVISER :  
DECHO TONG-ARAM, 89 pp.

This thesis aimed to develop an economical low energy electron beam generator with a maximum energy of 100 keV at 2 mA current, for supporting the research work on radiation polymerization and flue gas treatment. The system structure was DC type consists of: the simple electron source, vacuum chamber, electron beam window, vacuum system, high voltage power supply, and filament power supply. The local devices and parts were employed in the designation and construction of the developed electron beam generator, such as the halogen lamp filament was applied for electron source and aluminum foil with supporting grill was also used as electron beam window. The stainless steel was machining and forming a cylindrical vacuum column fixed with the lead lined sample chamber, for preventing x-ray leakage from electron beam interaction, at a size of 22 cm x 26.5 cm x 22 cm.

The test results of the developed electron beam generator operating at an accelerating voltage of 100 keV, 2 mA current and  $10^{-6}$  Torr vacuum level found that the system could generated the transmitted electron beam of 3 cm diameter at distance 2 cm away from window with beam intensity of  $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  and the radiation leakage at the experimental chamber surface less than  $20 \mu\text{Sv}/\text{h}$ . The generated beam energy between 40-100 keV could be varied.

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

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

Academic Year : ... 2011 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ บุญณชัยยะ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์เดโช ทองอร่าม ผู้คอยให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และการสนับสนุนในทุกๆ เรื่องในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และสาขาวิชาวิศวกรรมชีวเวช คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ในการอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการ ดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ Mr.Kazuaki Shimizu ผู้ให้การสนับสนุนและจัดหาวัสดุสำหรับใช้เป็น Electron beam window ของงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด นพเทค ที่ให้การ สนับสนุนและคำปรึกษาในการขึ้นรูปชิ้นงานบางส่วนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน และ ช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้การสนับสนุนทางการเงิน ผู้ คอยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ให้ความเชื่อมั่นในตัวผู้วิจัย และให้กำลังใจเสมอมา รวมถึงไป น้องชาย น้องสาว และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจตลอดมา

# 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.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2 เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	4
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	4
2.1.1 กระบวนการเร่งอนุภาค.....	4
2.1.2 พลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกเร่ง.....	6
2.2 อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร.....	7
2.2.1 การแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้น.....	8
2.2.2 การเกิดเบรมส์ชตราลุง.....	9
2.2.3 การกระเจิงกลับ.....	9
2.2.4 การดูดกลืนอิเล็กตรอน.....	10
2.2.5 พิสัยของอิเล็กตรอน.....	12
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	13
2.3.1 ส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน.....	15

บทที่	หน้า
2.3.2 ระบบสุญญากาศ.....	21
2.3.3 หน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน.....	23
2.3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage power supply).....	24
2.4 ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน.....	28
2.4.1 การประเมินปริมาณรังสี.....	28
2.4.2 การวัดปริมาณรังสี.....	29
3 การพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ.....	30
3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบ.....	30
3.2 การออกแบบและสร้างส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	32
3.2.1 ไส้หลอด (Filament).....	32
3.2.2 ฐานยึดไส้หลอด.....	34
3.2.3 ท่อโฟกัสลำอิเล็กตรอน (Beam focusing tube).....	36
3.3 การออกแบบและสร้างคอลัมน์สุญญากาศสำหรับเร่งลำอิเล็กตรอน.....	37
3.3.1 ชั้นฐานยึดส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน.....	39
3.3.2 ชั้นส่วนห้องสุญญากาศ.....	41
3.3.3 ชั้นส่วนแป้นช่องหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน.....	43
3.4 การออกแบบและเลือกใช้หน้าต่างลำอิเล็กตรอน.....	48
3.5 การออกแบบระบบสุญญากาศ.....	50
3.6 การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	51
3.6.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าไส้หลอด.....	51
3.6.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง.....	55
3.7 การออกแบบและสร้างห้องใส่ตัวอย่าง.....	59
4 การทดลองและผลการทดลอง.....	62
4.1 การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	62
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ.....	62
4.1.2 การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าไส้หลอด.....	63
4.1.3 การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง.....	65
4.2 การทดสอบระบบสุบสุญญากาศ.....	66



บทที่	หน้า
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	66
4.2.2 ทดสอบระบบสุบสัญญาณภาค.....	66
4.3 การทดสอบการทำงานเต็มระบบของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	68
4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	68
4.3.2 ทดสอบความเสถียรของระบบ.....	68
4.3.3 ทดลองแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าแรงและกระแสลำอิเล็กตรอน.....	68
4.3.4 ทดสอบปริมาณรังสีรั่วไหล.....	70
4.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	70
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	70
4.4.2 การประเมินพลังงานของลำอิเล็กตรอน.....	70
4.4.3 ทดสอบพื้นที่ครอบคลุมการกระจายลำอิเล็กตรอน.....	71
4.4.4 ทดสอบความเข้มของลำอิเล็กตรอน.....	72
4.4.5 ทดสอบความสม่ำเสมอของความเข้มลำอิเล็กตรอน.....	72
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	74
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก. ....	79
ภาคผนวก ข. ....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าแวลร์คฟังก์ชันของโลหะต่างๆ.....	18
2.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำหน้าตาทางออกลำอิล็กตรอน.....	24
4.1	เปรียบเทียบผลการจ่ายไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าล้ลลลล.....	64
4.2	ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกับแรงดันไฟฟ้าสูง ขณะมีและไม่มีโหลด.....	65
4.3	ผลการทดสอบการทำงานระบบสูบลูญญากาศ.....	67
4.4	ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าแรงกับกระแสลำอิล็กตรอน.....	68
4.5	ปริมาณรังสีร่วไหลของห้องใส่ตัวอย่าง.....	70
ก.1	ประสิทธิภาพของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำสำหรับส่วนกำเนิด ลำอิล็กตรอนที่ค่าความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ค่าต่างๆ.....	80
ก.2	ค่าประสิทธิภาพของวงจร กำลังอินพุตและเอาต์พุต กระแสโพงมารี กระแสเซคันดารี ศักดาไฟฟ้าเซคันดารี เมื่อเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าโพงมารี ไปที่ค่าต่างๆ และใช้ความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เท่ากับ 20 kHz.....	81

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	แผนภาพการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน..... 4
2.2	โครงสร้างของหลอดภาพโทรทัศน์..... 4
2.3	แผนภาพการแปลงรูปพลังงานในระบบเร่งอนุภาค..... 5
2.4	แผนภาพแสดงอิเล็กตรอนความเข้ม $I_0$ กระทบสสารหนา $x$ และมีความเข้มหลังผ่านสสาร $I$ ..... 10
2.5	การเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร..... 11
2.6	เส้นกราฟการเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับไทเทเนียมฟลอยด์ ที่ใช้เป็นหน้าต่างเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน..... 11
2.7	พิสัยของอิเล็กตรอนในสสาร..... 13
2.8	แผนภาพโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน..... 14
2.9	แผนภาพหลอดกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็ก (Miniature EB)..... 14
2.10	รูปแบบการยึดเกาะของอะตอมธาตุประเภทโลหะ..... 16
2.11	แผนภาพของสนามพลังงานศักย์เมื่ออะตอมจับกันเป็นโครงสร้างรูปผลึก..... 17
2.12	ความสัมพันธ์ของระดับพลังงานเฟอร์มิและพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะ..... 17
2.13	แผนภาพวงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน..... 21
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นสุญญากาศและศักดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดค่าต่างๆ..... 22
2.15	แผนภาพของระบบสุญญากาศที่ระดับ $10^{-6}$ Torr..... 23
2.16	แผนภาพโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง..... 25
2.17	วงจรทวิศักดาไฟฟ้า..... 26
2.18	ขั้นตอนการทวิศักดาไฟฟ้าต่อเนื่องในวงจรทวิศักดาไฟฟ้า..... 26
2.19	วงจรควบคุมศักดาคงที่..... 27
2.20	กระบวนการวัดปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน..... 29
3.1	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่ออกแบบขึ้น..... 32
3.2	หลอดทังสเตนฮาโลเจนที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นไส้หลอด..... 33
3.3	หลอดทังสเตนฮาโลเจนที่ตัดส่วนหลอดแก้วออก..... 34
3.4	การยึดขั้วของหลอดซึ่งเป็นขั้วต่อไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ไส้หลอดและท่อโฟกัส..... 35
3.5	สลักเกลียวสำหรับยึดขั้วหลอดไฟฟ้ากับเสาขั้วไฟฟ้าของหลอดที่ต้องกลึงเฉพาะ..... 35

ภาพที่	หน้า
3.6 การจับยึดขั้วหลอดไฟฟ้ากับถ้วยเซรามิกและเชื่อมสายไฟฟ้ากับเสาขั้วไฟฟ้า.....	35
3.7 ท่อไฟกัสล่าอิเล็กตรอนและการยึดกับขั้วใต้หลอด.....	36
3.8 การปรับระดับของท่อไฟกัสล่าอิเล็กตรอน.....	37
3.9 ส่วนประกอบของคอลัมน์สุญญากาศสำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	38
3.10 แบบขนาดและสัดส่วนแป้นฝาส่วนบนที่ออกแบบ.....	39
3.11 แป้นฝาส่วนบนพร้อมฝาครอบที่สร้างขึ้น.....	40
3.12 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแหวนรองฝาบน.....	40
3.13 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแท่นยึดฐานเซรามิก.....	41
3.14 ชิ้นงานแท่นยึดฐานเซรามิกที่สร้างขึ้น.....	41
3.15 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของห้องสุญญากาศ.....	42
3.16 ท่อช่องสูบลสุญญากาศของห้องสุญญากาศขนาดเป็นมาตรฐาน DN KF25.....	43
3.17 ชิ้นส่วนห้องสุญญากาศที่สร้างขึ้น.....	43
3.18 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแป้นฝาล่าง.....	44
3.19 ชิ้นส่วนแป้นฝาล่างที่สร้างขึ้น.....	44
3.20 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของชุดฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างชุดบน.....	45
3.21 แผ่นฟอยล์ที่ถูกขึงตึง.....	46
3.22 วงแหวนฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างชุดบนที่สร้างขึ้น.....	46
3.23 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของฐานซึ่งแผ่นฟอยล์ชุดล่าง.....	47
3.24 ชิ้นส่วนฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างชุดล่างที่สร้างขึ้น.....	47
3.25 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อประเมินพิสัยในแผ่นฟอยล์ไทเทเนียมหนา 20 $\mu\text{m}$ และฟอยล์อะลูมิเนียม 25 $\mu\text{m}$ ที่อิเล็กตรอนพลังงาน 50, 60 และ 70 keV....	48
3.26 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อประเมินพิสัยในแผ่นฟอยล์ไทเทเนียมหนา 20 $\mu\text{m}$ และฟอยล์อะลูมิเนียม 25 $\mu\text{m}$ ที่อิเล็กตรอนพลังงาน 80, 90 และ 100 keV...	49
3.27 ฟอยล์อะลูมิเนียมซึ่งบนวงแหวนทองแดงและนำไปวางในชุดฐานยึดชิ้นล่าง.....	50
3.28 อะลูมิเนียมฟอยล์ประกบกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมและประกอบ ใส่ห้องสุญญากาศ.....	50
3.29 แผนภาพระบบสูบลสุญญากาศสำหรับส่วนเร่งลำอิเล็กตรอน.....	51
3.30 แผนภาพระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน.....	52

ภาพที่	หน้า
3.31	ถึงน้ำมันที่บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าของ เครื่องกำเนิดล้าอเล็กตรอน..... 52
3.32	วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าขับไล้หลอดสำหรับส่วนกำเนิดล้าอเล็กตรอน..... 53
3.33	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำสำหรับส่วนกำเนิดล้าอเล็กตรอน..... 55
3.34	หม้อแปลงไฟฟ้าศักดาต่ำสำหรับส่วนกำเนิดล้าอเล็กตรอน..... 55
3.35	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ..... 56
3.36	วงจรกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูง..... 57
3.37	ห้องใส่ตัวอย่างภายในตู้ด้วยตะกั่วที่สร้างขึ้น..... 60
3.38	เครื่องกำเนิดล้าอเล็กตรอนพลังงานต่ำที่พัฒนาขึ้น..... 61
4.1	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดล้าอเล็กตรอน..... 63
4.2	การจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดล้าอเล็กตรอน..... 63
4.3	เส้นกราฟความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของ แหล่งจ่ายไฟฟ้าไล้หลอด..... 64
4.4	เส้นกราฟความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าแหล่งจ่ายและไฟฟ้าศักดาสูง ขณะไม่มีโหลด..... 65
4.5	แผนภาพระบบสุบสุญญากาศ..... 66
4.6	การจัดอุปกรณ์ทดลองในห้องใส่ตัวอย่าง..... 69
4.7	ภาพถ่ายแสงเรืองที่เกิดขึ้นบนฉากเรืองแสง..... 69
4.8	เครื่องกำเนิดล้าอเล็กตรอนพลังงานต่ำขณะทดสอบ..... 71
4.9	การกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่ระดับศักดาไฟฟ้าสูงค่าต่างๆ..... 71
4.10	การวัดกระแสล้าอเล็กตรอนที่ผ่านหน้าต่างล้าอเล็กตรอน..... 72
4.11	การแบ่งระยะกริดบนแผ่นฟิล์มวัดปริมาณความเข้มล้าอเล็กตรอน..... 72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (Low energy electron beam machine) เป็นเครื่องมือที่มีบทบาทต่องานวิจัยพัฒนาด้านการฉายลำอิเล็กตรอน (Electron beam irradiation) ระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ในการปรับเปลี่ยนขนาดกำลังและโครงสร้างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนให้เหมาะสมกับการใช้งานหลากหลายรูปแบบ เช่น การฉายลำอิเล็กตรอนเพื่ออบ (Curing) สารผสมของหมึกพิมพ์และสีเคลือบผิววัสดุ การปรับปรุงคุณสมบัติของสารพอลิเมอร์ชนิดฟิล์มบาง การสร้างภาวะปลอดเชื้อบนผิววัสดุและการบำบัดก๊าซเสียจากการเผาไหม้ เป็นต้น ปัจจุบันมีการใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำกับวัสดุต่างๆ ในงานวิจัยเพื่อเป็นงานนำร่องแก่การประยุกต์ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากพบว่าลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำเหมาะกับการฉายลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุในระดับไมโครเมตร ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนและทำลายพื้นผิววัสดุ [1] อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ยังจำกัดอยู่ในสถาบันวิจัยในต่างประเทศเท่านั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดเรื่องราคาของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เป็นอุปสรรคต่องานวิจัยทางด้านนี้

ด้วยข้อจำกัดในการศึกษาวิจัยด้านการฉายลำอิเล็กตรอนดังได้กล่าวข้างต้นทำให้เกิดความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้ลำอิเล็กตรอนกับงานฉายลำอิเล็กตรอนใน ด้านต่างๆ งานวิจัยนี้จะออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำและกำลังต่ำด้วยเทคนิคการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนด้วยไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรง โดยโครงสร้างของระบบกำเนิดลำอิเล็กตรอนจะใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศเป็นหลัก เพื่อให้เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่พัฒนาขึ้นนี้มีราคาประหยัด บำรุงรักษาง่าย มีความยืดหยุ่นในการปรับระบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้การวิจัยพัฒนานี้ยังเป็นการสร้างประสบการณ์และแนวทางในการออกแบบพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนกำลังสูงต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ โดยใช้หลักการเร่งอิเล็กตรอนด้วยไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรง

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างแหล่งผลิต อิเล็กตรอนพร้อมอุปกรณ์ เร่งอนุภาคอิเล็กตรอนขนาด 100 kV กระแส 2 mA
2. ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการกำเนิดลำอิเล็กตรอนพร้อมส่วนกำลังรังสี
3. ทดสอบสมรรถนะของเครื่อง เช่น พลังงานของอิเล็กตรอน ความเข้มลำอิเล็กตรอน และความสม่ำเสมอของลำอิเล็กตรอนบริเวณพื้นที่ใช้งาน เป็นต้น

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน ได้แก่ แหล่งผลิตอิเล็กตรอน ระบบควบคุมการกำเนิดลำอิเล็กตรอน แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ระบบสุญญากาศ ระบบระบายความร้อนและกำลังรังสี
3. จัดหาส่วนประกอบต่างๆ เพื่อสร้างส่วนต่างๆ ของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน
4. ประกอบและทดสอบสมรรถนะเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้น
5. สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน ขนาดพลังงาน 100 kV กระแส 2 mA แบบประหยัดและบำรุงรักษาง่าย ที่สามารถใช้ในงานวิจัยด้านการใช้ประโยชน์จากลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำระดับห้องปฏิบัติการ

### 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี พ.ศ. 2546, กิตติพงศ์ เกษมสุข, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และเดโช ทองอร่าม [2] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัสสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาปืนอิเล็กตรอนเพื่อผลิตลำอิเล็กตรอนชนิดปลายลำขนาดเล็กสำหรับผลิตรังสีเอกซ์ระดับไมโครโฟกัส ระบบทำงานที่ความดันสุญญากาศ  $5 \times 10^{-5}$  Torr แปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าเร่งได้ระหว่าง 0-40 kV กระแส 1.2  $\mu$ A สามารถกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาดจุดโฟกัส 112.5  $\mu$ m ใช้ถ่ายภาพในระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์
2. ปี พ.ศ. 2547, P.B. Rios, M.T.F. da Cruz, M.N. Martins, J.C.O. Morel [3] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง Window transparency optimization of E-beam machines งานวิจัย

นี่เป็นการพัฒนาเกี่ยวกับ window สำหรับเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยผลที่ได้สามารถทำให้อิเล็กตรอนผ่านได้มากที่สุดประมาณ 78% จากที่ window โดยทั่วไปทำได้ประมาณ 25-35%

3. ปี พ.ศ. 2548, Adam Armitage, Alan D. Hart [4] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง Electron gun and an electron beam window งานวิจัยนี้กล่าวถึงการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ทำ window ของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน ซึ่งโดยส่วนมากใช้ aluminum beryllium alloy แต่ก็ได้กล่าวถึงวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติดีกว่า แต่มีราคาแพง คือ เพชร โดยเปรียบเทียบกันที่ window หนา 36  $\mu\text{m}$  พลังงานของอิเล็กตรอนที่ 125 keV โดยที่ aluminum beryllium alloy จะ absorb ไว้ 15% แต่เพชร absorb ไว้เพียง 2%
4. ปี พ.ศ. 2549, Albert Crewe, Igor Gorodezkey [5] ได้ทำงานวิจัยเรื่อง Flat Electron Beams งานวิจัยนี้เป็นการควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนที่ฉายออกมาจากเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นแนวบางๆ ซึ่งจากการคำนวณในทางด้านทฤษฎีแล้วสามารถทำได้ แต่ในทางปฏิบัติกลับมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องควบคุมปัจจัยบางอย่างให้มีความถูกต้องแม่นยำ เช่น วิธีทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและสนามแม่เหล็ก เป็นต้น



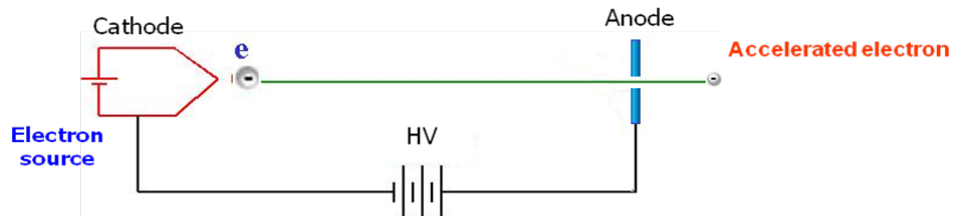
## บทที่ 2

### เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

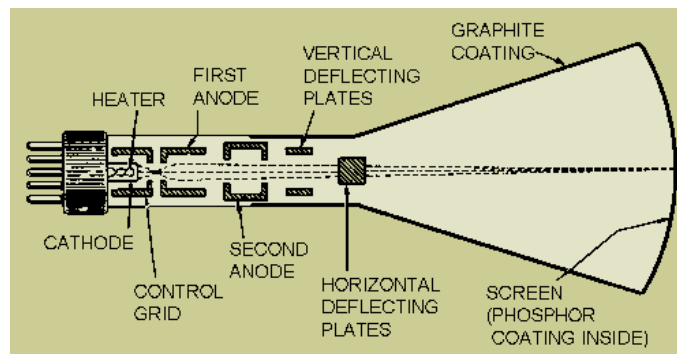
#### 2.1 หลักการของเครื่องเร่งอนุภาค

##### 2.1.1 กระบวนการเร่งอนุภาค

ฟิสิกส์ของการเร่งอนุภาคหมายถึงการเร่งอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าประจำตัวจากมวลนิ่งให้มีความเร็วสูงขึ้น มีผลให้อนุภาคมีพลังงานสูงขึ้น กลไกการเร่งอนุภาคสามารถออกแบบให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ทั้งวิถีตรง (Linear acceleration) และวิถีโค้ง (Circular acceleration) ด้วยแรงทางไฟฟ้าและบังคับทิศทางด้วยสนามแม่เหล็ก ขนาดมวลของอนุภาคที่ต้องการเร่ง มีตั้งแต่อิเล็กตรอนจนถึงไอออนของธาตุมวลหนัก เนื่องจากประจุอนุภาคมีทั้งที่เป็นประจุบวกและลบ (ประจุ 1 ประจุมีค่า  $q = \pm e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) ดังนั้นการจัดขั้วไฟฟ้าให้สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าเร่งจะต้องสอดคล้องกับแรงดึงดูดหรือแรงผลักของชนิดขั้วประจุด้วย เช่น การเร่งอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะเริ่มที่ขั้วไฟฟ้าลบไปยังขั้วไฟฟ้าบวก ดังภาพที่ 2.1 และหลักการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานต่ำถูกนำไปใช้ผลิตหลอดภาพโทรทัศน์แบบแคโทดเรย์ที่ใช้งานกันมานาน ดังโครงสร้างในภาพที่ 2.2

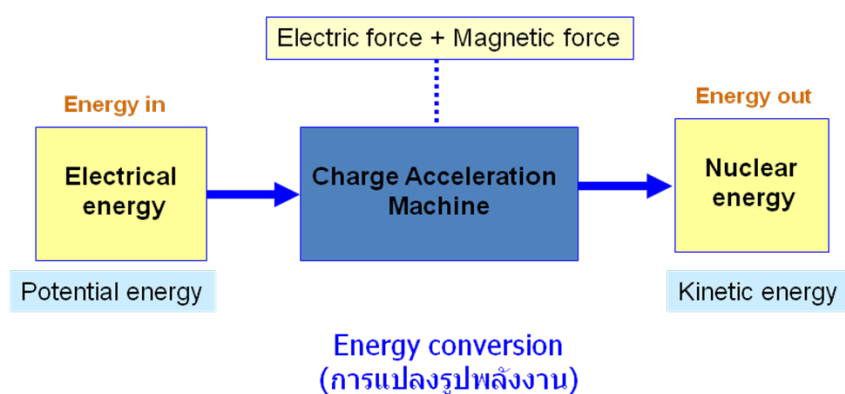


ภาพที่ 2.1 แผนภาพการเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของหลอดภาพโทรทัศน์

กระบวนการเร่งอนุภาคเพื่อกำเนิดอนุภาคพลังงานสูงในเครื่องเร่งอนุภาคต่างๆ เช่น เครื่องเร่งอิเล็กตรอนแบบไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องเร่งอิเล็กตรอนแบบลิเนียร์ (Linear accelerator) เครื่องเร่งอนุภาคโปรตรอน เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน (Cyclotron) และเครื่องปีตาตรอน เป็นต้น เป็นการแปลงพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานศักย์เป็นพลังงานนิวเคลียร์ของอนุภาคในรูปพลังงานจลน์ จากผลของการเร่งอนุภาค พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบจะสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อก่อแรงทางไฟฟ้า กระแสตรงหรือกระแสสลับความถี่สูงในการเร่งอนุภาคและสร้างสนามแม่เหล็กในการบังคับทิศทางลำอนุภาคตามแนววิถีการเคลื่อนที่ แรงทางไฟฟ้าจะเร่ง อนุภาคนิวเคลียร์ ให้มีพลังงานสูง ขึ้นตามความสัมพันธ์ของแรงทางไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน ดังแสดงในแผนภาพภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แผนภาพการแปลงรูปพลังงานในระบบเร่งอนุภาค

ในการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์ของอนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค สามารถหาความสัมพันธ์ของพลังงานและกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

ในทางไฟฟ้านั้น พลังงานจลน์ ( $E$ ) 1 จูล (Joule, J) เกิดจากปริมาณอนุภาคที่มีประจุ ( $Q$ ) 1 คูลอมบ์ (Coulomb, C) เคลื่อนที่ด้วยความต่างศักย์ ( $V$ ) 1 โวลต์ (Volt, V)

$$E = QV \quad \text{J} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อพิจารณาพลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนตัวเดียวหรืออนุภาคที่มีประจุ ( $q$ ) 1 ประจุ เคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ พลังงานของอนุภาคจึงนิยามได้เป็น 1 อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt, eV)

$$E = qV = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J หรือ } 1 \text{ eV}$$

กำลังไฟฟ้า (Power) ที่จ่ายให้เครื่องเร่งอนุภาคพิจารณาได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าในหน่วย wattage ซึ่งจะเป็นผลคูณระหว่างศักดาไฟฟ้า (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) หรือปริมาณอนุภาคที่

มีประจุต่อวินาที ( $Q/s$ ) เมื่อแทนค่าองค์ประกอบของตัวแปรจะพบว่ากำลังไฟฟ้า คือ อัตราการใช้พลังงาน (Energy rate) ดังสมการ

$$P = VI = (E/Q) \times (Q/s) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$= (E/s) \quad J/s$$

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าแรง ( $V/d$ ) จะก่อให้เกิดแรงเชิงกลของอนุภาค ( $F$ ) ที่เกิดจากแรงกระทำทางไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนได้รับไว้สอดคล้องกัน ตามความสัมพันธ์ของสมการเกี่ยวกับแรง 2 สมการ คือ

$$F = ma \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$F = e\mathcal{E} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ  $F =$  แรงเชิงกลของอิเล็กตรอน หน่วย N

$m =$  มวลของอิเล็กตรอน หน่วย kg

$a =$  อัตราเร่งของมวล หน่วย  $m \cdot s^{-1}$

$\mathcal{E} =$  สนามไฟฟ้า =  $V/d$  หน่วย  $V \cdot m^{-1}$

$d =$  ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า หน่วย m

จากสมการ (2.3) และ (2.4) จะได้

$$ma = e\mathcal{E}$$

ดังนั้น อัตราเร่ง

$$a = eE/m = e/m \times V/d \quad m/s^2 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

และ ความเร็วของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง

$$v = at = e/m \times V/d \times t \quad m/s \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

### 2.1.2 พลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกเร่ง

จากทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ เมื่อปี ค.ศ. 1905 ที่พัฒนาจากสัจพจน์(Postulate) ตามธรรมชาติของการเคลื่อนที่ของแสงและกรอบอ้างอิง สรุปได้ 2 ข้อ คือ

1) มวลของวัตถุจะเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของมวลนั้นเปลี่ยน

2) มวลและพลังงานจะสมมูลกันตามสมการ  $E = mc^2$

จากข้อสรุปดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการของการเร่งอนุภาค (วัตถุ) เมื่อมีความเร็วเปลี่ยนไปตามสมการ [6]

$$m^* = m/(1-\beta^2) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อ  $m^*$  คือ มวลของอนุภาคขณะเคลื่อนที่

$m$  คือ มวลนิ่งของอนุภาค

$\beta = v/c$  คือ อัตราความเร็วของอนุภาคต่อความเร็วแสง

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าเมื่ออนุภาคเพิ่มความเร็วขึ้น มวลก็จะเพิ่มขึ้น และ ในสภาพสุญญากาศสามารถเร่งอนุภาคให้มีความเร็วเข้าใกล้ ความเร็ว แสง ดังนั้นพลังงานรวมวัตถุ (Total energy) จะเป็นไปตามสมการ

$$E = m^* c^2 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถกระจายเทอมได้เป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสมมูลของมวลนิ่งและ พลังงานจลน์ ( $T$ ) ดังสมการ

$$E = m^* c^2 = T + mc^2 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อพิจารณาสมการร่วมกันระหว่างสมการ 2.7 และ 2.9 พลังงานจลน์ของอนุภาคสามารถเขียนได้เป็น

$$T = (\gamma - 1)mc^2 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

โดยที่  $\gamma = m^* c^2 / mc^2$

อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการเร่งอนุภาค หากความเร็วของอนุภาคมีค่าต่ำกว่าความเร็วแสงมาก ๆ หรือค่าของ  $\beta$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ ปรัชญาการณ ก็จะไม่เป็นไปตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ (Non-relativistic theory) ในการคิดคำนวณพลังงานจลน์ของอนุภาคก็จะเป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newtonian mechanics)

$$T = 1/2mv^2 \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

## 2.2 อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร

อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ การทำอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) และแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) ซึ่งอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่น ได้แก่ การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) การกระตุ้น (Excitation) และการเกิดเบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) หลังอันตรกิริยาดังกล่าวจะก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานของ

อิเล็กตรอนและถูกดูดกลืนในสสาร ส่วนอันตรกิริยาแบบยืดหยุ่น อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานเพียงบางส่วนหลังอันตรกิริยาและกระเจิงออกจากสสารในมุมต่างๆ

### 2.2.1 การแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้น

การแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้นเป็นการทำอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนกับชั้นโคจรอิเล็กตรอนของอะตอม (Atomic electron) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านมวลอะตอมของอะตอมในสสารจะเกิดการสูญเสียพลังงานในการทำให้เกิดคู่อิออน โดย ในอากาศการก่อให้เกิดคู่อิออนหนึ่งคู่จะให้พลังงานประมาณ 34 eV อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการแตกตัวจำเพาะ (จำนวนคู่อิออนต่อระยะทาง) น้อยมาก เนื่องจากมีความเร็วสูงและมีเวลาน้อยในการชน แต่การแตกตัวจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานลดลง

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนและการกระตุ้นของอิเล็กตรอนคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 [7]

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 NZ(3 \times 10^9)^4}{0.51\beta^2 \times (1.6 \times 10^{-6})^2} \left[ \ln \left( \frac{0.51\beta^2}{I^2(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right] \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ  $e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน มีค่า  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

$v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

$N$  คือ จำนวนอะตอมของสสารต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (number density)

$Z$  คือ เลขเชิงอะตอมของสสาร

$E$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอน หน่วย MeV

$\beta$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนต่อความเร็วแสง ( $v/c$ )

$m_0$  คือ มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (electron rest mass)

$I$  คือ ศักย์การกระตุ้นและการแตกตัวเป็นไอออนเฉลี่ย (mean ionization and excitation potential)

$$\text{ในอากาศ } I = 8.6 \times 10^{-5} \text{ MeV}$$

$$\text{ในสสาร } I = 1.36 \times 10^{-5} \text{ MeV}$$

เมื่อทราบค่า  $dE/dx$  และค่า  $W$  ก็สามารถคำนวณ การแตกตัวจำเพาะ (Specific ionization, S.I.) ได้จากสมการที่ 2.13 [7]

$$S.I. = \frac{dE/dx}{W} \text{ ion pair/cm} \dots\dots\dots(2.13)$$

## 2.2.2 การเกิดเบรมส์ชตราลุง

การเกิดเบรมส์ชตราลุงเป็นอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสของอะตอม (Atomic nuclei) เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่ ด้วยอัตราเร็ว เข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอมสสาร ซึ่งมีความเข้มสนาม ไฟฟ้าสูงเป็นผลให้อิเล็กตรอน ลดอัตราเร็ว ลงอย่างรวดเร็วและเปลี่ยนแนวเคลื่อนที่หักเหไป พร้อมทั้งปลดปล่อย พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า การเกิดเบรมส์ชตราลุง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นโฟตอนรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องและมีพลังงานสูงสุดเท่ากับพลังงานของอิเล็กตรอน ความเข้มของ รังสีเบรมส์ชตราลุง จะแปรผกผันกับกำลังสองของมวลอนุภาคที่เข้าชน ด้วยเหตุนี้อนุภาคหนักที่มีประจุจึงก่อให้เกิดเบรมส์ชตราลุงน้อยกว่าอิเล็กตรอน [8]

การสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนเนื่องจากการเกิดเบรมส์ชตราลุง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.14 [9]

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2c^4} \left(4\ln\frac{2E}{m_0c^2} - \frac{4}{3}\right) \dots\dots\dots (2.14)$$

เมื่อพิจารณาพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่สูญเสียไปเนื่องจากเบรมส์ชตราลุงหรือผลได้รังสี (Radiation yield, Y) สามารถบ่งบอกถึงความของรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้ โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.15 [7]

$$Y = \frac{6 \times 10^{-4} ZE}{1 + 6 \times 10^{-4} ZE} \dots\dots\dots (2.15)$$

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการกระบวนกรแตกตัวเป็นไอออนและเบรมส์ชตราลุง ขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน(E) และเลขอะตอม(Z) ของสสาร ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการ 2. [9]

$$\frac{(dE/dx)_r}{(dE/dx)_c} \cong \frac{EZ}{700} \dots\dots\dots (2.16)$$

## 2.2.3 การกระเจิงกลับ

การกระเจิงกลับเกิดจากอิเล็กตรอนทำอันตรกิริยาแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียสของอะตอม (Atomic nuclei) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนชนกับสสาร ทำให้แนวการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปมาก และสูญเสียพลังงานให้อะตอมน้อยมาก เนื่องจากมีมวลน้อย หากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับในทิศทางเดิมเริ่มต้น เรียกกระบวนการนี้ว่า การกระเจิงกลับ (Back scattering) ปัจจัยสำคัญของการกระเจิงกลับคือ เลขอะตอมและความหนาของสสาร การกระเจิงกลับเกิดขึ้นได้ในสสารที่มีเลขอะตอมสูง

และจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของสสารจนถึงประมาณ 1/3 ของค่าพิสัยของอิเล็กตรอน จากนั้นการกระเจิงกลับจะมีค่าคงที่ พลังงานของอิเล็กตรอนมีผลกับการกระเจิงกลับมากในช่วงที่อิเล็กตรอนมีพลังงานปานกลาง เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นการกระเจิงกลับจะเพิ่มปริมาณขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากมุมของการกระเจิงและพลังงานของอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกไปสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดของสสาร

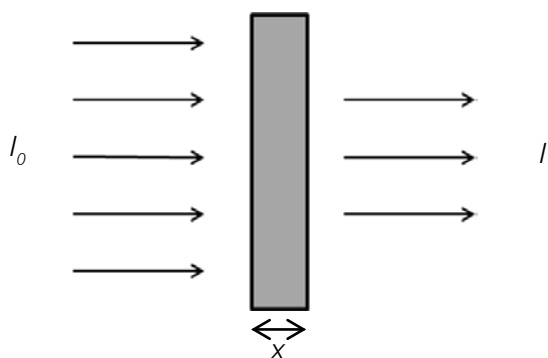
2.2.4 การดูดกลืนอิเล็กตรอน [7]

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสสารและสูญเสียพลังงานด้วยอันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่นไปเรื่อยๆ มีความเร็วลดลงจนเป็นศูนย์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สสารดูดกลืนอิเล็กตรอนไว้ ดังในภาพที่ 2.4 โดยความเข้มของอิเล็กตรอนที่ผ่านสสารจะลดในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลของผลคูณความหนาและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของสสาร ดังสมการ 2.15

$$I = I_0 e^{-\mu x} \dots\dots\dots (2.15)$$

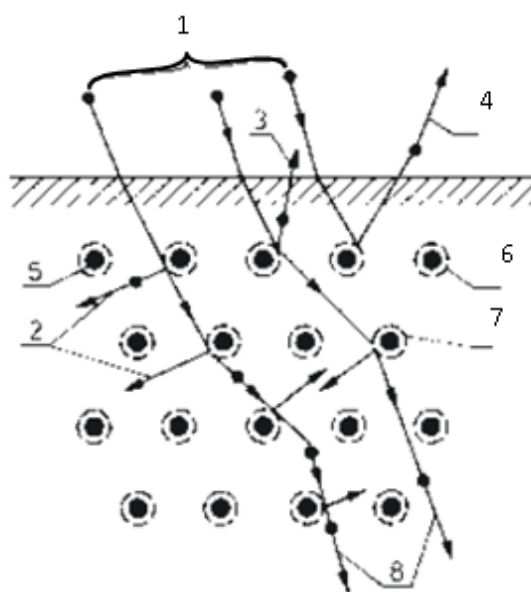
- เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มของอิเล็กตรอนก่อนผ่านสสาร
- $I$  คือ ความเข้มของอิเล็กตรอนหลังผ่านสสาร
- $x$  คือ ความหนาของสสาร
- $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

(Linear absorption coefficient)



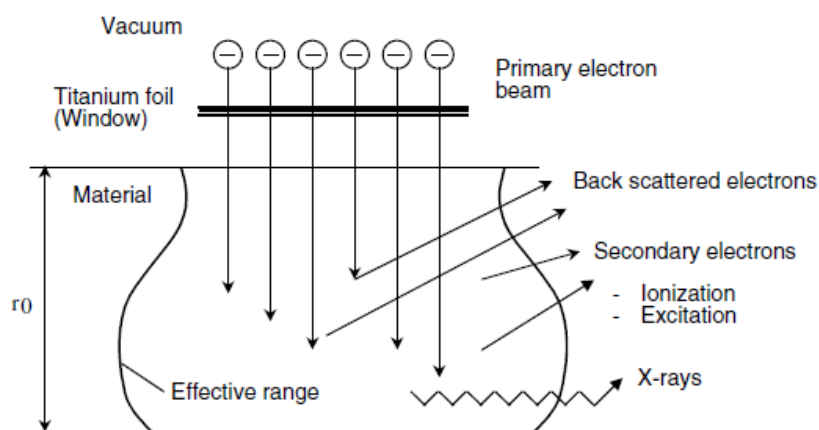
ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงอิเล็กตรอนความเข้ม  $I_0$  กระทบสสารหนา  $x$  และมีความเข้มหลังผ่านสสาร  $I$

อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสารต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังภาพที่ 2.5 และแสดงการเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับไทเทเนียมฟอสเฟต ซึ่งส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้ทำหน้าต่างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 การเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร

- 1- ลำอิเล็กตรอน 2 - อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ไม่หลุดออกจากผิวสสาร  
 3 - อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกจากผิวสสาร 4- อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับ 5 - นิวเคลียสอะตอม  
 6- วงโคจรของอิเล็กตรอน 7- ความร้อนจากการถูกกระตุ้น  
 8- อิเล็กตรอนที่ผ่านลึกเข้าไปในเนื้อของสสาร [2]



ภาพที่ 2.6 การเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับไทเทเนียมฟลอยด์

ที่ใช้เป็นหน้าต่างเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน [10]

ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน อาจแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass absorption coefficient,  $\mu_m$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานของอิเล็กตรอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น ดังสมการ 2.16 และ 2.17



$$\mu_m = \frac{22}{E_{\max}^{1.33}} \quad \text{cm}^2/\text{g} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{cm}^2/\text{g} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ หน่วย  $\text{g}/\text{cm}^3$

ความหนาของสสารที่ลดทอนความเข้มของอิเล็กตรอนลงครึ่งหนึ่งของความเข้มเดิม เรียกว่า ค่าครึ่งความหนา (Half value layer, HVL,  $X_{1/2}$ ) คำนวณได้จากการแทนค่า  $X_{1/2}$  ในสมการ 2.15 จะได้ผลตามสมการ 2.18

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu_m X_{1/2}}$$

$$X_{1/2} = \frac{0.693}{\mu_m} \quad \text{g}/\text{cm}^2 \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

### 2.2.5 พิสัยของอิเล็กตรอน

เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบสสาร อิเล็กตรอนจะเคลื่อนเข้าสู่สสารก่ออันตรกิริยาสูญเสียพลังงานและกระเจิงในทิศทางต่างๆ หลายครั้ง เนื่องจากการชนกับอิเล็กตรอนที่มีมวลเท่ากัน แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจึงไม่เป็นเส้นตรง ดังในภาพที่ 2.7 ระยะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนลงในสสารลึกสุด จากจุดเริ่มต้นที่อิเล็กตรอนเข้าสู่สสารจนหยุดนิ่ง เรียกว่า พิสัยของอิเล็กตรอน (Range, R) ซึ่งพิสัยของอิเล็กตรอนจะขึ้นกับพลังงานและชนิดของสสาร ในสสารชนิดเดียวกันพิสัยของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของพลังงานอิเล็กตรอนกับพิสัยในสสารต่างๆ แสดงได้ดังสมการที่ 2.19 – 2. 21 [7]

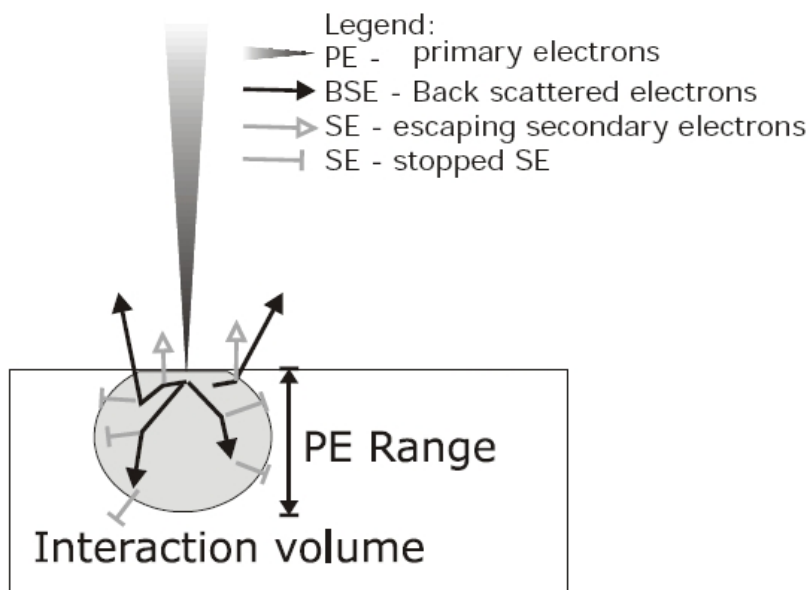
$$\text{เมื่อ } 0.01 \leq E \leq 2.5 \text{ MeV}; \quad R = 412E^{1.266-0.0954\ln E} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\text{หรือ} \quad \ln E = 6.63 - 3.24(3.29 - \ln R)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\text{และ เมื่อ } E > 2.5 \text{ MeV}; \quad R = 530E - 106 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

โดย  $R$  คือ พิสัยของอิเล็กตรอน หน่วย  $\text{mg}/\text{cm}^2$

$E$  คือ พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอน หน่วย MeV

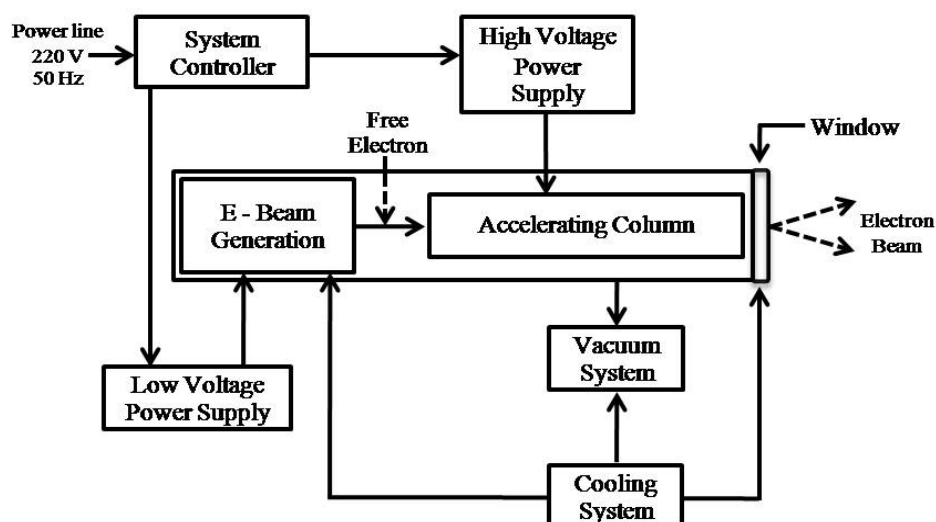


ภาพที่ 2.7 พิสัยของอิเล็กตรอนในสสาร

### 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

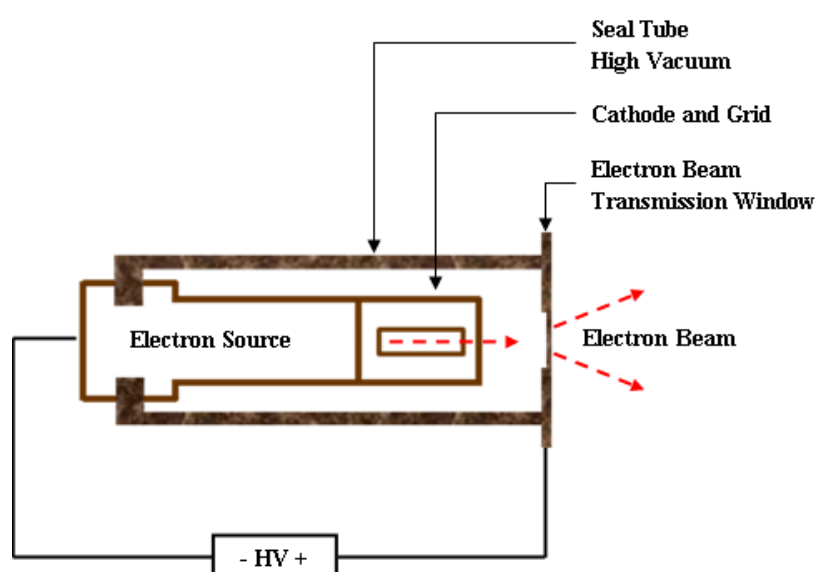
เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและปรับพลังงานอิเล็กตรอนได้ต่อเนื่อง จะเป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบวิถีตรง ที่ใช้ศักดาไฟฟ้าแรงกระแสดตรง มีการทำงานเบื้องต้น คือ อิเล็กตรอนที่ผลิตจากส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน หรือปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) จะถูกดึงด้วยแรงจากสนามไฟฟ้าศักย์สูงขับเคลื่อนอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในสภาวะสุญญากาศทำให้มีพลังงานสูงขึ้น เคลื่อนทะลุผ่านหน้าต่างทางออกที่จัดไว้ โดยโครงสร้างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนมีส่วนประกอบหลักดังแผนภาพภาพที่ 2.8 ได้แก่

- ส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun)
- ส่วนเร่งอนุภาค (Accelerating column)
- ส่วนกำเนิดลำอนุภาค (Beam generation)
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage power supply)
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ (Low voltage power supply)
- ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)
- ระบบระบายความร้อน (Cooling system)
- ส่วนควบคุม (System controller)



ภาพที่ 2.8 แผนภาพโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

เครื่องกำเนิดอิเล็กตรอนกำลังต่ำและพลังงานต่ำในช่วง 30-400 keV จะมีโครงสร้างคล้ายกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แต่ไม่มีเป้ากำเนิดรังสีเอกซ์ ระบบเร่งอิเล็กตรอนจะออกแบบเป็น single stage และเปิดช่องทางให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า เคลื่อนผ่านหน้าต่างเพื่อนำไปใช้งาน โดยเครื่องคอลัมน์สุญญากาศของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนกำลังต่ำและพลังงานต่ำนี้สามารถออกแบบได้ 2 ลักษณะ คือ เป็นระบบเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนแบบสุญญากาศ (Vacuum type) ก่อนเดินเครื่อง ดังแผนภาพภาพที่ 2.8 และเป็นระบบ หลอดกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กแบบสุญญากาศชนิดปิดผนึก (sealed tube type) ดังโครงสร้างในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แผนภาพหลอดกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็ก (Miniature EB [11])

### 2.3.1 ส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน

ส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน คือ แหล่งผลิตอนุภาคอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน เป็นที่ทราบกันดีว่า “อิเล็กตรอน” เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุด ยึดเหนี่ยวอยู่กับโครงสร้างอะตอม ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า (Coulomb force) และอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกมีบทบาทสำคัญ ในการยึดเกาะระหว่างอะตอมเป็นมวลวัตถุ การที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากพันธะของโครงสร้างมวลวัตถุนั้น อิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะหลุดเป็นอิสระจากสภาวะพันธะของอิเล็กตรอน และพลังงานที่ต้องการเพิ่มให้แก่อิเล็กตรอนจะมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนนั้นแฝงอยู่

#### 2.3.1.1 การยึดเกาะของอะตอมธาตุประเภทโลหะ

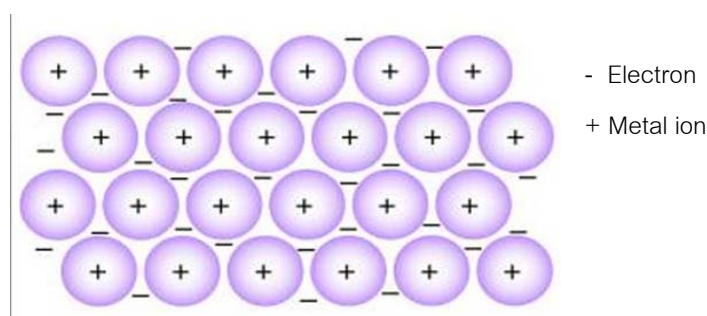
โดยธรรมชาติเมื่ออะตอมของธาตุที่มีสถานะเป็นของแข็งอยู่รวมกันเป็นจำนวนมากจะยึดเกาะกันเป็นโครงสร้างรูปผลึก (Crystal structure) ด้วยแรงระหว่างอะตอม พลังงานที่อะตอมยึดเกาะกันนี้เรียกว่า “Binding energy” กระบวนการยึดเกาะกันของอะตอมโดยทั่วไปจะมี 3 รูปแบบ ได้แก่

ก) การยึดเกาะแบบอิออนิก (Ionic bond) เป็นการยึดเกาะของกลุ่มอะตอมที่มีภาวะเป็นอิออน หลังการยึดเกาะจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระหลงเหลืออยู่ จึงไม่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น โครงสร้างของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โซเดียมไอโอไดด์ (NaI) เป็นต้น

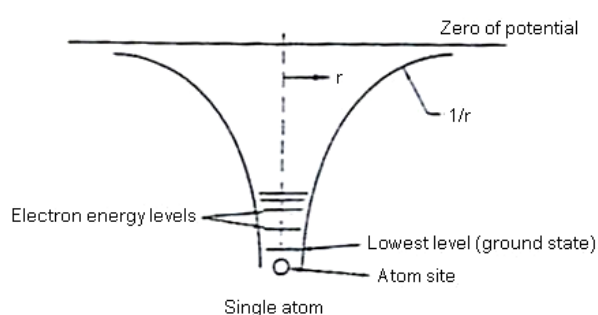
ข) การยึดเกาะแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) เป็นการยึดเกาะของกลุ่มอะตอมแบบแชร์ (share) อิเล็กตรอนระหว่างอะตอม ในสภาพโครงสร้างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอก จะแชร์กันอิมตัวพอดี (อิเล็กตรอนครบ 8 ตัว) โครงสร้างของกลุ่มธาตุประเภทนี้จะอยู่ในภาวะนำไฟฟ้าไม่ดีหรือกึ่งตัวนำ ได้แก่ โครงสร้างของคาร์บอนและซิลิคอน เป็นต้น

ค) การยึดเกาะแบบเมทัลลิก (Metallic bond) เป็นการยึดเกาะของกลุ่มอะตอมธาตุประเภทโลหะ มีการยึดเกาะแบบโควาเลนต์ที่ไม่อิมตัว ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระหลงเหลืออยู่จำนวนมาก จึงมีสภาพนำไฟฟ้า ได้แก่ โครงสร้างของทองแดง เงิน ทังสแตน เป็นต้น

รูปแบบของการยึดเกาะแบบเมทัลลิกแสดงในภาพที่ 2.10. ก. มีการเกาะกันต่อเนื่องเป็นโครงสร้างแลตทิซ (Lattice) เมื่อแยกอะตอมหนึ่งอะตอมได้ออกมาไว้โดดเดี่ยว อะตอมจะแสดงสนามพลังงานศักย์ (Potential energy) รอบตัว มีลักษณะเหมือนเป็นแอ่งพลังงาน (Potential well) และมีระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในแอ่งจากนิวเคลียสขึ้นมาถึงระดับพลังงานเป็นศูนย์ (Zero of potential) ดังภาพที่ 2.10 ข.



ก. รูปแบบการยึดเกาะแบบเมทัลลิก

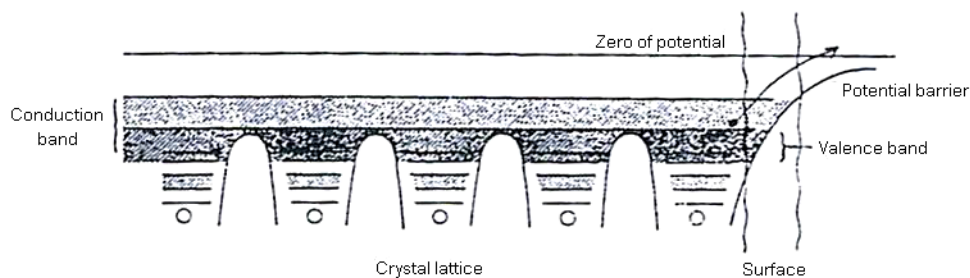


ข. แผนภาพสนามพลังงานศักย์ของอะตอมเดี่ยว [12]

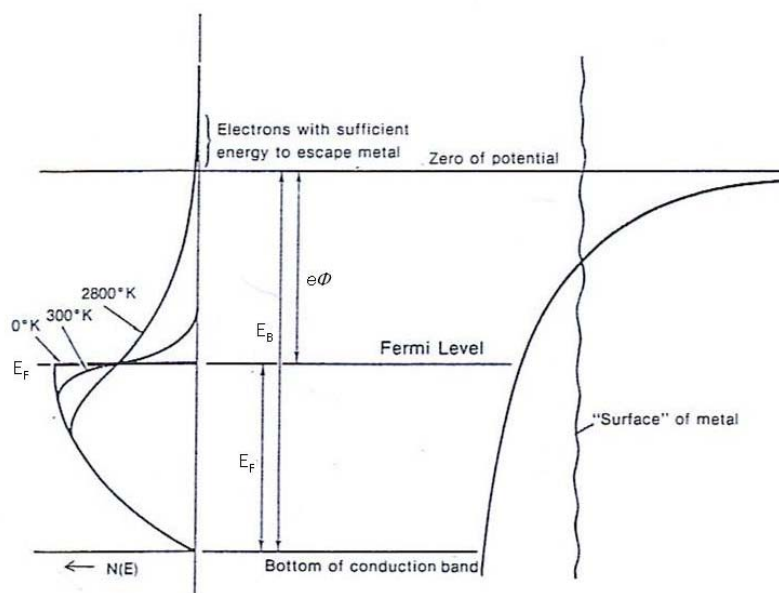
ภาพที่ 2.10 รูปแบบการยึดเกาะของอะตอมธาตุประเภทโลหะ

เมื่ออะตอมธาตุเดี่ยวอยู่รวมกันเป็นกลุ่มอย่างมีระเบียบตามพันธะโครงสร้าง สนามพลังงานศักย์จะเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันต่อเนื่อง เป็นระนาบพลังงานจากเนื้อโลหะถึงผิวโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ในภาวะการยึดเกาะแบบเมทัลลิกนี้แถบพลังงาน 2 ส่วน คือ แถบนำกระแส (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเหลื่อมกัน และมีอิเล็กตรอนอิสระจากพันธะของโครงสร้างเคลื่อนตัวอยู่ในแถบนำกระแสนี้ แม้ว่าจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลายต่อปลายของเนื้อโลหะ อิเล็กตรอนอิสระซึ่งเป็นพาหะของการนำกระแสไฟฟ้ายังคงเคลื่อนที่เฉพาะในแถบนำกระแส ไม่สามารถหลุดจากผิวโลหะได้

อิเล็กตรอนในแถบนำจะหลุดพ้นจากผิวโลหะได้นั้นจะต้องได้รับพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะ ( $E_B$ ) ซึ่งระดับพลังงานที่บริเวณผิวของวัสดุแสดงได้ด้วยแผนผังความสัมพันธ์ของระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level,  $E_F$ ) และพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะในภาพที่ 2.12 อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานที่เอาชนะระดับพลังงาน  $e\phi$  ซึ่งเรียกว่า เวิร์คฟังก์ชัน (Work function) ของผิวโลหะจึงจะหลุดจากผิวโลหะ



ภาพที่ 2.11 แผนภาพของสนามพลังงานศักย์เมื่ออะตอมจับกันเป็นโครงสร้างรูปผลึก [12]



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของระดับพลังงานเฟอร์มิและพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะ [12]

จากภาพที่ 2.12 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์อยู่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะหลุดจากผิวโลหะได้ต้องมีพลังงานเพิ่มขึ้นจากภายนอกอย่างน้อยเท่ากับ  $e\phi$

$$e\phi = E_B - E_F \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีค่า  $e\phi$  แตกต่างกันไปตามลักษณะโครงสร้างอะตอม โลหะที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดีต้องมีค่าเวิร์คฟังก์ชันต่ำ แต่มิได้หมายความว่าโลหะที่มีเวิร์คฟังก์ชันต่ำทุกชนิดใช้ทำแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนได้ การเลือกนำโลหะชนิดใดมาใช้จะต้องพิจารณาคุณสมบัติเฉพาะทางฟิสิกส์และเคมีประกอบด้วย ในทางปฏิบัติโลหะผสมหลายชนิดมีค่าเวิร์ค

ฟังก์ชันต่ำกว่าโลหะเนื้อเดียวกัน ปัจจุบันแคโทดจึงมีการผลิตด้วยวัสดุต่างๆ กันไป ตารางที่ 2.1 แสดงค่าเวอรัคฟังก์ชันของโลหะต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ค่าเวอรัคฟังก์ชันของโลหะต่างๆ [13]

Element	$\phi_0$ (eV)	Element	$\phi_0$ (eV)
Lithium	2.93	Titanium	4.33
Sodium	2.36	Chromium	4.5
Potassium	2.29	Iron	4.67 – 4.81
Cesium	2.14	Nickel	5.04 – 5.35
Beryllium	4.98	Copper	4.53 – 5.10
Magnesium	3.66	Zirconium	4.05
Calcium	2.87	Silver	4.52 – 4.74
Strontium	2.59	Tungsten	4.32 – 5.22
Barium	2.52 - 2.7	Platinum	5.12 – 5.93
Tantalum	4.0 – 4.8	Gold	5.1 – 5.47
Zinc	3.63 – 4.9	Aluminum	4.06 – 4.26
Molybdenum	4.36 – 4.95	Cadmium	4.08

ในการพิจารณาเลือกชนิดของโลหะที่จะนำมาเป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน นอกจากค่าเวอรัคฟังก์ชันแล้ว ยังพิจารณาคุณสมบัติเฉพาะทางฟิสิกส์และเคมี ประกอบในการเลือกใช้ด้วย โดยสรุปแล้วคุณสมบัติของโลหะที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน ควรมีลักษณะดังนี้

- มีค่าเวอรัคฟังก์ชันต่ำ
- มีความสามารถในการปล่อยอิเล็กตรอนสูง
- มีการระเหยเป็นไอได้ยากที่ความกดดันต่ำ
- มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง
- มีการนำความร้อนได้ดี
- ไม่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอากาศ
- สามารถขึ้นรูปได้ง่าย
- มีเสถียรภาพในการปล่อยอิเล็กตรอน

จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงพบว่าโลหะที่นิยมนำมาใช้ในการทำแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมักจะได้แก่ โลหะทังสเตน (Tungsten) และโลหะโบไรด์ (Boride metal)

### 2.3.1.2 กระบวนการในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดจากผิวโลหะ

กระบวนการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่ยึดเหนี่ยวอยู่ในผิว วัสดุ ให้ปลดปล่อยอิเล็กตรอนสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

#### ก) กระบวนการ Thermionic emission

กระบวนการ Thermionic emission เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยการให้ความร้อนกับโลหะที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะได้รับการถ่ายโอนพลังงานจนมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ การให้ความร้อนแก่โลหะทำได้ 2 วิธี คือ การให้ความร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าไปเนื้อโลหะโดยตรง หรือการให้ความร้อนทางอ้อมโดยมีแหล่งกำเนิดความร้อนอิสระถ่ายโอนความร้อนให้กับผิวโลหะ ในทางปฏิบัตินั้นการที่จะให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวโลหะมีพลังงานสูงกว่าพลังงานศักย์ที่ผิวโลหะ ( $E_B$ ) จะต้องให้อุณหภูมิแก่โลหะระหว่าง 1000 ถึง 2500 K [14]

#### ข) กระบวนการ Field emission

กระบวนการ Field emission เป็นกระบวนการที่ใช้สนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากการยึดเหนี่ยว โดยการหลุดจากผิวโลหะของอิเล็กตรอนจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่จะขึ้นอยู่กับความเข้มความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อความเสถียรในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะใช้ความร้อนร่วมด้วย เรียกว่า กระบวนการ Thermionic field emission

#### ค) กระบวนการ Photo emission

กระบวนการ Photo emission เป็นกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยการใช้โฟตอนความเข้มสูง กระตุ้นอิเล็กตรอนทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงาน จากโฟตอน สูงมากพอ ก็จะสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว และหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ดังเช่นการทำงานของโฟโตแคโทดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (PMT)

#### ง) กระบวนการ Secondary emission

กระบวนการ Secondary emission เป็นวิธีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยการถ่ายโอนพลังงานจากการชนของอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะ อิเล็กตรอนที่ถูกชนจะได้รับพลังงานสูงขึ้นจึงสามารถชนะแรงยึดเหนี่ยว และหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เช่นเดียวกับการทำงานของไดโนดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์



อย่างไรก็ตาม กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวโลหะที่ทำได้ง่ายและนิยมใช้กันทั่วไป คือ กระบวนการ Thermionic emission ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของประจุอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากผิวโลหะ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$J = \left( \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} \right) T^2 e^{-e\phi/kT} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

เมื่อ  $J$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ( $A/cm^2$ )

$m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน (kg)

$k$  คือ ค่าคงที่โบลท์แมน ( $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$h$  คือ ค่าคงที่พลังค์ ( $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ )

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

สมการที่ 2.23 คือ สมการริชาร์ดสัน - ดัชแมน (Richardson - Dushman thermionic emission) ตามปกติสมการจะเขียนในรูปของ

$$J = A_0 T^2 e^{-e\phi/kT} \quad A/cm^2 \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

โดย  $A_0 = \left( \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} \right)$  เรียกว่า ค่าคงที่ริชาร์ดสัน ( $A/cm^2 \cdot K^2$ )

ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนจากวัสดุที่ใช้ทำไส้ฟิลาเมนต์ (Filament) หรือแคโทด คือ ปริมาณของอิเล็กตรอนในคอลัมน์สุญญากาศ ในทางทฤษฎีสามารถประเมินปริมาณสูงสุดของอิเล็กตรอนจากความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ผลิตจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้จาก

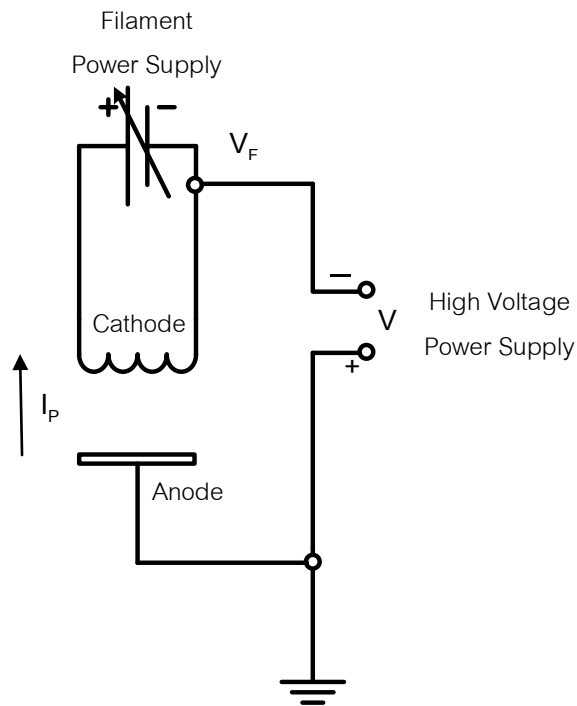
$$B_{\max} = \frac{JqV}{\pi kT} \quad A/cm^2 \cdot \text{sr} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

เมื่อ  $B_{\max}$  คือ ปริมาณของอิเล็กตรอน

$V$  คือ ศักย์ไฟฟ้าเร่ง (V)

$q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (C)

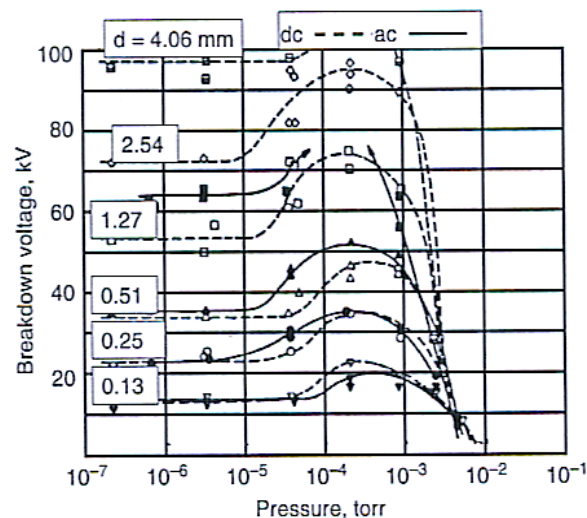
จากสมการที่ 2.25 จะเห็นว่าปริมาณของอิเล็กตรอนเมื่อแคโทดประกอบอยู่กับโครงสร้างของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน นอกจากขึ้นกับความหนาแน่นของกระแสที่ผิวแคโทดแล้วยังขึ้นกับขนาดของศักดาไฟฟ้าเร่งและอุณหภูมิของแคโทดด้วย แผนภาพวงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ทำงานร่วมกับศักดาไฟฟ้าเร่งแสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน

### 2.3.2 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศเป็นระบบทำงานร่วมกับระบบเร่งอิเล็กตรอนในคอลัมน์สุญญากาศ โดยเหตุผลที่ระบบเร่งอิเล็กตรอน ต้องเป็นภาวะสุญญากาศก็เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการชนกับโมเลกุลของอากาศ ป้องกันไม่ให้ขั้วไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอากาศและเพื่อทำให้เกิดความเป็นฉนวนระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้านลบ ระบบสุญญากาศ โดยระดับความเป็นสุญญากาศมีความสัมพันธ์กับระดับศักดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown voltage) ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดค่าต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับสุญญากาศและศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์  
ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดค่าต่างๆ [15]

ระบบสุญญากาศทำหน้าที่สูบโมเลกุลของอากาศที่อยู่ภายในบริเวณที่อิเล็กตรอนเร่งผ่าน  
ด้วยการใช้เครื่องสูบอากาศออกจากระบบที่ถูกปิดสนิท ระดับความเป็นสุญญากาศจะขึ้นอยู่กับ  
ความสามารถของชนิดเครื่องสูบอากาศที่เลือกใช้ เนื่องจากในความเป็นจริงไม่สามารถสูบเอา  
โมเลกุลของอากาศออกจากระบบได้ทั้งหมดยังคงเหลือโมเลกุลของอากาศอยู่บางส่วน โดยที่ระดับ  
ความเป็นสุญญากาศกำหนดจาก “ความดันสุญญากาศ” มีหน่วยวัดเป็น mmHg หรือ Torr ถ้ายิ่ง  
ความดันสุญญากาศสูงมาก (High vacuum pressure) แสดงว่ายังมีโมเลกุลของอากาศน้อย และ  
ระบบก็จะซับซ้อนมากขึ้นด้วย ขั้นตอนการสูบอากาศจะต้องทำเป็นขั้นๆ จากการสูบอากาศอย่าง  
หยาบขั้นต้นที่ระดับสุญญากาศ  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Torr จากนั้นจะเพิ่มระดับความดันสุญญากาศสูงขึ้นเป็น  
 $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Torr และขึ้นไปถึงขั้นความดันสุญญากาศสูงมาก  $10^{-7}$ - $10^{-9}$  Torr ในแต่ละขั้นของการสูบ  
สุญญากาศจะใช้เครื่องสูบอากาศต่างชนิดกัน เครื่องสูบสุญญากาศแบ่งออกเป็นหลายชนิด มี  
ความสามารถเฉพาะในการสูบอากาศต่างกัน เช่น

2.3.2.1 เครื่องสูบอากาศเชิงกล (Mechanical vacuum pump) หรือ (Rotary pump) เป็น  
เครื่องสูบอากาศขั้นต้นสามารถขับอากาศสู่ความดันบรรยากาศได้ อัตราการสูบอากาศประมาณ  
100 l/min ทำความดันสุญญากาศระดับต่ำ  $10^{-1}$ - $10^{-4}$  Torr

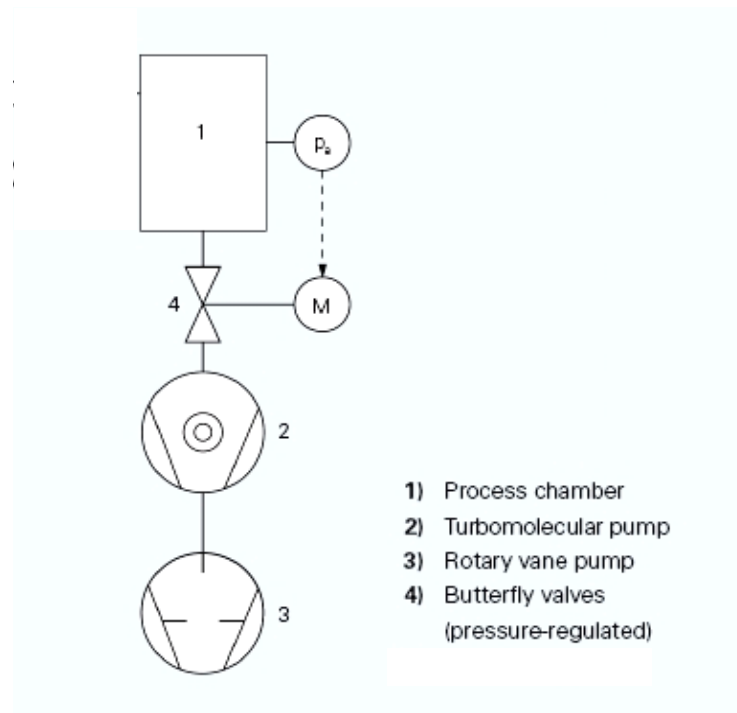
2.3.2.2 เครื่องสูบอากาศระดับความดันสุญญากาศสูง เป็นระบบสูบที่มีอัตราสูบอากาศสูง  
แต่ต้องอาศัยเครื่องสูบอากาศเชิงกลขับอากาศสู่ความดันบรรยากาศ ได้แก่ เครื่องสูบสุญญากาศ  
แบบต้มน้ำมัน (Oil diffusion pump) มีอัตราสูบอากาศประมาณ 100 l/s สามารถทำระดับ

สุญญากาศได้ถึง  $10^{-6}$  Torr และเครื่องสูบลมเทอร์โบโมเลกุลาร์ (Turbo-molecular pump) มีอัตราการสูบลมมากกว่า 100 l/s สามารถทำระดับสุญญากาศได้ถึง  $10^{-7}$  Torr

2.3.2.3 เครื่องสูบลมอากาศระดับความดันสุญญากาศสูงมาก ได้แก่ เครื่องสูบลมแบบไอออนเกตเตอร์ (Ion getter pump) จะสร้างสุญญากาศระดับ  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  Torr ด้วยกระบวนการดูดซับโมเลกุลอากาศในสภาพไอออนไว้ในแผ่นขั้วของเครื่องสูบ ซึ่งเครื่องสูบชนิดนี้จะเริ่มทำงานต่อจากเครื่องสูบลมอากาศระดับความดันสุญญากาศสูง

จะเห็นว่าการทำสภาพสุญญากาศในระดับความดันสุญญากาศใด จะต้องจัดระบบการทำงานร่วมของเครื่องสูบลมอากาศที่เหมาะสม โดยมีเครื่องสูบลมอากาศเชิงกลเป็นหลักและทำงานร่วมกับเครื่องสูบลมอากาศระดับความดันสุญญากาศสูงขึ้นตามลำดับ เช่น ระบบกำเนิดลำอิเล็กตรอนต้องการความดันสุญญากาศระดับ  $10^{-6}$  Torr สามารถจัดระบบได้ดังตัวอย่างในภาพที่

2.15



ภาพที่ 2.15 แผนภาพของระบบสุญญากาศที่ระดับ  $10^{-6}$  Torr

### 2.3.3 หน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็ก คือ ช่องหน้าต่างทางออกของลำอิเล็กตรอน (Electron beam window) ซึ่งจะต้องบางพอที่อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ทะลุผ่านได้ แต่ในขณะเดียวกัน ต้องทนความดันสุญญากาศของระบบและทนความร้อนจากการสูญเสีย

พลังงานของลำอิเล็กตรอนด้วย วัสดุที่ใช้ทำหน้าที่ต่างเพื่อเป็นทางผ่านลำอิเล็กตรอนที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (สามารถรีดให้บาง และทนแรงดันสูงได้)
- มีค่าการนำความร้อนสูง
- มีความหนาแน่นต่ำ
- มีค่าความร้อนจำเพาะสูง
- มีอัตราการดูดกลืนอิเล็กตรอนต่ำ

วัสดุที่เป็นหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน ได้แก่ แผ่นฟอลตะอะลูมิเนียม ไททาเนียม โลหะผสมอะลูมิเนียมเบริลเลียม ซิลิคอนและเพชร โดยมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2.2 ซึ่งได้เรียงตามคุณสมบัติในการเป็นหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอนที่ดี แต่เมื่อซึ่งบนพื้นที่กว้างก็จำเป็นจะต้องมีตะแกรงโลหะที่มีความแข็งแรงรองรับ มีผลให้สูญเสียปริมาณความเข้มของลำอิเล็กตรอนและการเพิ่มปริมาณรังสีเอกซ์จากอันตรกิริยาเบรมสส์ตราลุง อย่างไรก็ตามการพิจารณาคัดเลือกทางเทคนิคต้องพิจารณาความเหมาะสมในด้านราคาและการหาได้ง่ายตามท้องตลาดประกอบด้วย

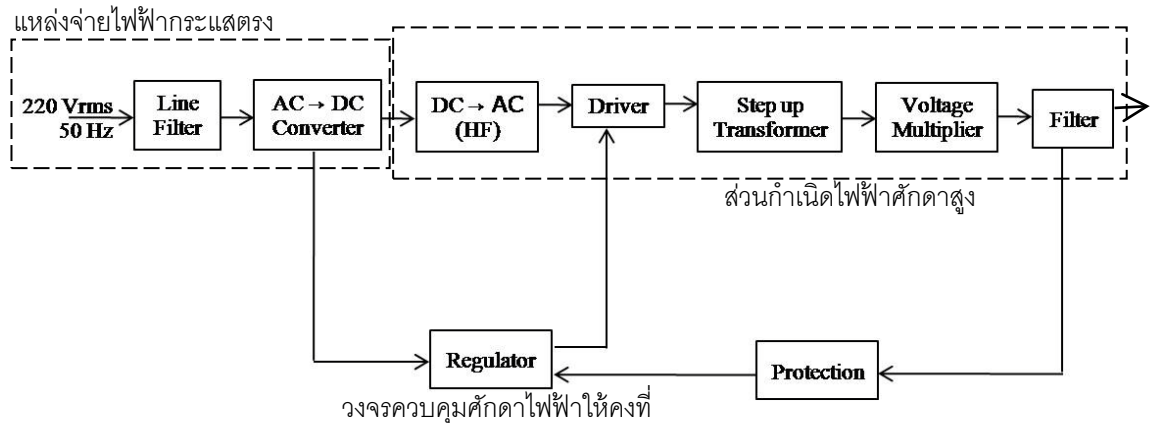
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำหน้าที่ต่างทางออกลำอิเล็กตรอน

Material properties	Aluminium	Aluminium beryllium alloy	Diamond	Titanium
Specific heat capacity	900 J/kg·K	1,675 J/kg·K	400 J/kg·K	520 J/kg·K
Density	2700 kg/m <sup>3</sup>	2,122 kg/m <sup>3</sup>	3,580 kg/m <sup>3</sup>	4,506 kg/m <sup>3</sup>
Thermal conductivity	236 W/m·K	246 W/m·K	2.4 kW/m·K	21.9 W/m·K
Maximum service temperature	933 K	1675 K	2,000 K	1941 K
Tensile strength	22 GPa	447 MPa	2,930 MPa	44 GPa

#### 2.3.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage power supply)

แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงในเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการสร้างศักดาไฟฟ้าเร่ง (Accelerating voltage) ระหว่างแคโทดกับแอโนด สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองในคอลัมน์สูญญากาศจะทำให้เกิดแรงดึงดูดกลุ่มอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงผ่านช่อง

หน้าต่างทางออก สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์สูงมีโครงสร้างดังแผนภาพดังภาพที่ 2.16 ประกอบด้วยวงจร 3 ส่วนได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) วงจรกำเนิดไฟฟ้าสัปดาห์สูง และวงจรควบคุมสัปดาห์ไฟฟ้าให้คงที่



ภาพที่ 2.16 แผนภาพโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์สูง

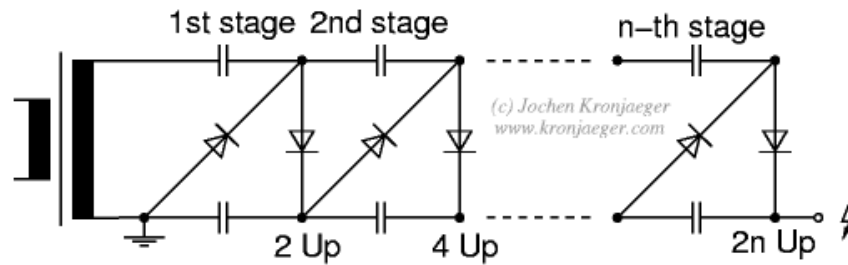
#### 2.3.4.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้ามาตรฐานเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Converter) โดยไฟฟ้ากระแสสลับจะผ่านอุปกรณ์กรองสิ่งรบกวนทางสายจ่ายกำลังไฟฟ้า (Line filter) และมีวงจรป้องกันการกระชอกจากสัปดาห์ฟ้าเกินพร้อมทั้งฟิวส์ป้องกันการกระชอกเกิน ในระบบจ่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิมนั้นไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงขนาดสัปดาห์ฟ้า ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดทุติยภูมิย่อยหลายขดป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าวงจรเรียงกระแสและกรองกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรง ตามความต้องการของวงจรในส่วนต่างๆ สำหรับเทคโนโลยีปัจจุบันการเพิ่มประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะใช้เทคนิคของการสวิตช์ (Switching technique) ด้วยความถี่สูง หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงกระแสสูงสำหรับกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้อุปกรณ์เรียงกระแสต้องทำงานที่ความถี่สูงด้วย

#### 2.3.4.2 วงจรกำเนิดไฟฟ้าสัปดาห์สูง

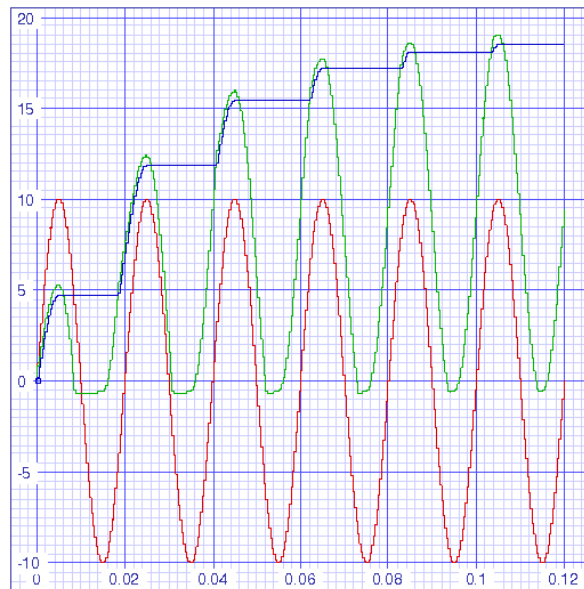
วงจรกำเนิดไฟฟ้าสัปดาห์สูงทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยอาศัยกระบวนการกำเนิดความถี่สูงจากวงจรออสซิลเลเตอร์ส่งสัญญาณไปป้อนอุปกรณ์สวิตช์กำลังให้ขับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบเพิ่มสัปดาห์ฟ้า (Step up Transformer) ขนาดสัปดาห์ฟ้าทางออกขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งต้องคำนึงถึงขีดจำกัดการฉนวน (Insulation break down) ในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าสัปดาห์สูง จึงจำเป็นต้องใช้วงจรทวิสัปดาห์ฟ้าช่วยในการเพิ่มสัปดาห์ฟ้าด้วยการจัดเรียงกระแสไฟฟ้าให้ตัว

เก็บประจุและนำไปจัดต่ออันดับกันเพื่อทวีศักดาไฟฟ้าขึ้นละ 2 เท่าดังวงจรในภาพที่ 2.17 และการทำงานในภาพที่ 2.18



$$\text{HV DC output} = V_{in} \times 2 n U_p$$

ภาพที่ 2.17 วงจรทวีศักดาไฟฟ้า



ภาพที่ 2.18 ขั้นตอนการทวีศักดาไฟฟ้าต่อเนื่องในวงจรทวีศักดาไฟฟ้า

ในทางเทคนิครูปแบบของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง มักเรียกวงจรรวมนี้ว่า “วงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter)” ในวงจรกิจักดาสูงเป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงศักดาสูง รูปแบบการขับหม้อแปลงไฟฟ้าในทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแบ่งวงจรคอนเวอร์เตอร์ ได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- ก) ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly back converter) ใช้กับวงจรที่ไม่ต้องการกระแสสูง
- ข) พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-pull converter) ใช้กับวงจรที่ต้องการกระแสสูงปานกลาง
- ค) บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Bridge converter) ใช้กับวงจรที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง

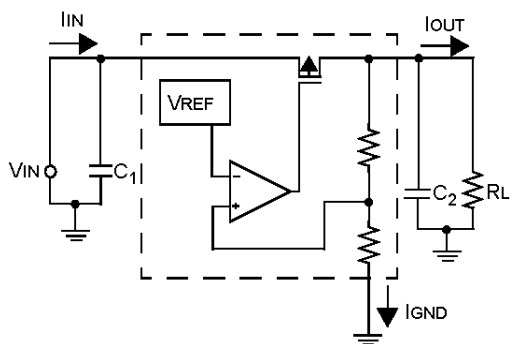
### 2.3.4.3 วงจรควบคุมศักดาไฟฟ้าให้คงที่

การควบคุมศักดาไฟฟ้าทางออกให้คงที่เป็นการทำงานร่วมระหว่างวงจรควบคุมศักดาไฟฟ้าและวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ในการควบคุมศักดาไฟฟ้าสูงให้คงที่นั้น ศักดาไฟฟ้าทางออกหลังการกรองกระแสจะถูกแบ่งสัดส่วนศักดาไฟฟ้าเป็นค่าต่ำเพื่อป้อนกลับ (Feedback) มาเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิงในวงจรควบคุมศักดา (Voltage regulator) ผลต่างของการเปรียบเทียบจะถูกปรับชดเชยในส่วนเกินหรือขาดให้ความต่างเป็นศูนย์ โดยทั่วไป วงจรควบคุมศักดาจะแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

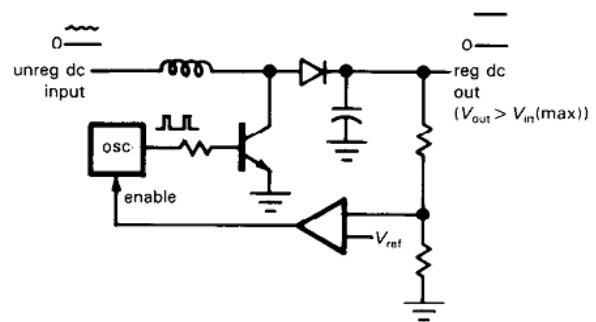
ก) แบบเชิงเส้น (Linear regulator) รูปแบบจะเป็นวงจรควบคุมศักดาเชิงแบบอันดับ (Series regulator) ซึ่งการควบคุมจากผลการป้อนกลับเป็นการปรับปริมาณขั้วกระแสของอุปกรณ์อันดับในวงจร ดังวงจรในภาพที่ 2.19 ก

ข) แบบสวิตชิง (Switching regulator) การควบคุมผลการป้อนกลับอาจเป็นการปรับเปลี่ยนความถี่หรือความกว้างพัลส์ซึ่งขับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ (Switching Element) ดังวงจรในภาพที่ 2.19 ข

การนำไปใช้งานมักจะเลือกใช้แบบสวิตชิงเมื่อต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงและมักเลือกใช้แบบเชิงเส้นเมื่อต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ต้องการศักดาไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตคงที่มากและมีสิ่งรบกวนน้อย



ก. Linear regulator



ข. Switching regulator

ภาพที่ 2.19 วงจรควบคุมศักดาคงที่



## 2.4 ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน

กระบวนการฉายรังสีผลิตภัณฑ์เป็นการใช้ชนิดของรังสีที่มีคุณสมบัติ ระดับพลังงานและปริมาณที่เหมาะสมเพื่อก่อให้เกิดผลของอันตรกิริยารังสีสร้างกระบวนการทางเคมีรังสี เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน กำลังงานต่ำและ พลังงานต่ำ เหมาะกับงานวิจัยด้าน การตัดแปรรพอลิเมอร์ อุตสาหกรรมเคลือบผิว วัสดุ การบ่มหมึกพิมพ์ พิมพ์และการบำบัดก๊าซเสีย เป็นต้น ตัวแปรในการประเมินปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนจากเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนในงานฉายรังสี ที่สำคัญได้แก่

ก. พลังงานของอิเล็กตรอน :  $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$

ข. ปริมาณรังสีดูดกลืน :  $1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy}$

ค. อัตราพลังงานที่ปลดปล่อย :  $1 \text{ MJ/h} = 0.27 \text{ kW}$

### 2.4.1 การประเมินปริมาณรังสี

ปริมาณรังสีดูดกลืนในวัสดุที่ต้องการฉายรังสี (Irradiation absorbed dose) สามารถประเมินได้จากตัวแปรที่ควบคุมจากเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรในการประเมินค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีดูดกลืนเป็นไปตามสมการที่ 2.26

$$D_a = F_p \cdot (P \cdot T / M) \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

เมื่อ  $D_a$  คือ ปริมาณรังสีดูดกลืนเฉลี่ย (Average dose) kGy

$P$  คือ อัตราพลังงานที่ปลดปล่อย (Emitted power) kW

$T$  คือ เวลาในการฉายรังสี (Irradiation time) s

$M$  คือ มวลของวัสดุที่ฉายรังสี (Mass of the material) kg

$F_p$  คือ แฟกเตอร์แก้ค่า (Dimensionless factor) เกิดจากสัดส่วนการดูดกลืนพลังงานในวัสดุ ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของวัสดุ

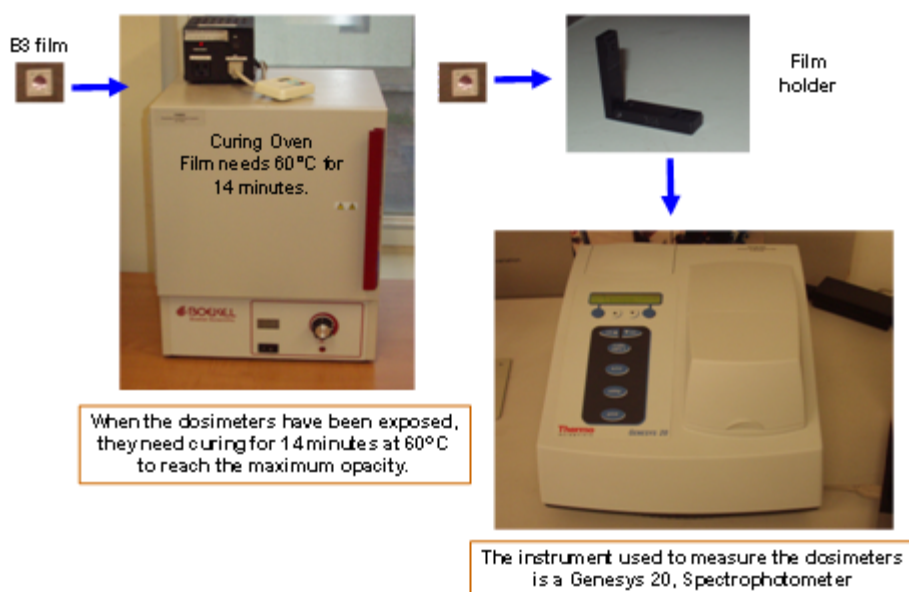
จากสมการที่ 2.26 สามารถคำนวณหาอัตราการปริมาณการฉายรังสีวัสดุ (Mass processing rate) หรือมักจะเรียกในเชิงผลผลิตของระบบ (Throughput rate) ดังสมการ 2.27

$$M/T = F_p \cdot P/D_a \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

ถ้าค่าของ  $F_p = 1$ ; และเครื่องปรับอัตราพลังงานที่ปลดปล่อย 1 kW ที่ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีดูดกลืน 1 kGy จะได้ผลผลิตการฉายรังสี 1 kg/s.

## 2.4.2 การวัดปริมาณรังสี

การฉายรังสีผลิตภัณฑ์หรือตัวอย่างทดลองต้องมั่นใจว่าได้ระดับปริมาณรังสีตามที่มีการคำนวณ เพื่อปรับค่าตัวแปรในการฉายรังสีไว้ ปริมาณรังสีดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้ด้วยกระบวนการวัดปริมาณรังสี ในทางปฏิบัติการวัดปริมาณรังสีของลำอิเล็กตรอนจะใช้ฟิล์มวัดปริมาณรังสีและอ่านค่าด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งจะต้องมีการปรับเทียบด้วยฟิล์มมาตรฐานก่อน และฟิล์มหลังการฉายรังสีต้องผ่านการอบร้อนที่เหมาะสมเพื่อบ่มฟิล์มก่อนนำไปอ่านค่า ดังกระบวนการในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 กระบวนการวัดปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน

ฟิล์มที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนในช่วงพลังงาน 50-100 keV จะเป็นฟิล์มวัดปริมาณรังสีชนิดโครมิก(Radiochromic film) ซึ่งทำจากสารโพลีไวนิลบูทียรัล (Polyvinyl butyral) [16] โดยมาตรฐานการวัดจะอ้างอิงตาม ISO/ASTM 51818 ดังแสดงในภาคผนวก ข. การใช้ฟิล์มวัดปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำนี้จะต้องใช้แผ่นฟิล์มนอกซองบรรจุ ต้องระมัดระวังแผ่นฟิล์มถูกเอกซโพสด้วยแสงความเข้มสูงและแสงอุลตราไวโอเล็ต

## บทที่ 3

### การพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน พลังงานต่ำ ที่สามารถออกแบบและสร้าง ขึ้นได้จากการใช้ วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศเป็นหลัก เพื่อให้เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นมีราคาประหยัด บำรุงรักษาง่าย มีความยืดหยุ่นในการปรับระบบให้เหมาะกับการใช้งานด้านการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการฉายลำอิเล็กตรอนเพื่อปมสารผสมของหมึกพิมพ์และสีเคลือบผิววัสดุ การปรับปรุงคุณสมบัติของสารพอลิเมอร์ ชนิดฟิล์มบาง การสร้างภาวะปลอดเชื้อบนผิววัสดุและการบำบัดก๊าซเสียจากการเผาไหม้ เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยและพัฒนาด้านเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็ก ทำให้สามารถดำเนินการออกแบบและสร้าง ขึ้นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

#### 3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบ

เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่พัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการใช้งาน ได้กำหนดทิศทางเทคนิคตามขอบเขตสำหรับนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบไว้ดังนี้

3.1.1 เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนกำลังต่ำทั่วไปมีรูปแบบการเร่งแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC type) สามารถแปรเปลี่ยนพลังงานได้ต่อเนื่องกว้าง

3.1.2 พลังงาน ของอิเล็กตรอนปรับค่า ระหว่าง 40-100 keV ที่กระแส ลำอิเล็กตรอนในคอลัมน์สูงสุด 2 mA ซึ่งประมาณปริมาณอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากไส้หลอดของส่วนกำเนิดอิเล็กตรอนต้องปล่อยได้อย่างน้อย  $1.3 \times 10^{16}$  electron/s

3.1.3 ระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนต้องจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงปรับค่าได้ถึง ศักดาสูงสุด 100 kV ที่กำลังไฟฟ้าประมาณ 200 W พร้อมจัดมาตรวัดแสดงค่าศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะใช้งาน

3.1.4 ส่วนเร่งอิเล็กตรอนเป็นแบบเร่งสเตจเดียว (Single stage) เป็นคอลัมน์สุญญากาศ รูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม จัดระยะขั้วไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการฉนวนป้องกันการอาร์ค

3.1.5 หน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอนอาจทำด้วยพอลิอะลูมิเนียมหรือไทเทเนียมบางพอที่ให้อิเล็กตรอนพลังงาน 40 keV ผ่านได้มากที่สุด และสามารถทนแรงดันสุญญากาศที่  $10^{-6}$  Torr และความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียพลังงานของลำอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งได้

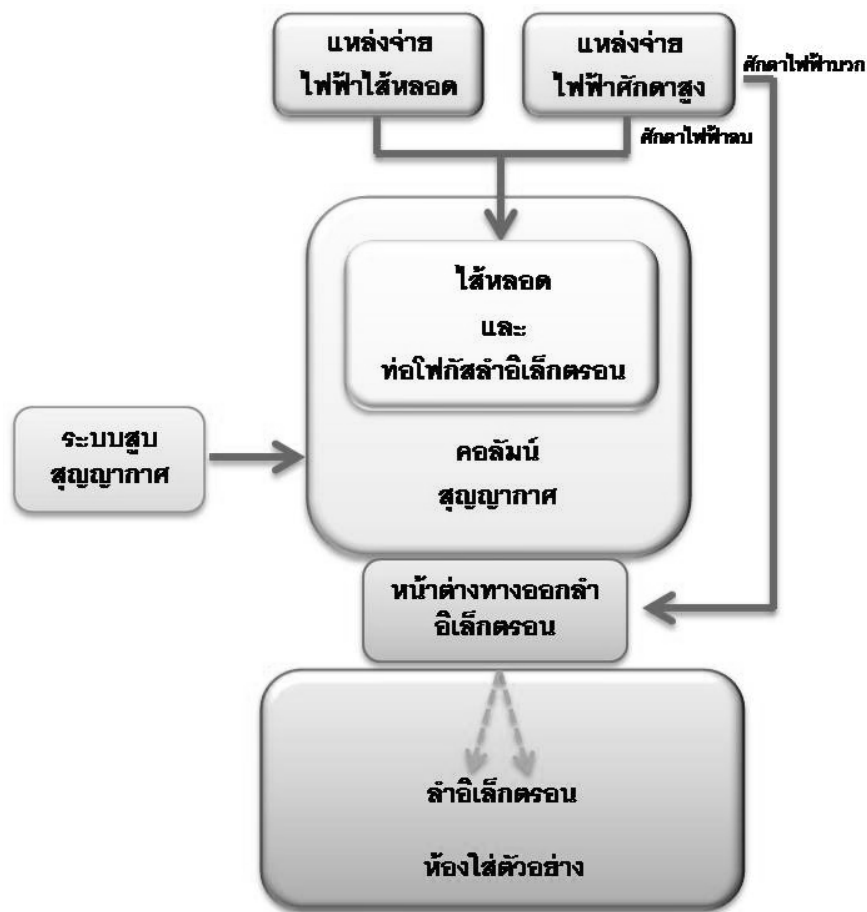
3.1.6 ระบบสุญญากาศเลือกแบบระบบร่วมระหว่างเครื่องสูบอากาศแบบเชิงกลและเครื่องสูบอากาศแบบเทอร์โบโมเลกุลาร์ที่สามารถสร้างความดันสุญญากาศที่ระดับ  $10^{-6}$  Torr พร้อมมาตรแสดงระดับสุญญากาศ

3.1.7 ขนาดห้องใส่ตัวอย่างสำหรับงานทดลองมีขนาด 22 cm x 26.5 cm x 22 cm (กว้าง x ลึก x สูง) ซึ่งภายในห้องบรรจุด้วยตะกั่วกันรังสีที่เกิดจากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนกับวัสดุภายในห้องใส่ตัวอย่างเพื่อความปลอดภัยทางรังสี โดยระดับรังสีรั่วไหลที่ผนังห้องใส่ตัวอย่างต้องน้อยกว่า  $20 \mu\text{Sv/h}$

จากความต้องการทางเทคนิคดังกล่าวสามารถออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนได้ดังแผนภาพภาพที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน (Electron beam generation)
- คอลัมน์สุญญากาศ (Vacuum chamber)
- ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)
- ระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน (Electron beam power supply)
- หน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน (Electron beam window)
- ห้องใส่ตัวอย่าง (Sample chamber) ที่บรรจุด้วยตะกั่วกำบังรังสี

เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่ออกแบบขึ้นมีการทำงานเบื้องต้น เริ่มจากระบบสุญญากาศสร้างสภาวะสุญญากาศในคอลัมน์เร่งอิเล็กตรอนด้วยเครื่องสูบอากาศเชิงกลที่ระดับ  $10^{-2}$  Torr จากนั้นเดินเครื่องสูบอากาศแบบเทอร์โบโมเลกุลาร์จนได้ระดับสุญญากาศ  $10^{-6}$  Torr แล้วจึงใส่ตัวอย่างทดลองในห้องใส่ตัวอย่างตามระยะและพื้นที่ที่เหมาะสม ก่อนจ่ายศักดาไฟฟ้าเร่งซึ่งมีขั้วลบที่ด้านใต้หลอดและขั้วบวกด้านหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน โดยปรับเพิ่มขนาดศักดาตามพลังงานของอิเล็กตรอนและปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้หลอดเพื่อกำเนิดปริมาณอิเล็กตรอนให้ได้ กระแสลำอิเล็กตรอนตามต้องการ ด้วยการอ่านค่าจากมาตรวัดของระบบจ่ายไฟฟ้า จับเวลาฉายรังสีตัวอย่างตามปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่ต้องการ



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดลำอิเล็คตรอนที่ออกแบบขึ้น

### 3.2 การออกแบบและสร้างส่วนกำเนิดลำอิเล็คตรอน

ส่วนกำเนิดลำอิเล็คตรอนประกอบด้วย ส่วนของไส้หลอดและท่อไฟกัสล่าอิเล็คตรอน มีขั้นตอนการออกแบบและสร้างดังนี้

#### 3.2.1 ไส้หลอด (Filament)

จากแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์จากรัสเซียที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศและมีราคาต้นทุนต่ำ การออกแบบส่วนไส้หลอดจึงเลือกหลอดทังสเตนฮาโลเจน ขั้วขาหลอดแบบ GY6.35 มาประยุกต์เป็นไส้หลอด โดยหลอดทังสเตนฮาโลเจนที่นำมาใช้ต้องการศักดาไฟฟ้า 24 V กำลังไฟฟ้า 50 W ลักษณะของไส้ทังสเตนเป็นขดเกลียวในแนวนอน มีขนาดดังภาพที่ 3.2

ความหนาแน่นของอิเล็คตรอนอิสระ ที่ได้จากไส้หลอดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ Richardson equation ในสมการที่ 2.24 โดยแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$A = \text{Richardson constant} = 120 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$$

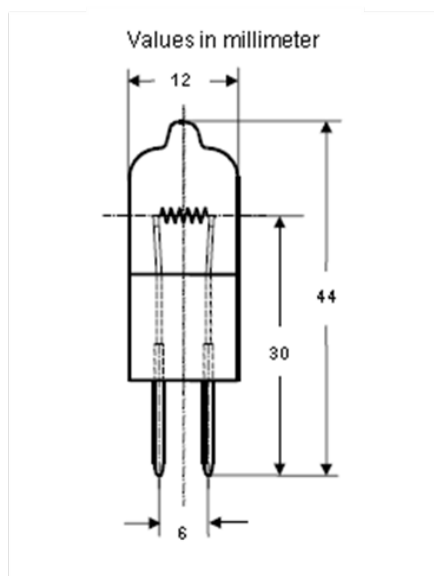
$$T = \text{อุณหภูมิของ Tungsten filament} = 2700 \text{ K}$$

$$e\phi = \text{Work function ของ Tungsten filament} = 4.5 \text{ eV}$$

$$K = \text{Boltzmann's constant} = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

จากการคำนวณจะได้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระจากไส้หลอดทั้งสแตนนี้เท่ากับ  $3.35 \text{ A/cm}^2$  คิดเป็นจำนวนอิเล็กตรอนต่อเวลาต่อพื้นที่จะได้  $2.09 \times 10^{19} \text{ electrons/s}\cdot\text{cm}^2$

ในการใช้งานหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนที่นำมาประยุกต์นี้จะต้องตัดหลอดแก้วด้านปลาย ออกจนถึงบริเวณขั้วของไส้หลอด ดังภาพที่ 3.3 และรีบเก็บรักษาไว้ในที่ควบคุมความชื้นทันทีก่อนใช้งาน เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ผิวไส้ทั้งสแตน



ภาพที่ 3.2 หลอดทั้งสแตนฮาโลเจนที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นไส้หลอด



ภาพที่ 3.3 หลอดทังสเตนฮาโลเจนที่ตัดส่วนหลอดแก้วออก

### 3.2.2 ฐานยึดไส้หลอด

การออกแบบฐานยึดไส้หลอดจะต้องสอดคล้องกับคอลัมน์สุญญากาศของส่วนเร่งอิเล็กตรอน (ในหัวข้อที่ 3.3) ฐานยึดไส้หลอดทำจากถ้วยเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ซึ่งถ้วยเซรามิกนี้มีความเป็นฉนวนป้องกันการอาร์กของไฟฟ้าศักดาสูงระหว่างขั้วแคโทดกับผนังคอลัมน์สุญญากาศ การยึดขั้วไฟฟ้างับกันถ้วยทำได้โดยเจาะกันถ้วยร้อยสลักเกลียวยึดกับแป้นทองเหลือง สลักเกลียวที่ยึดติดกับแป้นทองเหลืองนี้จะทำหน้าที่เป็นขั้วต่อให้กับไส้หลอดไฟฟ้าและท่อโฟกัสลำอิเล็กตรอน (Beam focusing tube) เพื่อรับศักดาไฟฟ้าแรงและกระแสจุดไส้หลอดจากระบบจ่ายไฟฟ้า ที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้างับถ้วยเซรามิกด้านจ่ายไฟฟ้านี้ด้วยกาวอีพ็อกซีป้องกันสุญญากาศรั่ว ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ขั้วไส้หลอดจะยึดบนฐานเซรามิกด้านในคอลัมน์สุญญากาศโดยเสาชั้วไฟฟ้าทองเหลืองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ยาว 30 mm เจาะรูทะลุตลอด ที่ปลายทั้งสองด้านของเสาชั้วไฟฟ้าทองเหลืองทำเกลียวขนาด 3 มิลลิเมตร ปลายด้านหนึ่งยึดกับเสาสลักเกลียวที่กันถ้วยเซรามิก ส่วนอีกด้านหนึ่งยึดขั้วหลอดไฟฟ้าด้วยสลักเกลียว ดังภาพที่ 3.5 ขณะที่ด้านข้างเสาชั้วไฟฟ้าทองเหลืองนี้เจาะรูสำหรับร้อยสายไฟจากขั้วหลอดไฟฟ้า และล็อกสายไฟด้วยสลักหัวหนอนขนาด 2 mm ดังภาพที่ 3.6 นอกจากนี้เสาชั้วไฟฟ้าทองเหลืองข้างหนึ่งจะมีรูสกรูขนาด 2 mm สำหรับยึดท่อโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพที่ 3.4 การยึดขั้วทองเหลืองซึ่งเป็นขั้วต่อไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ใต้หลอดและท่อไฟกั๊ส



ภาพที่ 3.5 สลักเกลียวสำหรับยึดขั้วหลอดไฟฟ้ากับเสาขั้วไฟฟ้าทองเหลืองที่ดัดองกลึงเฉพาะ



ภาพที่ 3.6 การจับยึดขั้วหลอดไฟฟ้ากับถ้วยเซรามิกและเชื่อมสายไฟฟ้ากับเสาขั้วไฟฟ้า



### 3.2.3 ท่อโฟกัสลำอิเล็กตรอน (Beam focusing tube)

ท่อโฟกัสลำอิเล็กตรอนเป็นอุปกรณ์สร้างกระบวนการโฟกัสแบบไฟฟ้าสถิตบีบลำอิเล็กตรอนไม่ให้กระจายออกรอบตัว ท่อโฟกัสนี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นอ่างโฟกัสในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวง โดยกึ่งกลางขึ้นรูปจากทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในประมาณเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วหลอดไฟฟ้า (ประมาณ 16.8 mm) ยาว 50 mm หนา 0.6 mm ที่ส่วนปลายของท่อโฟกัสด้านปล่อยลำอิเล็กตรอนจะต้องขัดให้มันและผิวเรียบลื่นไม่มีเหลี่ยมคมเพื่อความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ปลายอีกด้านหนึ่งจะสวมเข้ากับขั้วหลอดไฟฟ้าและยึดกับเสาขั้วไฟฟ้าข้างหนึ่งเพื่อให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับไส้หลอดรวมเป็นแคโทด แต่จะต้องไม่สัมผัสกับเสาขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งเนื่องจากจะเกิดการลัดวงจรของไส้หลอด ดังนั้นในการออกแบบผนังท่อโฟกัสด้านหนึ่งจึงต้องกัดเอาเนื้อทองเหลืองออกดังภาพที่ 3.7 ขณะที่ผนังท่อโฟกัสด้านตรงข้ามที่ยึดกับเสาขั้วไฟฟ้าด้วยสกรูขนาด 2 mm ได้เจาะร่องเป็นแนวยาว 10 mm ทำให้สามารถสไลด์เลื่อนปรับระดับขึ้นลงได้มีผลให้แนวสนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนเพื่อช่วยในการปรับขนาดของลำปีม ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.7 ท่อโฟกัสลำอิเล็กตรอนและการยึดกับขั้วไส้หลอด



ภาพที่ 3.8 การปรับระดับของท่อไฟกล่าอิเล็คตรอน

### 3.3 การออกแบบและสร้างคอลัมน์สุญญากาศสำหรับเร่งลำอิเล็คตรอน

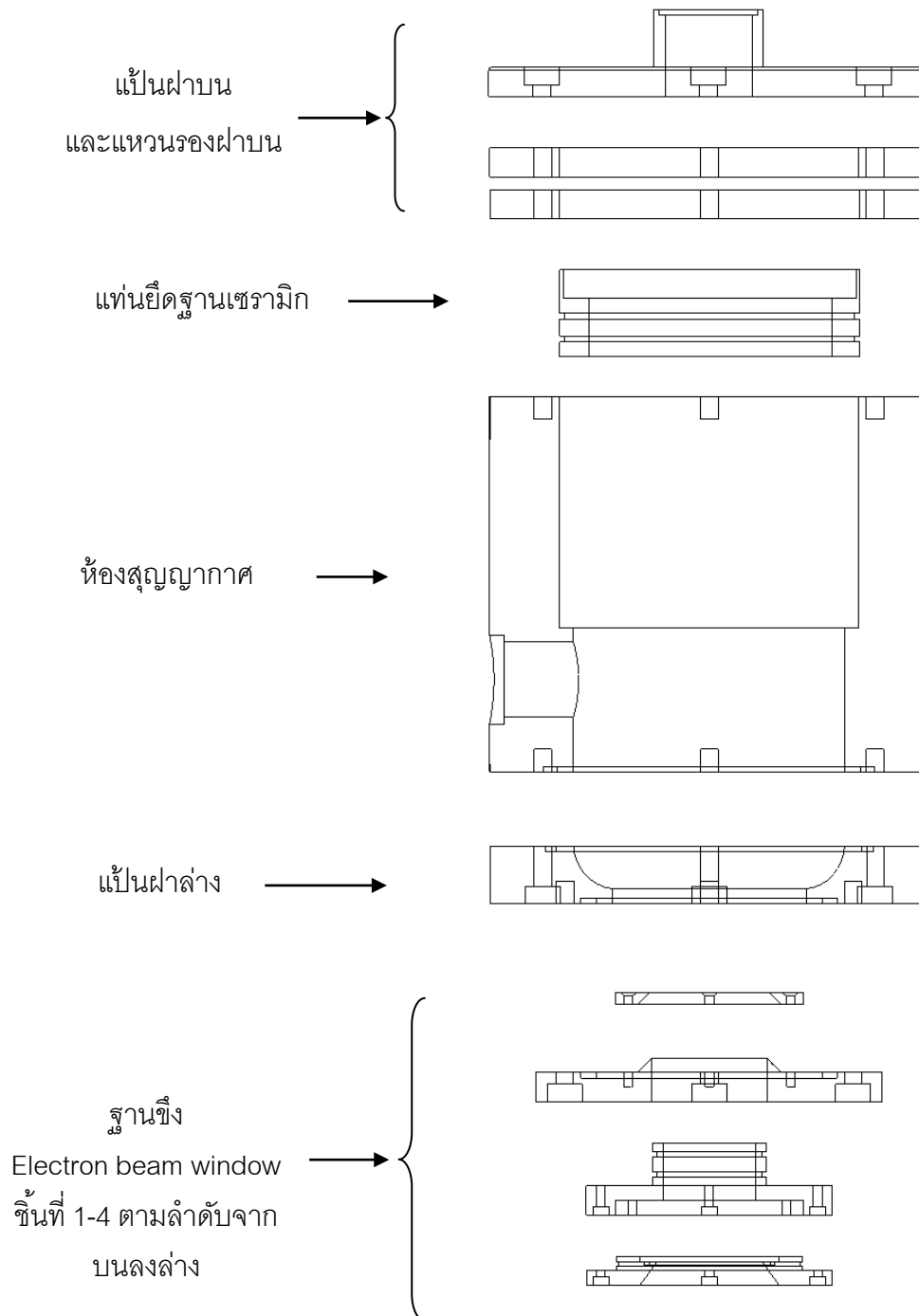
ส่วนของคอลัมน์สุญญากาศสำหรับเร่งอิเล็คตรอนจะเกี่ยวข้องกับส่วนกำเนิดอิเล็คตรอน และส่วนหน้าต่างทางออกของลำอิเล็คตรอน การออกแบบจึงต้องอ้างอิงระยะและขนาดของ ชิ้นส่วนทั้งสองรวมถึงการออกแบบคอลัมน์สุญญากาศมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ต้องมีขนาดเล็กกะทัดรัด
- ง่ายต่อการติดตั้งและถอดบำรุงรักษา
- สามารถถอดเปลี่ยนได้รวดเร็วและปรับระดับท่อไฟกล่าได้สะดวก
- สามารถเปลี่ยนหน้าต่างทางออกลำอิเล็คตรอนเมื่อขาดหรือทะลุได้ง่าย

ดังนั้นจึงออกแบบให้คอลัมน์สุญญากาศนี้ถอดประกอบได้ 3 ชั้น ได้แก่ ชิ้นส่วนฐานยึด ส่วนกำเนิดอิเล็คตรอน ชิ้นส่วนห้องสุญญากาศและชิ้นส่วนแป้นช่องหน้าต่างทางออกลำ อิเล็คตรอน ดังแบบประกอบในภาพที่ 3.9

ได้เลือกเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (คุณสมบัติแสดงดังภาคผนวก ข.) มาใช้กลึงขึ้นรูปเป็น ชิ้นส่วนคอลัมน์สุญญากาศ เนื่องจากไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงสามารถทนอุณหภูมิและความ เป็นสุญญากาศระดับสูงได้ การกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในได้จากการประเมินระยะการ อาร์กที่คัสคาไฟฟ้าสูง 100 kV ในภาพที่ 2.14 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถ้วยเซรามิกที่เป็นฐานยึดได้ ปลอดภัย การยึดประสานชิ้นส่วนที่เป็นเซรามิกกับโลหะใช้กาวอีพ็อกซีสำหรับสุญญากาศ (Vacuum glue) และฉนวนที่หล่อหุ้มข้อต่อไฟฟ้าบริเวณฐานยึดส่วนกำเนิดอิเล็คตรอนใช้กาวซิลิโคนของ

บริษัท Dow corning ซึ่งเป็นกาวซิลิโคนแบบ RTV เบอร์ 3112 (คุณสมบัติแสดงดังภาคผนวก ข.) ส่วนปะเก็นโอริงส่วนเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนถอดประกอบใช้ชนิดไวตอล (Vital)



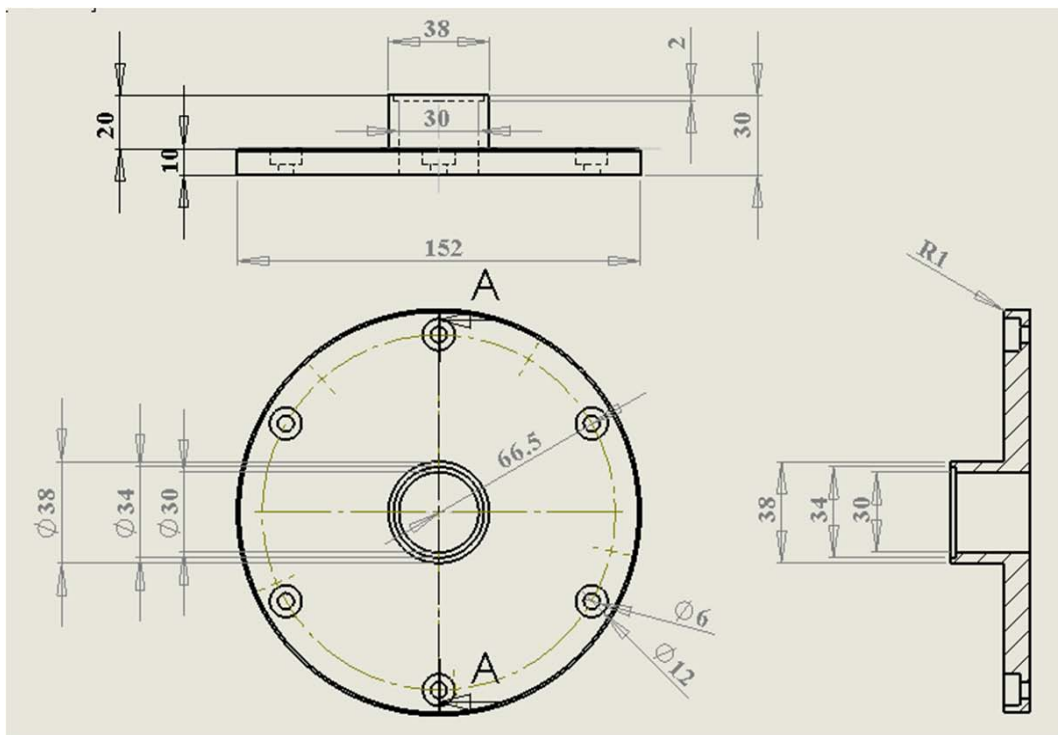
ภาพที่ 3.9 ส่วนประกอบของคอลัมน์สุญญากาศสำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน

### 3.3.1 ชั้นฐานยึดส่วนกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์

ชั้นฐานยึดส่วนกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนบนของคอลัมน์สุญญากาศเป็น 3 ชั้น เป็นฝาส่วนบน แหวนรองฝาและแท่นยึดฐานเซรามิก มีรายละเอียดการออกแบบและสร้างดังนี้

3.3.1.1 เป็นฝาส่วนบนกลึงขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกตันหนา 30 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 mm กลึงปาดเป็นแป้นหนา 10 mm เว้นเนื้อความหนาตรงกลางไว้ เป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm สูงจากผิวแป้นฝาขึ้นมา 20 mm เพื่อเจาะช่องร้อยสายไฟฟ้าศักดาสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm จะเหลือความหนาประมาณ 4 mm สำหรับทำเกลียวนอกทรงกระบอกเพื่อครอบฝาล็อกสายไฟฟ้าศักดาสูงไม่ให้เคลื่อนตัว ที่ขอบแป้นเจาะรูสำหรับสลักเกลียวขนาด 6 mm แบบฝังหัวสลักเกลียวจำนวน 6 ตัว โดยรอบเพื่อยึดกับหน้าแป้นด้านบนของห้องสุญญากาศ ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแป้นฝาส่วนบนแสดงดังภาพที่ 3.10 และชิ้นงานแป้นฝายบนที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.11

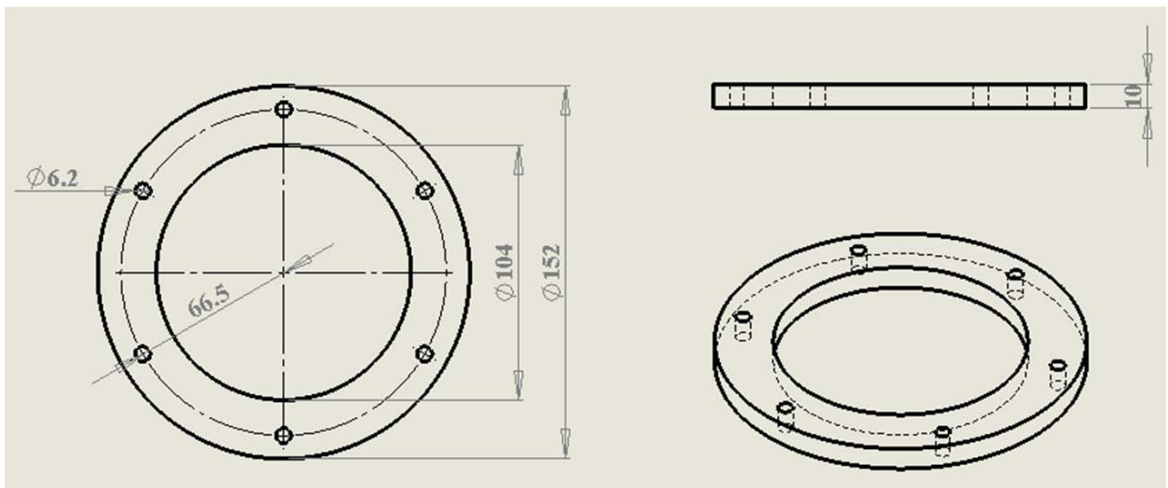
3.3.1.2 แหวนรองฝายบนใช้สำหรับเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวต่อไฟฟ้าศักดาสูงกับแป้นฝายบนให้ห่างกันมากพอที่จะไม่เกิดการอาร์กจากไฟฟ้าศักดาสูง โดยแหวนรองฝายบนวัสดุที่ใช้กลึงขึ้นรูปคือ Polyacetel (POM) สีขาว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขอบบนของห้องสุญญากาศดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.10 แบบขนาดและสัดส่วนแป้นฝาส่วนบนที่ออกแบบ

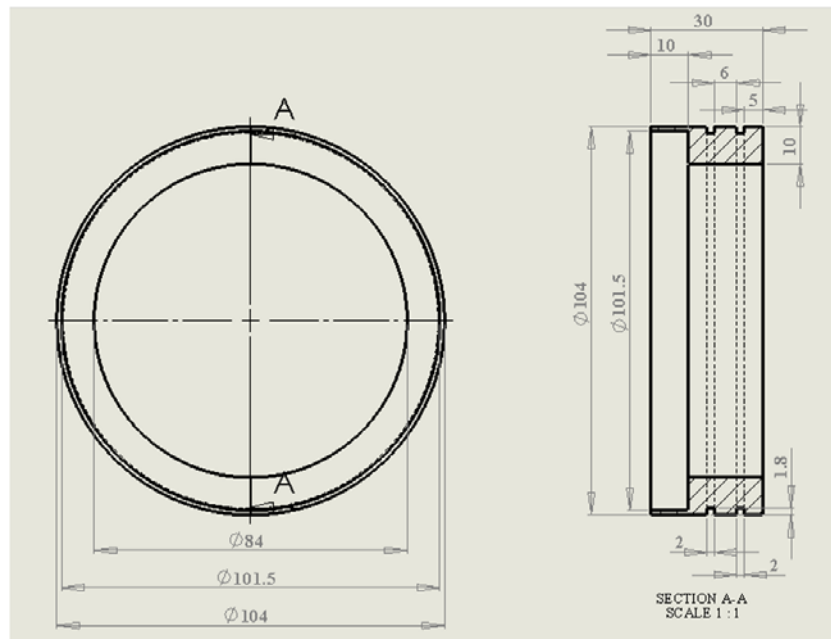


ภาพที่ 3.11 แป้นฝาส่วนบนพร้อมฝาครอบที่สร้างขึ้น

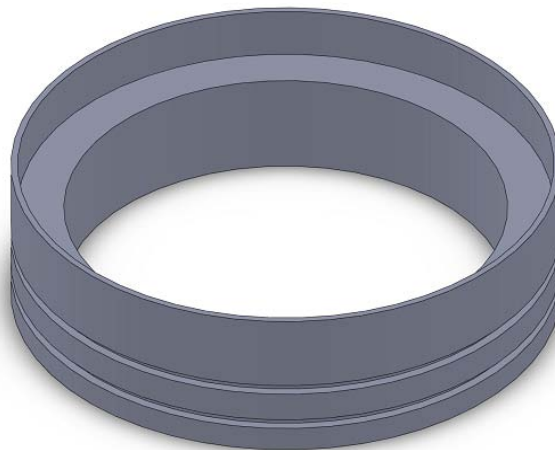


ภาพที่ 3.12 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแหวนรองฝาบาน

3.3.1.3 แผ่นยึดฐานเซรามิกสร้างขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกตันให้มีลักษณะเป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 104 mm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 84 mm จากนั้นปาดเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมออกในลักษณะตบารองรับฐานถ้วยเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.5 mm ลึก 10 mm การยึดแผ่นกับฐานเซรามิกใช้กาวอีพ็อกซีและเทซิลิโคนฉนวนกันอาร์กเต็มเบ้าในส่วนผิวด้านนอกของแผ่นยึดฐานเซรามิกจะตบ่าเป็นร่องโอบรอบจำนวนสองร่อง ลึก 1.8 mm กว้าง 2 mm ขนาดและสัดส่วนของแผ่นยึดฐานเซรามิกแสดงดังภาพที่ 3.13 และชิ้นงานแผ่นยึดฐานเซรามิกที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.13 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแท่นยึดฐานเซรามิก

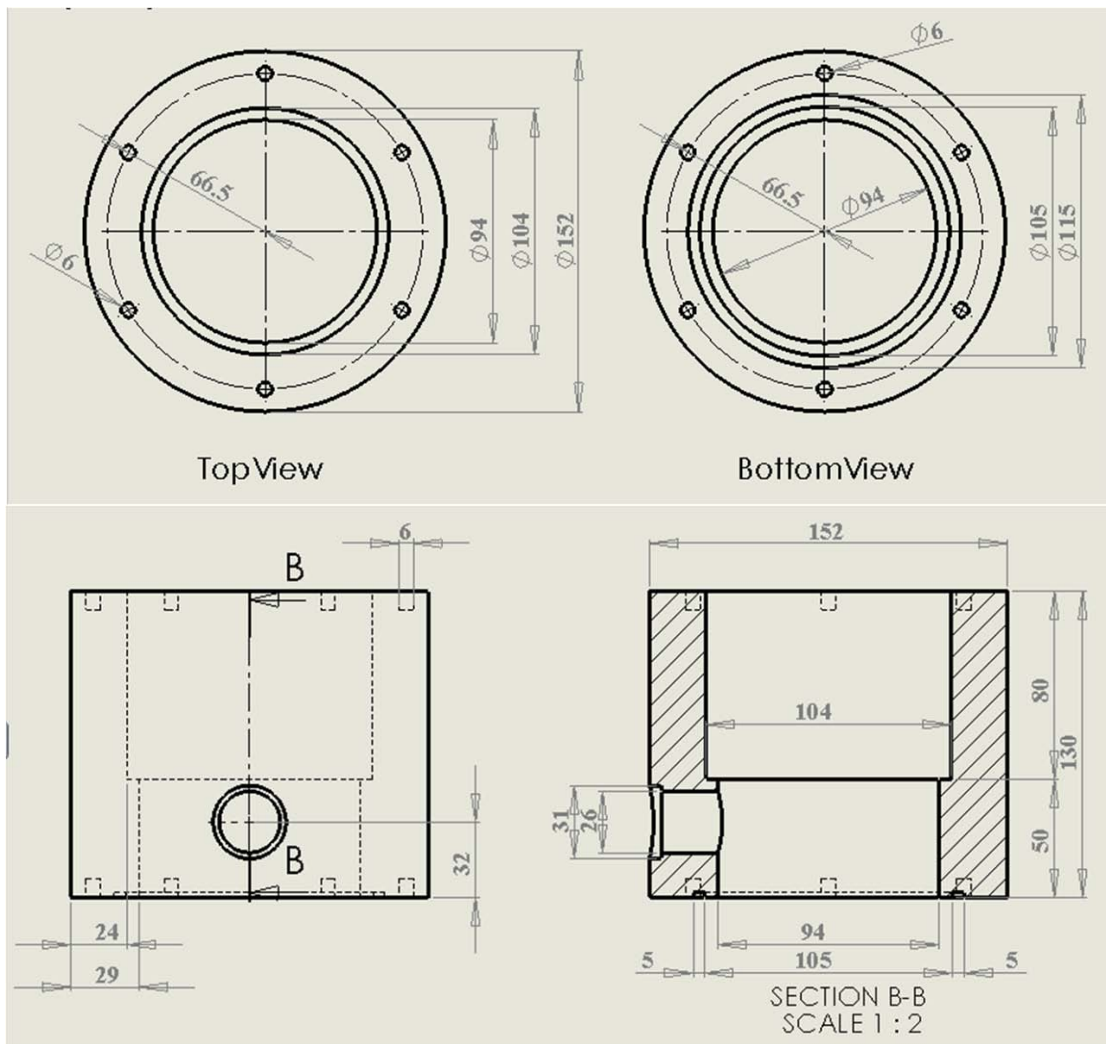


ภาพที่ 3.14 ชิ้นงานแท่นยึดฐานเซรามิกที่สร้างขึ้น

### 3.3.2 ชิ้นส่วนห้องสุญญากาศ

ชิ้นส่วนห้องสุญญากาศค้ำขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 mm สูง 130 mm กว้านเนื้อตรงกลางออกเป็นช่องทะลุตลอดความสูงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 94 มิลลิเมตร ด้านบนของทรงกระบอกกว้านช่องให้กว้างขึ้นเป็น 104 mm ลึก 80 mm ที่เหลือตกป่าไว้สูง 50 mm หน้าแปลนด้านบนเจาะรูสำหรับทำเกลียวยึดสลักเกลียวขนาด 6 mm จำนวน 6 ตัว โดยรอบเพื่อยึดกับแป้นฝาบนของส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน ด้านข้างของห้องสุญญากาศเจาะช่องสำหรับสูบลูกอากาศออกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm ด้านล่างของ

ห้องสุญญากาศเซาะร่องสำหรับวางโริงเพื่อป้องกันสุญญากาศรั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 105 mm หนา 5 mm สำหรับยึดแป้นฝาล่างของส่วนหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน โดยเจาะรูทำเกลียวขนาด 6 mm จำนวน 6 ตัวโดยรอบ ซึ่งขนาดและสัดส่วนต่างๆ ที่ออกแบบแสดงดังภาพที่ 3.15 ช่องท่อสำหรับสูบอากาศด้านข้างเชื่อมด้วยท่อสูบอากาศที่มีหน้าแป้นมาตรฐาน DN KF25 เพื่อต่อเชื่อมกับท่อสูบอากาศของระบบสุญญากาศดังแสดงในภาพที่ 3.16 และชิ้นงานที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.15 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของห้องสุญญากาศ



ภาพที่ 3.16 ท่อช่องสูบลู่วสุญญากาศของห้องสุญญากาศขนาดเป็นมาตรฐาน DN KF25



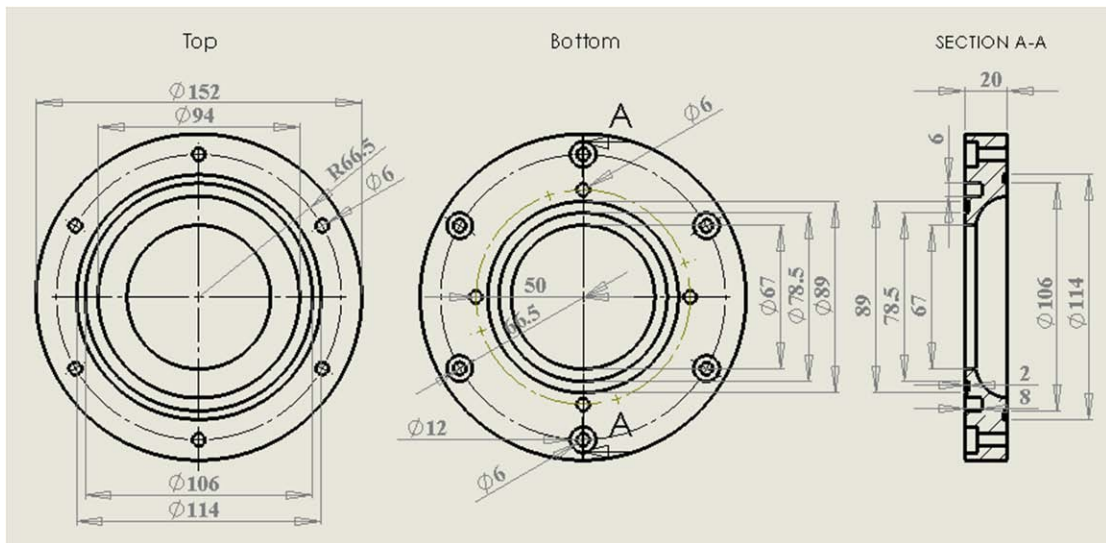
ภาพที่ 3.17 ชิ้นส่วนห้องสุญญากาศที่สร้างขึ้น

### 3.3.3 ชิ้นส่วนแป้นช่องหน้าต่างออกลำอิเล็กตรอน

ชิ้นส่วนแป้นช่องหน้าต่างออกลำอิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 ชิ้นส่วน คือ แป้นฝาล่าง และชุดชิ้นส่วนฐานสำหรับซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่าง มีรายละเอียดการออกแบบและสร้างดังนี้

3.3.3.1 แป้นฝาล่างกลึงขึ้นรูปจากแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 152 mm สูง 20 mm คิว้นช่องทะลุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 67 mm จากขอบเส้นผ่านศูนย์กลางในคว้านเนื้อเหล็กออกมีลักษณะเหมือนถ้วย โดยที่ปากขอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 89 mm หน้าแป้นด้านบนเจาะร่องสำหรับวางโอริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 105 mm หนา 5 mm เจาะรูร้อยสลักเกลียวขนาด 6 mm 6 ตัว โดยรอบเพื่อยึดกับแป้นด้านล่างของห้องสุญญากาศ บริเวณหน้าแป้นด้านล่างของฝาล่างนี้ต้องเจาะร่องสำหรับวางโอริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 79 mm หนา 5 mm อีกวงหนึ่งเพื่อรับปะเก็นสุญญากาศขณะยึดกับชุดฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างที่ยึดติดด้วยสลักเกลียวขนาด 6 mm จำนวน 4 ตัว โดยรอบ ซึ่งขนาดและสัดส่วนต่างๆ ที่ออกแบบแสดงดังภาพที่ 3.18 และชิ้นงานที่สร้างขึ้นปรากฏในภาพที่ 3.19





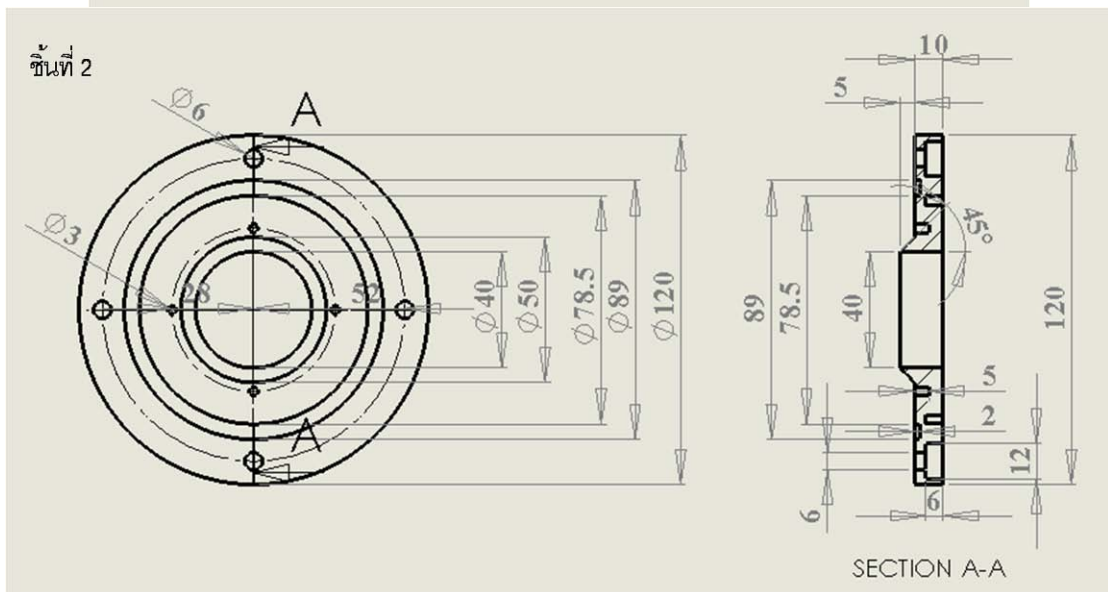
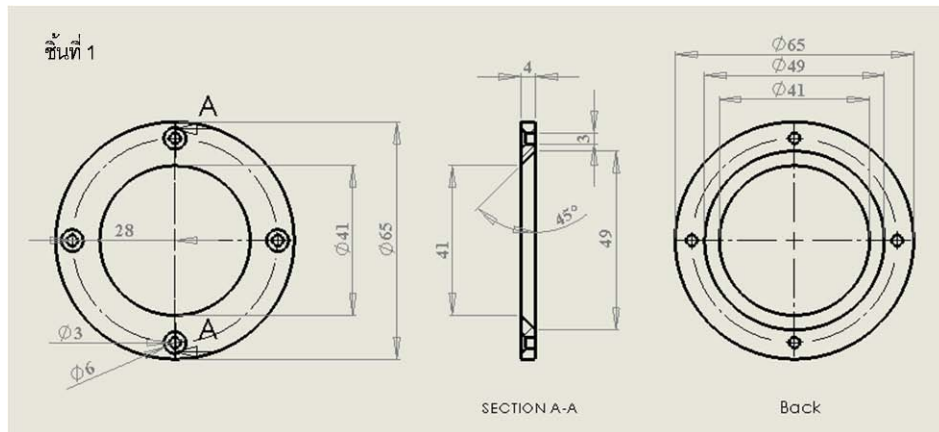
ภาพที่ 3.18 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของแป้นฝาล่าง



ภาพที่ 3.19 ชิ้นส่วนแป้นฝาล่างที่สร้างขึ้น

3.3.3.2 ชุดฐานซึ่งหน้าต่างชุดบนแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อย 4 ชิ้น โดยส่วนของชิ้นที่ 1 และ 2 ส่วนนี้มีลักษณะเป็นวงแหวน 2 วงประกบซ้อนกันเพื่อกดอัดพอยล์หน้าต่างทางออกกล้า อิเล็กตรอน (ไทเทเนียมพอยล์หรืออะลูมิเนียมพอยล์) ลักษณะคล้ายการบีบของสติงปักผ้า โดยที่

หน้าสัมผัสของวงแหวนทั้งสองทำมุมเฉียง 45 องศา ซึ่งกันและกัน การบีบกดใช้สกรูขนาด 3 mm จำนวน 4 ตัว วงแหวนด้านบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 65 mm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 41 mm หนา 4 mm ส่วนวงแหวนวงล่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 120 mm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 40 mm หนา 10 mm ส่วนสัมผัสกับวงแหวนด้านบนมีความหนาเพิ่มขึ้นอีก 5 mm กลึงลาดลงและทำมุม 45 องศา ซึ่งขนาดและสัดส่วนต่างๆ ที่ออกแบบขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.20 เมื่อซึ่งแผ่นฟอยล์และชั้นสกรูแน่นมากขึ้นแผ่นฟอยล์จะถูกดึงให้ตึงมากขึ้นดังภาพที่ 3.21 หน้าต่างนี้เป็นส่วนสุดท้ายที่ต้องประกอบกับฝาล่างของห้องสุญญากาศด้วยสลักเกลียวขนาด 6 mm จำนวน 4 ตัว ระหว่างหน้าแป้นเพื่อป้องกันไม่ไห้ระบบสุญญากาศรั่ว ที่หน้าแป้นด้านบนของวงแหวนวงล่างจึงต้องเจาะร่องสำหรับวางโอริงขนาด 79 mm หนา 5 mm วงแหวนฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.20 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของชุดฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างชุดบน

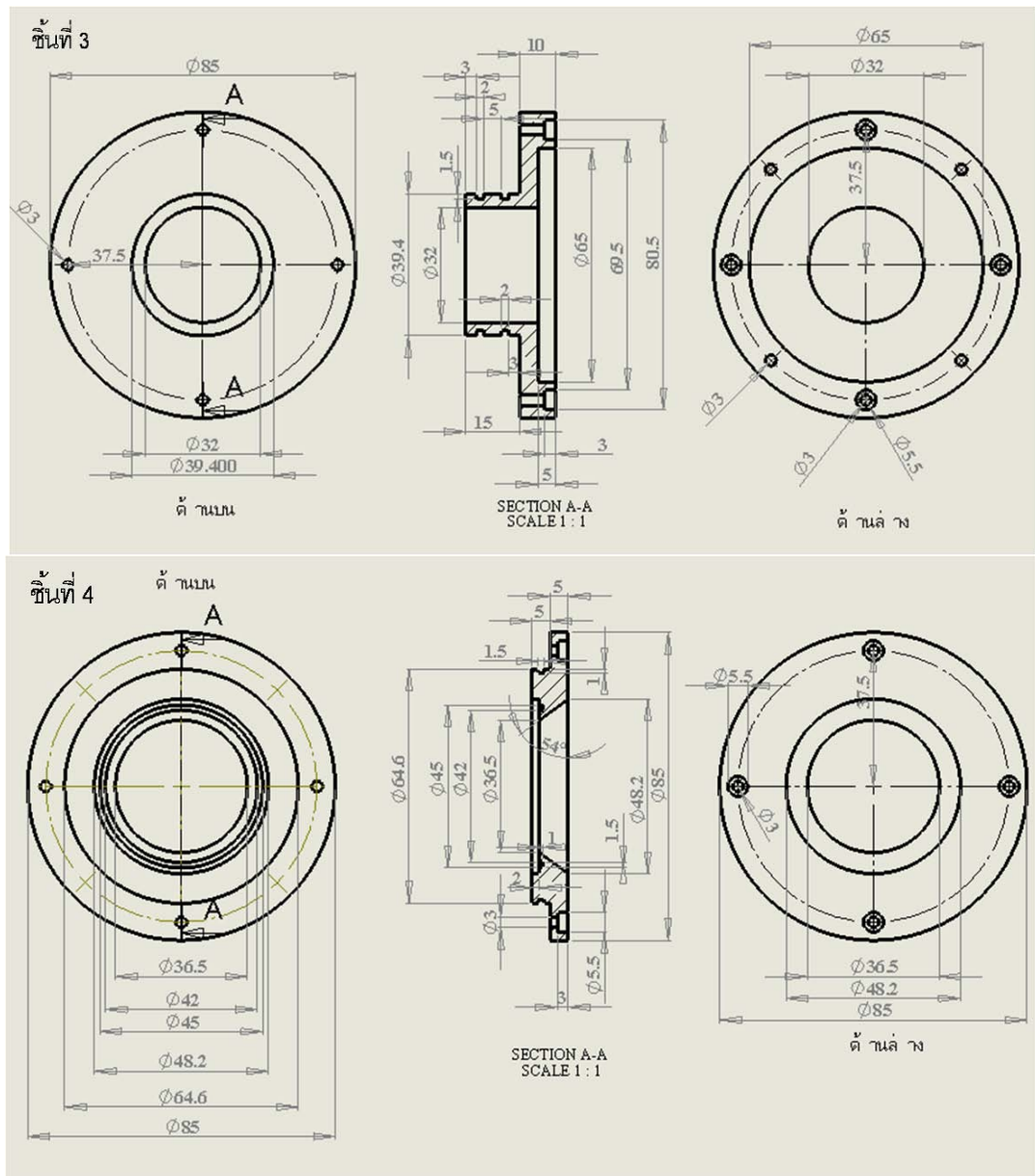


ภาพที่ 3.21 แผ่นฟอยล์ที่ถูกขึงตึง



ภาพที่ 3.22 วงแหวนฐานซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างชุดบนที่สร้างขึ้น

ส่วนประกอบเสริมอีกสองชั้น คือ ชั้นที่ 3 และ 4 เป็นชุดฐานยึดหน้าต่างชุดล่างในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างท่อไฟก๊สและแผ่นฟอยล์หน้าต่างของชุดฐานชุดแรก ห่างกันไม่เพียงพอ สำหรับไฟฟ้าศักดาสูงขนาด 100 kV อาจเกิดการอาร์ค ดังนั้นจึงเพิ่มขึ้นส่วนของชุดฐานยึดแผ่นฟอยล์หน้าต่างให้มีระยะห่างจากส่วนกำเนิดอิเล็กตรอนมากขึ้น โดยชุดฐานสองชั้นนี้จะสวมเข้ากับส่วนล่างของฐานซึ่งแผ่นฟอยล์ชุดแรกได้พอดีและรักษาสภาพสุญญากาศด้วยไอรังจำนวนสองเส้นที่บริเวณผิวสัมผัสนอกของฐานยึดชั้นที่ 3 ด้านล่างของฐานยึดชั้นที่ 3 มีช่องสำหรับสวมชั้นที่ 4 และตบ่าล็อกพอที่จะใส่ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับรองรับแผ่นฟอยล์ไททาเนียม ฐานยึดชั้นที่ 4 รักษาสภาพสุญญากาศด้วยไอรังที่บริเวณผิวสัมผัสขณะสวม พร้อมกับนี้เป็นบนเซาะร่องไอรังสำหรับรักษาสภาพสุญญากาศของผิวสัมผัสวงแหวนทองแดงที่ซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่าง โดยขนาดและสัดส่วนของชุดฐานยึดแผ่นฟอยล์ดังภาพที่ 3.23 และแสดงชุดชิ้นส่วนฐานยึดหน้าต่างชุดล่างที่สร้างขึ้นและประกอบเข้าด้วยกันในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.23 ขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของฐานซึ่งแผ่นพอยล์ชุดล่าง



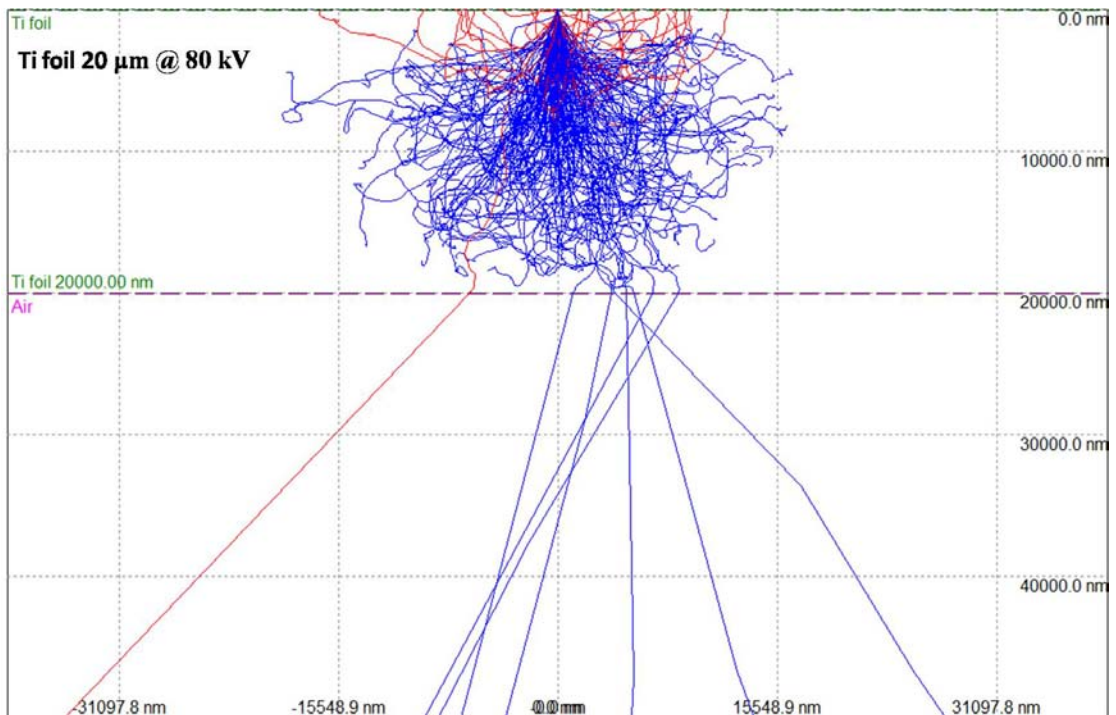
ภาพที่ 3.24 ชั้นส่วนฐานซึ่งแผ่นพอยล์หน้าต่างชุดล่างที่สร้างขึ้น

### 3.4 การออกแบบและเลือกใช้น้ำต่างลำอิเล็กตรอน

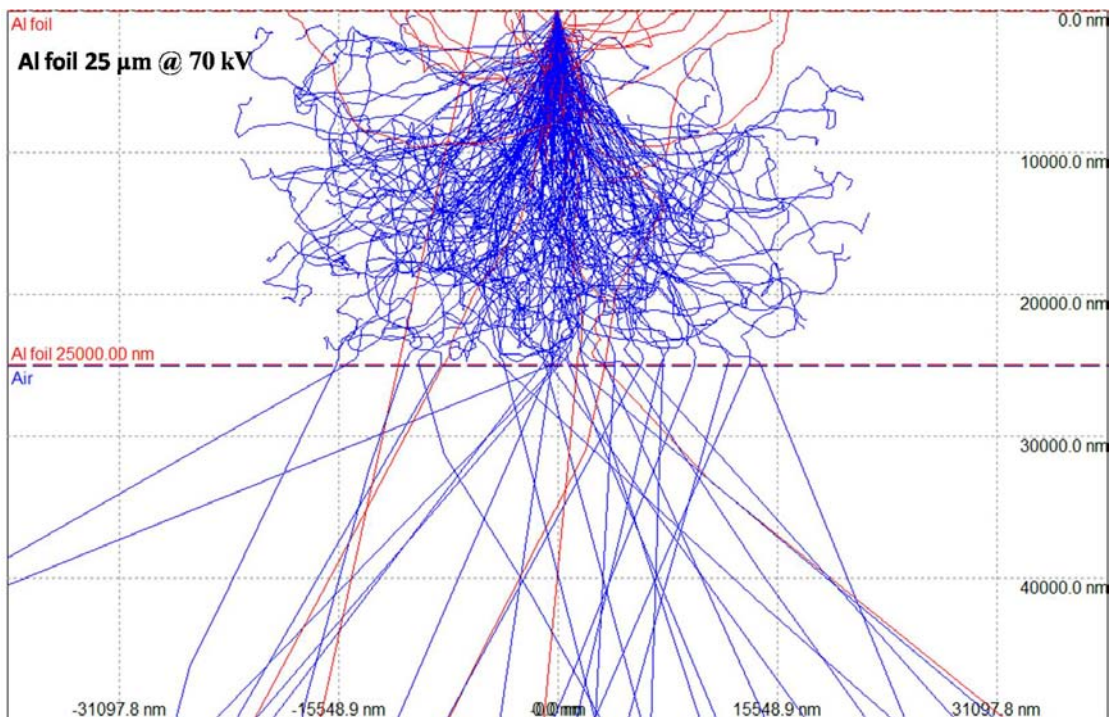
จากข้อมูลวัสดุที่ใช้ทำหน้าต่างลำอิเล็กตรอนในหัวข้อที่ 2.6 สามารถเลือกวัสดุได้ 2 ชนิด คือฟอยล์ไทเทเนียมและฟอยล์อะลูมิเนียม ซึ่งฟอยล์ไทเทเนียมมีราคาสูง ขณะที่ฟอยล์อะลูมิเนียม ราคาถูกหาได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้วัสดุทั้ง 2 ชนิด โดยในการกำหนดความหนาของแผ่นฟอยล์สามารถคำนวณได้จากการหาค่าพิสัยของอิเล็กตรอนในสสารต่างๆ ดังสมการที่ 2.19 ซึ่งจะได้พิสัยออกมาในหน่วย  $\text{mg/cm}^2$  แปลงหน่วยให้อยู่ในรูป  $\text{g/cm}^2$  แล้วนำไปหารด้วยค่าความหนาแน่นของวัสดุที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่าน ในที่นี้คือไทเทเนียมฟอยล์และอะลูมิเนียมฟอยล์ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $4.506$  และ  $2.7 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ ความหนาแผ่นฟอยล์ที่มีสามารถหาได้คือ ฟอยล์ไทเทเนียม  $20 \text{ }\mu\text{m}$  และฟอยล์อะลูมิเนียม  $25 \text{ }\mu\text{m}$  ดังนั้นเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจะได้

- พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ในเนื้อฟอยล์ไทเทเนียมเป็นระยะ  $20 \text{ }\mu\text{m}$  คือ  $79 \text{ keV}$
- พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ในเนื้อฟอยล์อะลูมิเนียมเป็นระยะ  $25 \text{ }\mu\text{m}$  คือ  $67 \text{ keV}$

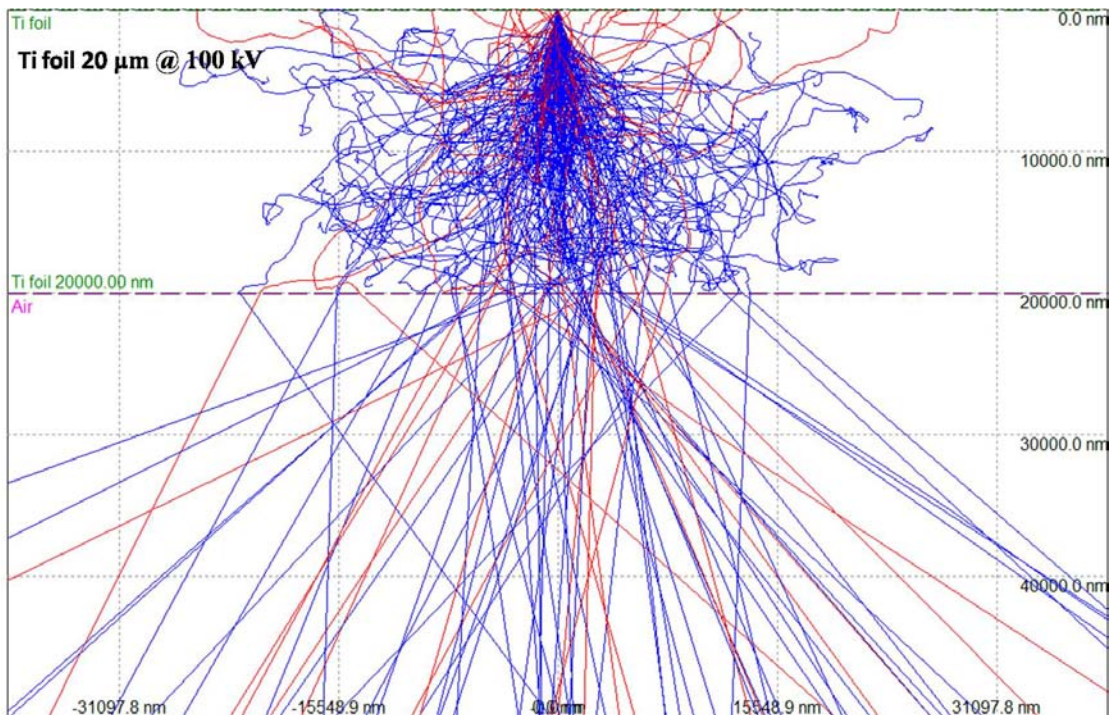
นอกจากนี้ยังสามารถอาศัยการจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่พลังงานต่างๆ เพื่อหาพิสัยหรือความหนาที่ส่งผ่านได้โดยสูญเสียน้อย การจำลองใช้โปรแกรม CASINO เวอร์ชัน 2.42 โปรแกรมนี้สามารถกำหนดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและความหนาของวัสดุที่เคลื่อนที่ผ่านได้ การจำลองได้เลือกความหนาแผ่นฟอยล์ที่มีสามารถหาได้คือ ฟอยล์ไทเทเนียม  $20 \text{ }\mu\text{m}$  และฟอยล์อะลูมิเนียม  $25 \text{ }\mu\text{m}$  ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่  $80 \text{ keV}$  สำหรับฟอยล์ไทเทเนียม และ  $70 \text{ keV}$  สำหรับฟอยล์ไทเทเนียม ซึ่งจากผลการคำนวณด้านบนจะต้องมีอิเล็กตรอนบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟอยล์ได้ ผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 3.25-3.26 ผลการจำลองที่ระดับพลังงาน  $100 \text{ keV}$  ของทั้งสองวัสดุแสดงดังภาพที่ 3.27-3.28 ซึ่งจะเห็นอิเล็กตรอนเคลื่อนที่หลุดจากความหนาของฟอยล์อย่างชัดเจน



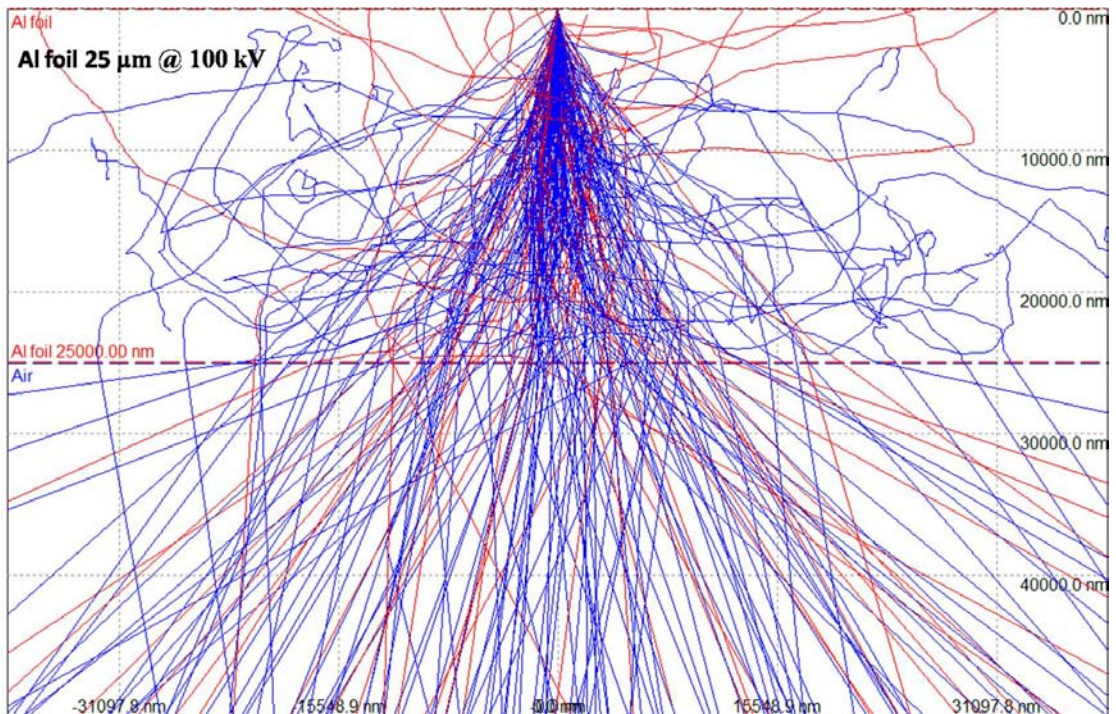
ภาพที่ 3.25 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อประเมินพิสัยในแผ่นฟอยล์ไทเทเนียม 20  $\mu\text{m}$  ที่อิเล็กตรอนพลังงาน 80 keV



ภาพที่ 3.26 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อประเมินพิสัยในแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมหนา 25  $\mu\text{m}$  ที่อิเล็กตรอนพลังงาน 70 keV



ภาพที่ 3.27 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อประเมินพิสัยในแผ่นฟอยล์ไทเทเนียม 20  $\mu\text{m}$  ที่อิเล็กตรอนพลังงาน 100 keV



ภาพที่ 3.28 การจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อประเมินพิสัยในแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมหนา 25  $\mu\text{m}$  ที่อิเล็กตรอนพลังงาน 100 keV

จากผลการจำลองพบว่าแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมความหนา 25 ไมโครเมตร เริ่มส่งผ่านลำอิเล็กตรอนพลังงานที่พลังงาน 70 keV ขึ้นไป ส่วนแผ่นฟอยล์ไทเทเนียมความหนา 20 ไมโครเมตร เริ่มส่งผ่านลำอิเล็กตรอนพลังงานที่พลังงาน 80 keV ขึ้นไป เป็นไปเพื่อการการคำนวณพิสัยตามสมการข้างต้น เนื่องจากแผ่นฟอยล์ที่นำมาทำหน้าที่ต่างทางออกลำอิเล็กตรอนบางมากจำเป็นต้องซึ่งบนตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมความแข็งแรงให้ทนแรงระดับสุญญากาศได้ โดยพื้นที่ของตะแกรงนี้จะลดทอนพื้นที่ของหน้าต่างลำอิเล็กตรอนลงเหลือ 57.1% ของพื้นที่ซึ่งฟอยล์ทั้งหมด การซึ่งแผ่นฟอยล์หน้าต่างลำอิเล็กตรอนจะซึ่งบนวงแหวนทองแดงที่ด้านหนึ่งเซาะร่องสำหรับติดฟอยล์ไว้ลึก 1 mm และนำไปวางในชุดฐานซึ่งขึ้นที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 3.29 และยึดประกบกับชุดฐานซึ่งขึ้นที่ 3 ด้วยสกรู เมื่อประกอบชุดฐานซึ่งกับชิ้นส่วนห้องสุญญากาศเรียบร้อยแล้วจะเห็นการวางตะแกรงบนฟอยล์ดังภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.29 ฟอยล์อะลูมิเนียมซึ่งบนวงแหวนทองแดงและนำไปวางในชุดฐานยึดขึ้นล่าง

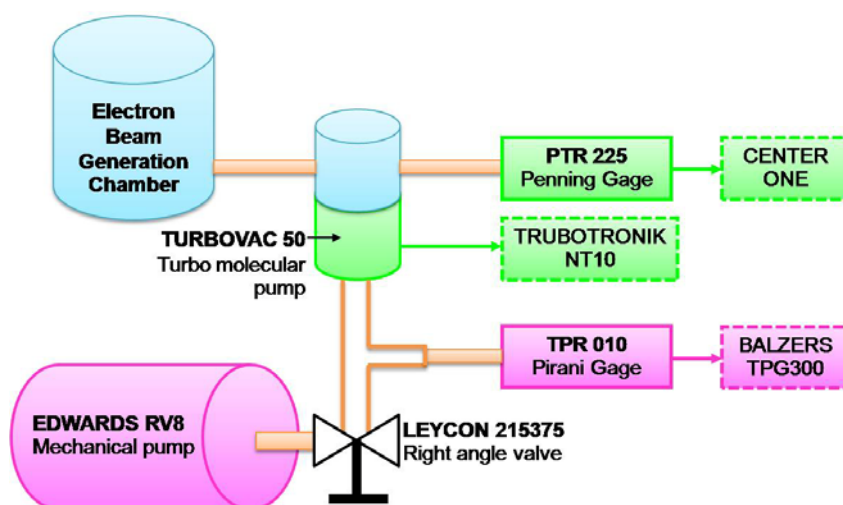




ภาพที่ 3.30 อะลูมิเนียมฟอยล์ประกบกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมและประกอบใส่ห้องสุญญากาศ

### 3.5 การออกแบบระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาพบว่าระดับสุญญากาศของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน กำลังต่ำ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับ  $10^{-4}$ - $10^{-7}$  Torr [17] ในงานวิจัยนี้ประเมิน ความดันสุญญากาศที่ระดับ  $10^{-6}$  Torr ระบบสุญญากาศเลือกใช้เครื่องสูบลสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary pump) ของบริษัท Edwards รุ่น RV8 ซึ่งมีอัตราสูบลอากาศ 100 ลิตรต่อนาที สามารถลดความดันสุญญากาศลงได้ประมาณ  $10^{-2}$  Torr ทำงานร่วมกับเครื่องสูบลสุญญากาศความดันสูงแบบเทอร์โบโมเลกุล (Turbo molecular pump) ของบริษัท LEYBOLD VAKUUM GMBH รุ่น TURBOVAC 50 มีอัตราสูบลอากาศ 50 ลิตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 72000 รอบต่อนาที ไม่ต้องการระบบระบายความร้อน มีอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน พร้อมระบบวัดความดันสุญญากาศและระบบวาล์ว ในการสร้างสภาพความดันสุญญากาศที่ระดับ  $10^{-6}$  Torr ให้กับคอลัมน์สุญญากาศของส่วนเร่งลำอิเล็กตรอน โดยระบบสุญญากาศที่ออกแบบขึ้นแสดงดังแผนภาพในภาพที่ 3.31



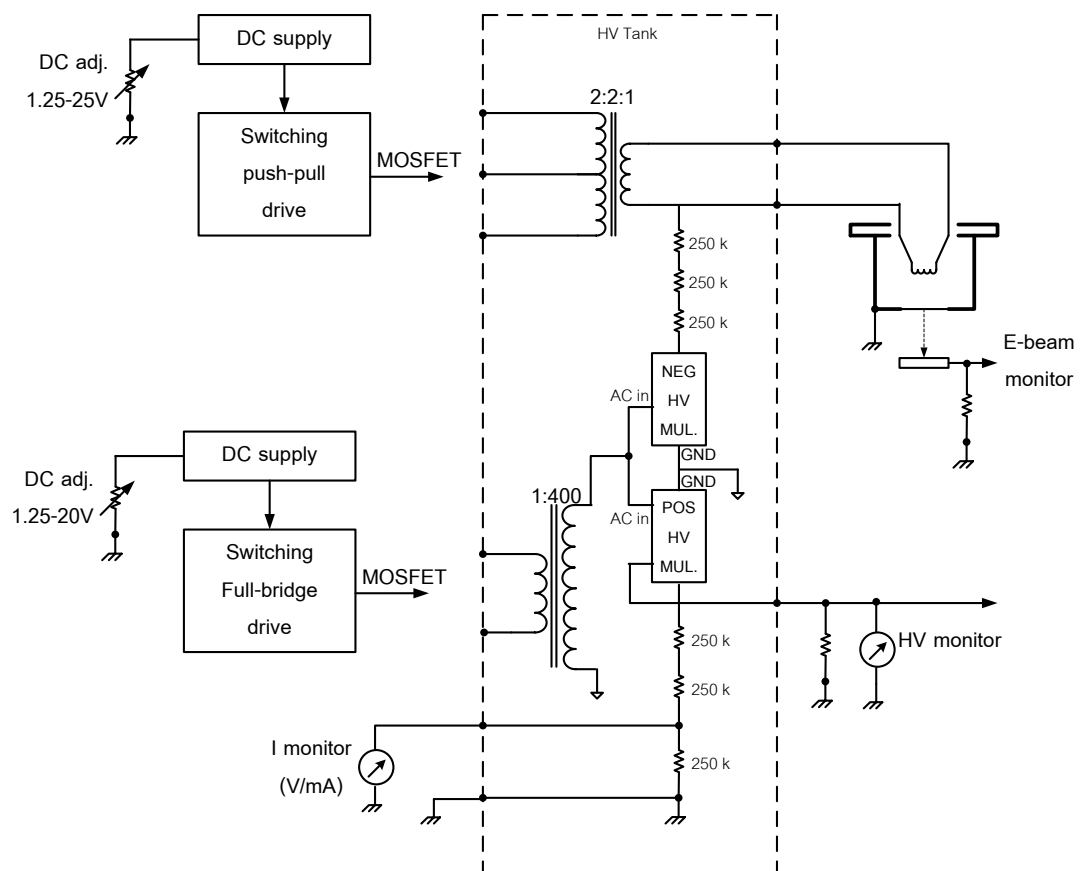
ภาพที่ 3.31 แผนภาพระบบสุบลสุญญากาศสำหรับส่วนเร่งลำอิเล็กตรอน

### 3.6 การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

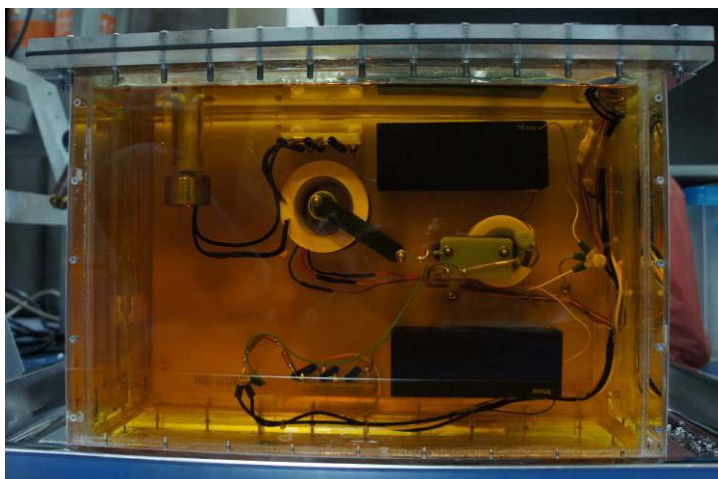
การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนนั้นประกอบไปด้วยสองส่วนคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้หลอด และแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าของทั้งสองส่วนจะต้องแช่อยู่ในถังน้ำมันเพื่อให้น้ำมันเป็นฉนวนให้กับไฟฟ้าศักดาสูง 100 kV ที่กำเนิดขึ้น โดยแผนภาพระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนแสดงดังภาพที่ 3.32 ถังน้ำมันที่บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าของทั้งสองส่วนแสดงในภาพที่ 3.33

#### 3.6.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้หลอด

แหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้หลอดออกแบบให้สามารถปรับศักดาไฟฟ้าได้ระหว่าง 0-25 V จ่ายกระแสได้สูงสุด 2 A สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าเผาให้ความร้อนไส้ทั้งสแตนในส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอนให้ปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ วงจรที่ออกแบบขึ้นเป็นระบบกำเนิดไฟฟ้าด้วยเทคนิคคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงแบบพุก - พูล ประกอบด้วยวงจรหลัก 2 วงจร คือ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำและวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าขับใช้หลอด มีรายละเอียดดังนี้



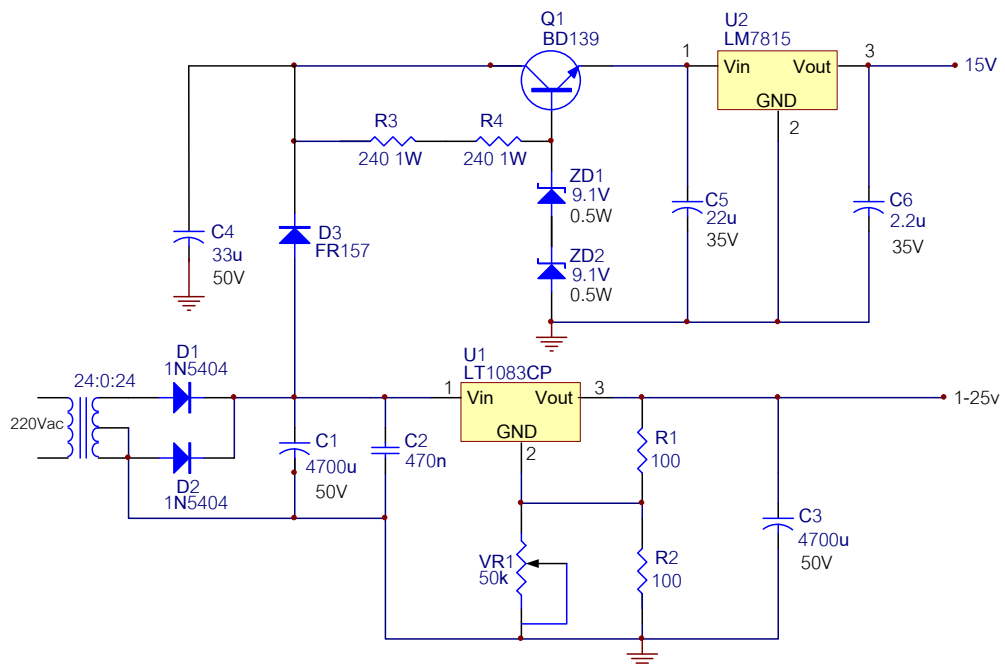
ภาพที่ 3.32 แผนภาพระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน



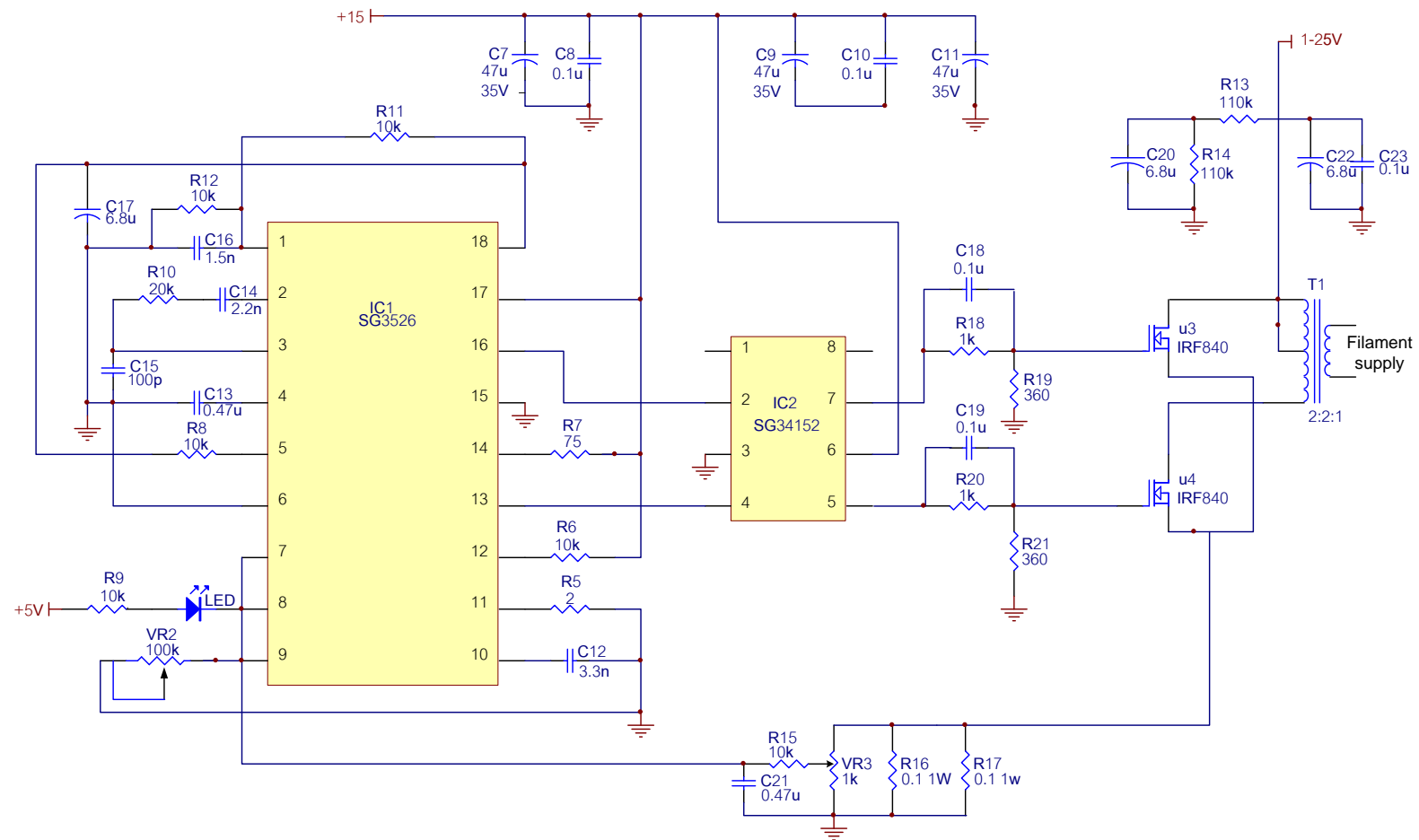
ภาพที่ 3.33 ถังน้ำมันที่บรรจุหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

- วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้้าค้กดากระแสตรงค้กดาต่ำที่ออกแบบดังภาพที่ 3.34 วงจรจะกำเนิดไฟฟ้้ากระแสตรงจากการแปลงค้กดาไฟฟ้้า  $220\text{ V}_{ac}$  ด้วยหม้อแปลงแบบมีแทบกลางขนาด  $24\text{ V}$  ผ่านการเรียงกระแสและกรองกระแสไฟฟ้้าได้ค้กดาไฟฟ้้ากระแสตรงทางออก  $34\text{ V}_{dc}$  จากนั้นแบ่งจ่ายไป 2 ส่วน กล่าวคือ ส่วนแรกป้อนเข้าวงจรควบคุมค้กดาส่วนหน้า (Pre-regulator) ได้ค้กดาไฟฟ้้า  $18\text{ V}$  ด้วยซีเนอร์ไดโอดก่อนป้อนเข้าไอซีเรกกูเลเตอร์แบบ 3 ขา เบอร์ LM7815 กำเนิดค้กดาคงที่ขนาด  $15\text{ V}$  สำหรับเป็นไฟฟ้้าเลี้ยงวงจร ส่วนที่สองป้อนเข้าไอซีควบคุมค้กดาแบบปรับค่าได้เบอร์ LT1083 กำเนิดค้กดาปรับค่าได้  $1-31\text{ V}$  สำหรับเลี้ยงวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้้าขับไล้หลอดในการทำงานปกติจะปรับค่าค้กดาเลี้ยงวงจรไว้ที่  $30\text{ V}$

- วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้้าขับไล้หลอด ที่ออกแบบแสดงในภาพที่ 3.3 5 เป็นวงจรสวิตซิงชนิดพุก-พูลสำหรับขับหม้อแปลงไฟฟ้้าที่จ่ายให้ไล้หลอด ซึ่งเป็นหม้อแปลงความถี่สูงแบบ Step down ที่มีอัตรารอบ 2:1 มีการจัดการฉนวนเพื่อให้ทนค้กดาไฟฟ้้าแรงสูงสุด  $100\text{ kV}$  แสดงดังภาพที่ 3.36 การควบคุมสัญญาณขับแบบสวิตเลือกใ้ไอซีเบอร์ SG3526 กำเนิดสัญญาณความถี่สูงและส่งสัญญาณขับทรานซิสเตอร์ กำลังแบบมอสเฟต (MOSFET) เบอร์ IRF840 ที่จัดวงจรแบบพุก-พูลผ่านไอซีขับสัญญาณเบอร์ SG34152 การควบคุมค้กดาคงที่เป็นแบบปรับความกว้างสัญญาณพัลส์จากผลต่างสัญญาณป้อนกลับ สามารถปรับค่าค้กดาไฟฟ้้าได้ระหว่าง  $0 - 25\text{ V}$  ในการเลือกค่าความถี่ทำงานที่เหมาะสมกับโครงสร้างของหม้อแปลงให้สามารถทำงานอย่างประสิทธิภาพ ได้ทดสอบความถี่ที่เหมาะสมดังแสดงผลไว้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.1 และ ก.2 ซึ่งจากตารางจะเลือกค่าความถี่ที่  $20\text{ kHz}$  มาใ้เนื่องจกเป็นค่าที่ใ้ประสิทธิภาพดีที่่สุด



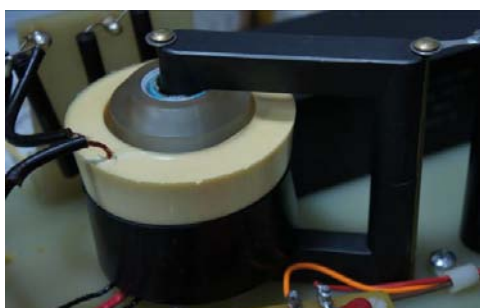
ภาพที่ 3.34 วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าขับได้หลอดสำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน



ภาพที่ 3.34 (ต่อ) วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าขับได้หลอดสำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน



ภาพที่ 3.35 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์ต่ำสำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน

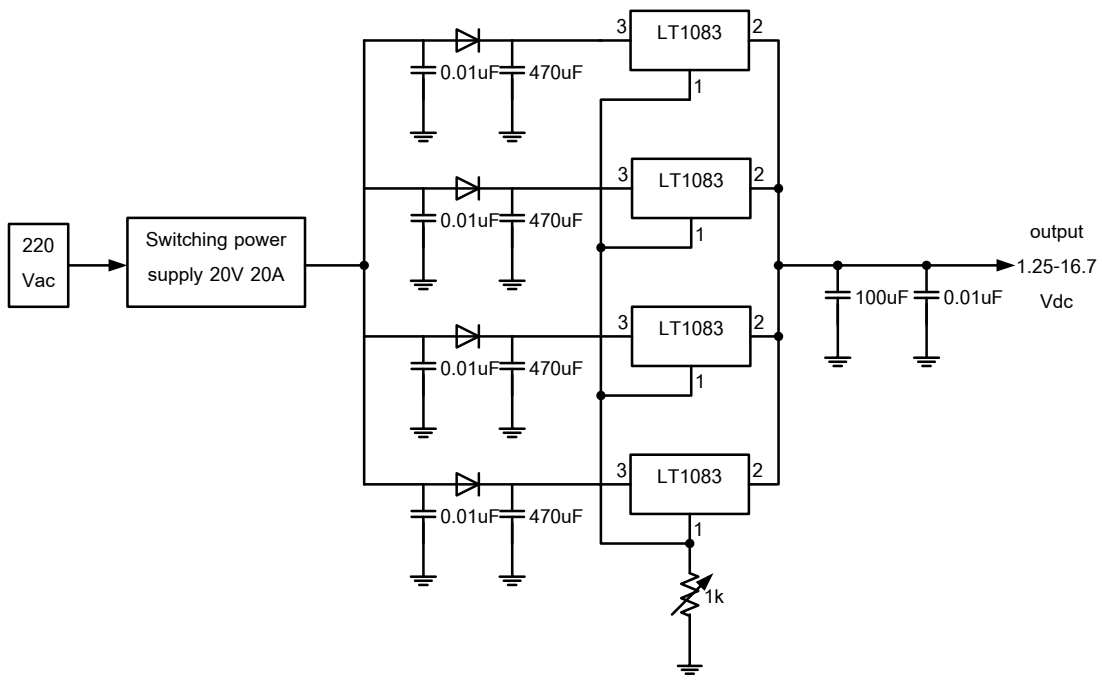


ภาพที่ 3.36 หม้อแปลงไฟฟ้าสัปดาห์ต่ำสำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน

### 3.6.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์สูง

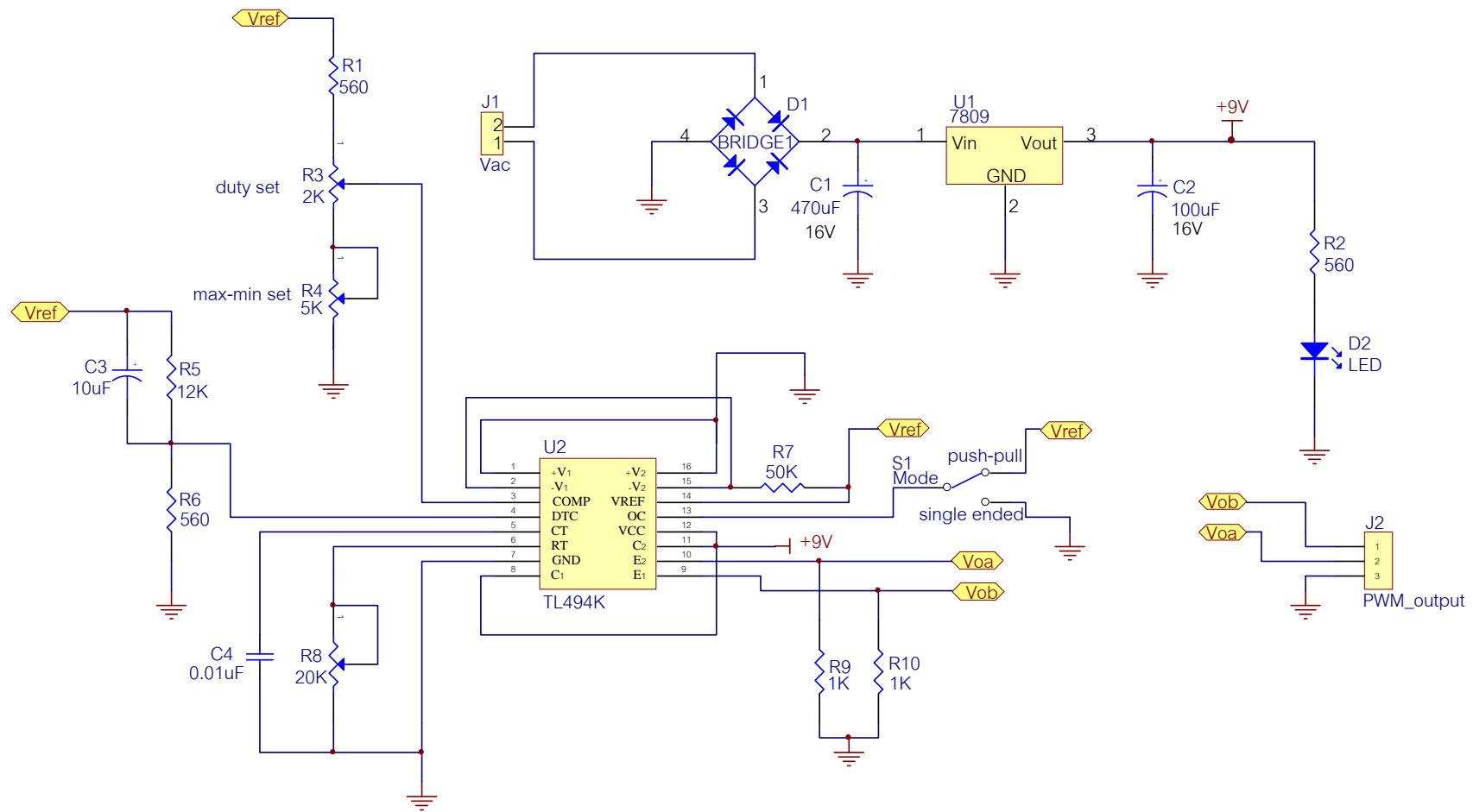
แหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์สูงออกแบบให้สามารถปรับศักดาไฟฟ้าได้ระหว่าง 7.5-100 kV จ่ายกระแสได้สูงสุด 2 mA สำหรับจ่ายศักดาไฟฟ้าให้แก่โทดและแอนอดของระบบเร่งอิเล็กตรอนในคอลัมน์สุญญากาศ วงจรที่ออกแบบขึ้นเป็นระบบกำเนิดไฟฟ้าด้วยเทคนิคคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงแบบฟูลบริดจ์ไดรฟ์(Full bridge drive) ประกอบด้วยวงจรหลัก 2 วงจร คือ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์ต่ำ และวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าสัปดาห์สูง มีรายละเอียดดังนี้

- วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสัปดาห์ต่ำ ส่วนนี้เป็นวงจรแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ต้องปรับค่าได้ในย่านกว้าง 1.25-16.7 V ที่กระแส 20 A จึงเลือกนำสวิตซ์ที่เพาเวอร์ซัพพลายสำเร็จรูปขนาด 20 V กระแส 20 A มาต่อเข้ากับวงจรควบคุมแรงดันที่สามารถปรับค่าได้ ต้องการให้มีรีโพลิต่าจึงเลือกใช้ไอซีควบคุมแรงดันแบบอันดับซันดิ-terminals (TL1083) ซึ่งจ่ายกระแสได้สูงสุดได้ 7 A นำมาขนานกัน 4 ตัว เพื่อรับพิกัดจ่ายกระแสสูงสุด 20 A โดยจัดศักดาอ้างอิงปรับค่าไว้ที่ 1.25-16.7 V สัมพันธ์กับการเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าสูง 7.5-100 kV ดังแสดงวงจรตามภาพที่ 3.37



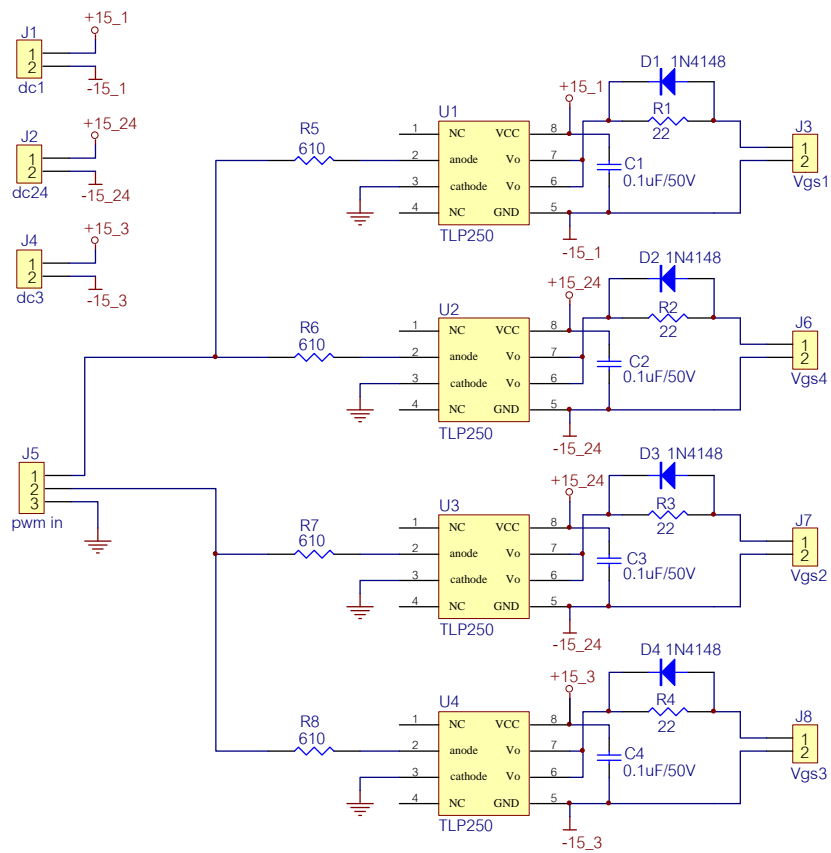
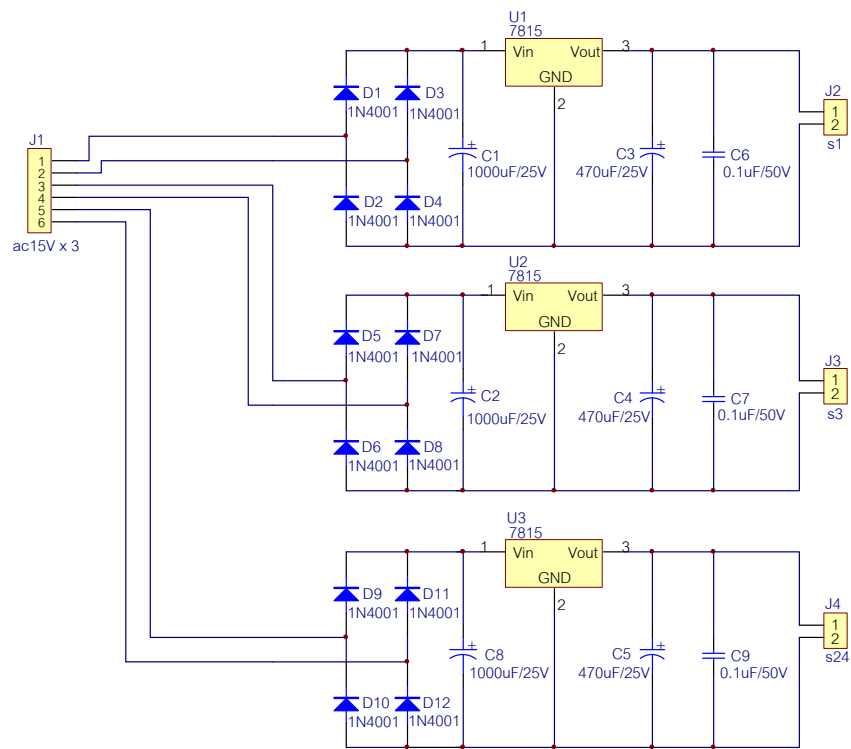
ภาพที่ 3.37 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคัตตาต่ำ

- วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าคัตตาสูง ออกแบบให้กำเนิดคัตตาไฟฟ้าสูงด้วยการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงชนิดฟูลบริจด์คอนเวอร์เตอร์ และทวิคัตตาไฟฟ้าเป็นคัตตาไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ทรานซิสเตอร์มอสเฟต (MOSFET) เบอร์ IRFP460LC เป็นตัวขับหม้อแปลงไฟฟ้าคัตตาสูง ซึ่งเป็นหม้อแปลงความถี่สูงแบบ Step up ที่มีอัตรารอบ 1:400 การควบคุมสัญญาณขับ แบบสวิตเลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494K กำเนิดสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมซึ่งมี duty cycle 40% ความถี่ 40 kHz ผ่านไอซีขับสัญญาณเบอร์ TLP250 กำเนิดคัตตาไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงขนาด 6.2 kV จ่ายให้กับวงจรทวิคัตตาไฟฟ้า (voltage multipliers) 16 เท่า เบอร์ 502-1040-000 และ 502-1041-000 ซึ่งต่ออนุกรมกัน มีอัตราทวิคัตตาไฟฟ้าตัวเลข 8 เท่า โดยวงจรทวิคัตตาไฟฟ้านี้เป็นชนิดกราวด์บวก ทำให้ได้ไฟฟ้าคัตตาสูงกระแสตรงขนาด 100 kV กระแสสูงสุด 2 mA วงจรกำเนิดไฟฟ้าคัตตาสูงที่ออกแบบแสดงดังภาพที่ 3.38

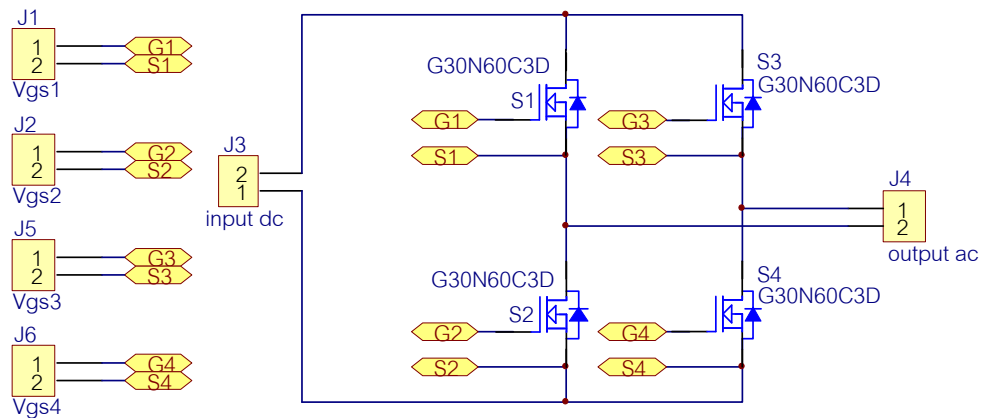


ภาพที่ 3.38 วงจรกำเนิดไฟฟ้าสัปดาห์สูง





ภาพที่ 3.38 (ต่อ) วงจรกำเนิดไฟฟ้าตัดสูง



ภาพที่ 3.38 (ต่อ) วงจรกำเนิดไฟฟ้าสัปดาห์สูง

### 3.7 การออกแบบและสร้างห้องใส่ตัวอย่าง

ในการใช้งานจำเป็นต้องมีห้องใส่ตัวอย่างที่สามารถทำงานกับลำอิเล็กตรอนพลังงาน 100 kV ได้ปลอดภัย เนื่องจากลำอิเล็กตรอนเมื่อกระทบแผ่นฟอยล์และตัวอย่างเกิดอันตรกิริยารังสีเอกซ์ต่อเนื่อง หรือ “ เบรมส์สตราลูง ” ปริมาณรังสีจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่อิเล็กตรอนทำอันตรกิริยา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบุห้องใส่ตัวอย่างด้วยกำบังรังสีเอกซ์ ห้องใส่ตัวอย่างที่ออกแบบขึ้นมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 22 cm ยาว 26.5 cm สูง 22 cm ด้านบนมีช่องสำหรับติดตั้งเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน โครงสร้างทำด้วยเสาอะลูมิเนียม ผนังด้านนอกเป็นอะลูมิเนียมแผ่น มีประตูด้านหน้าและอุปกรณ์ล็อกประตู ภายในรอบด้านบุด้วยตะกั่วแผ่นหนา 3 mm ห้องใส่ตัวอย่างที่สร้างขึ้นแสดงในภาพที่ 3.39

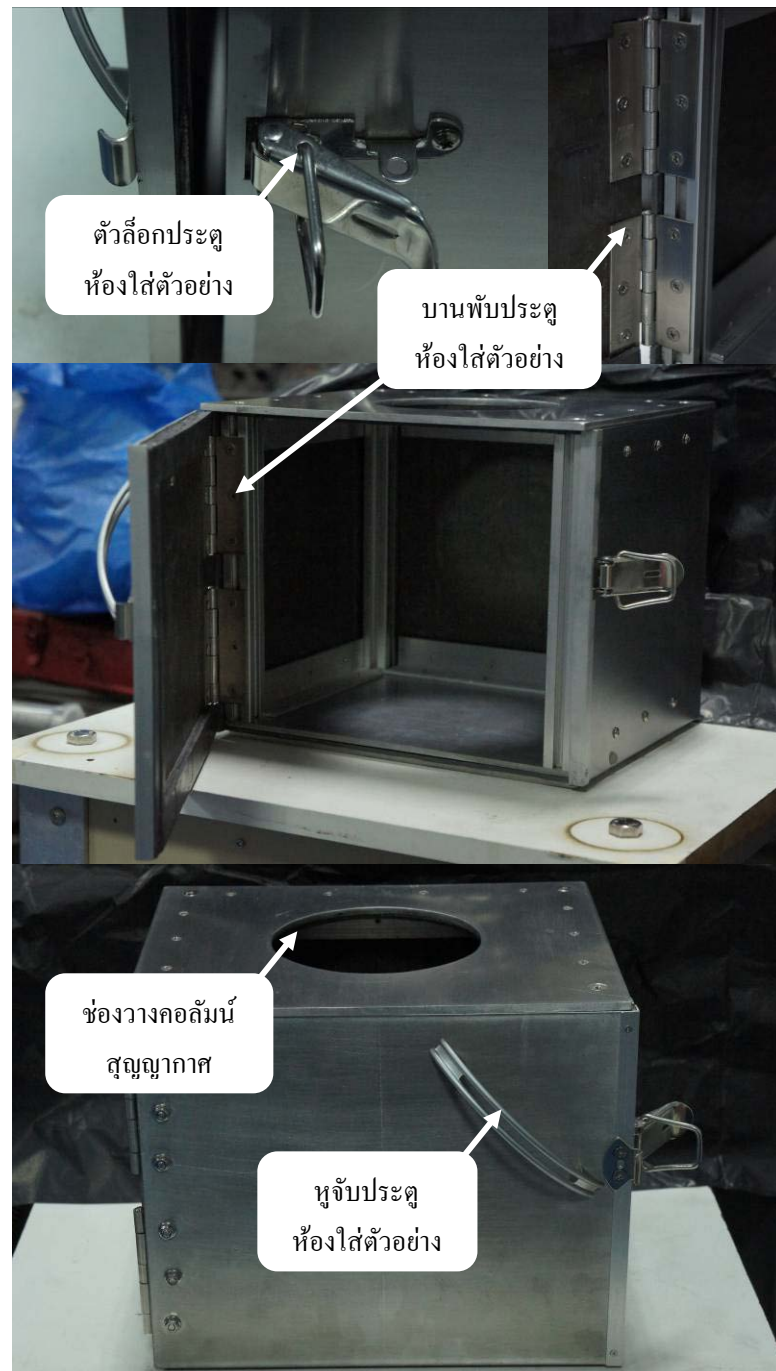
การคำนวณหาความหนาของตะกั่วที่ลดทอนปริมาณรังสีเบรมส์สตราลูงเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานคำนวณได้จากสมการที่ 15 ในบทที่ 2 คือ  $I = I_0 e^{-\mu x}$  หากต้องการลดทอนปริมาณรังสีเบรมส์สตราลูงหลังกำบังไม่เกิน 2% ของปริมาณรังสีเบรมส์สตราลูงที่เกิดขึ้น คำนวณจากพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad I_0 &= 100 \\ I &= 2 \\ x &= \text{ความหนาของตะกั่วที่ต้องใช้} \\ \mu_m &= \mu / \rho \end{aligned}$$

จากการเปิดตารางได้ค่าพลังงานของอิเล็กตรอน 100 kV จะได้ค่า  $\mu_m = 5.5$

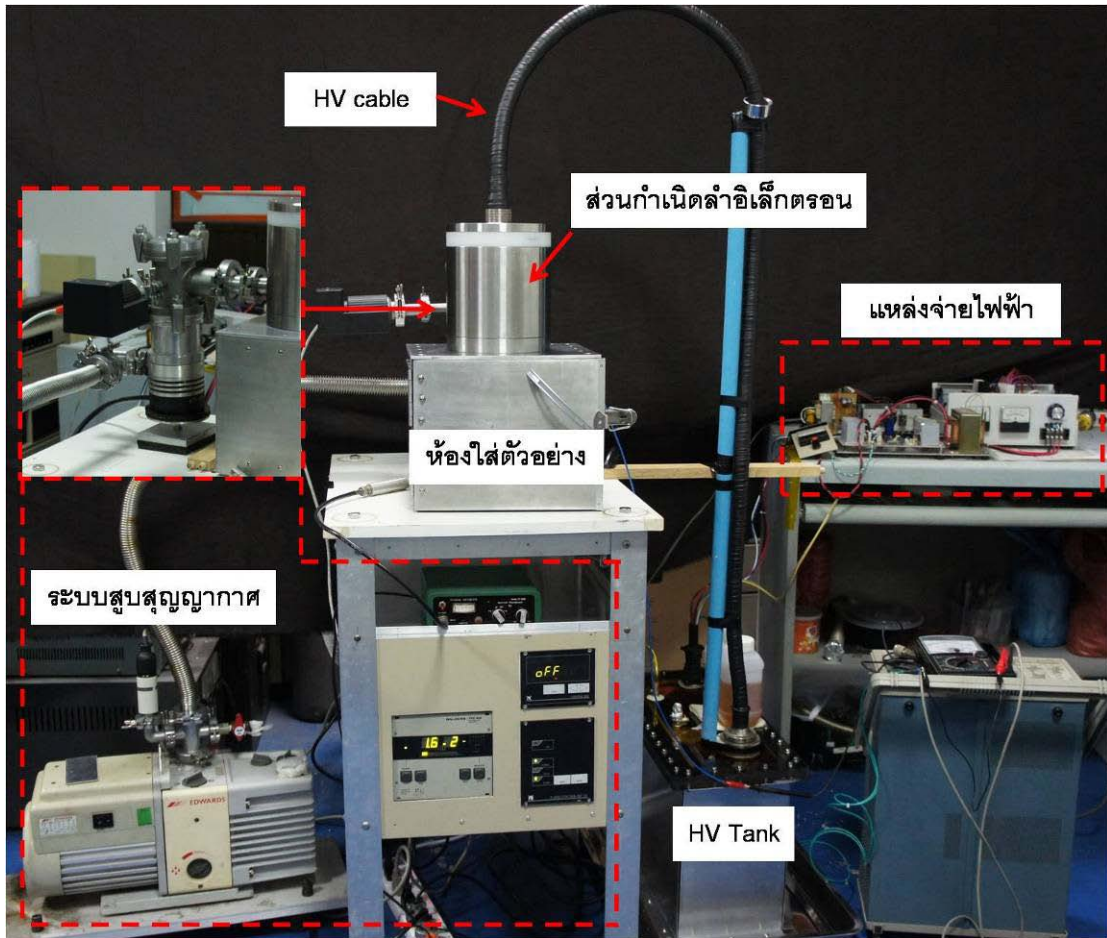
$$\mu = (5.5 \text{ cm}^2/\text{g})(11.34 \text{ g/cm}^3) = 62.37 \text{ cm}^{-1}$$

ดังนั้นต้องใช้ความหนาของแผ่นตะกั่วอย่างน้อย 0.6 mm จึงจะสามารถลดทอนปริมาณรังสีเบรมตราห์สูงได้ 98% สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความหนาของตะกั่วที่บุผนังเพื่อกำบังรังสีขนาด 3 mm เพื่อรองรับการพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่มีกำลังสูงขึ้นในอนาคต



ภาพที่ 3.39 ห้องใส่ตัวอย่างภายในบุด้วยตะกั่วที่สร้างขึ้น

เมื่อนำชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้  
จะได้เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำดังแสดงในภาพที่ 3.40



ภาพที่ 3.40 เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่พัฒนาขึ้น

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำนี้มีการดำเนินงานออกแบบและสร้างส่วนประกอบของระบบหลายส่วน ได้แก่ ระบบกำเนิด ลำอิเล็กตรอน ระบบเร่งอิเล็กตรอน ระบบสุญญากาศ ระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนและห้องใส่ตัวอย่างที่ป้องกันการรั่วไหลของรังสี เป็นต้น หลังการประกอบระบบต่างๆ เข้าด้วย ได้ ทำการทดสอบ ระบบทีละส่วน รวมทั้งทดสอบการทำงานรวมทั้งระบบ จากนั้นจึงทดสอบและประเมิน สมรรถนะของเครื่อง เช่น พลังงานของอิเล็กตรอน ความเข้มลำอิเล็กตรอน และความสม่ำเสมอของลำอิเล็กตรอนบริเวณพื้นที่ใช้งาน เป็นต้น มีลำดับขั้นตอนทดสอบและประเมินเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน พลังงานต่ำที่พัฒนาขึ้น ดังนี้

- ก. การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน
- ข. การทดสอบระบบสุญญากาศ
- ค. การทดสอบการทำงานเต็มระบบของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน
- ง. การประเมินสมรรถนะของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

#### 4.1 การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

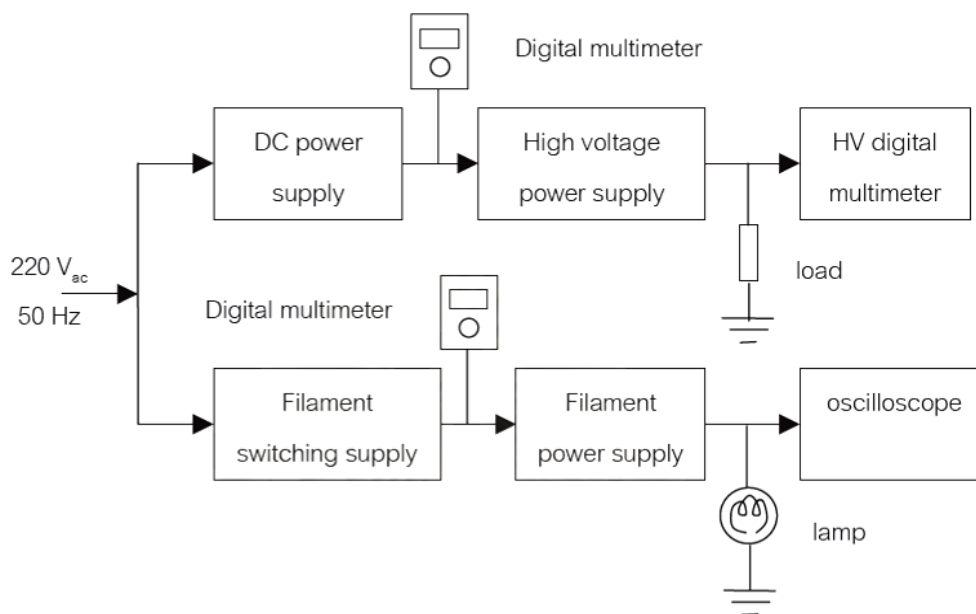
การทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนเป็นการทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 ชุด ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าได้โหลดและแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- 1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าได้โหลดและแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่สร้างขึ้น
- 2) มัลติมิเตอร์ระบบเชิงตัวเลขของ Hewlett Packard model 3476B พร้อม HV probe model 34111A
- 3) อิเล็กโทรสแตติกโวลต์มิเตอร์ ของ Electrical Instrument service model ESH
- 4) เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ของ Tektronix model 465 พร้อม probe model P6109B
- 5) มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital multimeter) ของ YUGO รุ่น MY67
- 6) หลอดไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้เป็นได้โหลดกำเนิดอิเล็กตรอน

#### 4.1.2 การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าไร้หลอด

จัดอุปกรณ์ทดสอบตามแผนภาพภาพที่ 4.1 เพื่อทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าในส่วนของแหล่งจ่ายไร้หลอด โดยใช้หลอดเป็นหลอดไฟฟ้าฮาโลเจนขนาด 24 V 50 W ทดสอบด้วยการแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าตกคร่อมไร้หลอดไฟฟ้าจาก 10, 11, 12, 13,..... 25 V และบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1 และเส้นกราฟในภาพที่ 4.2



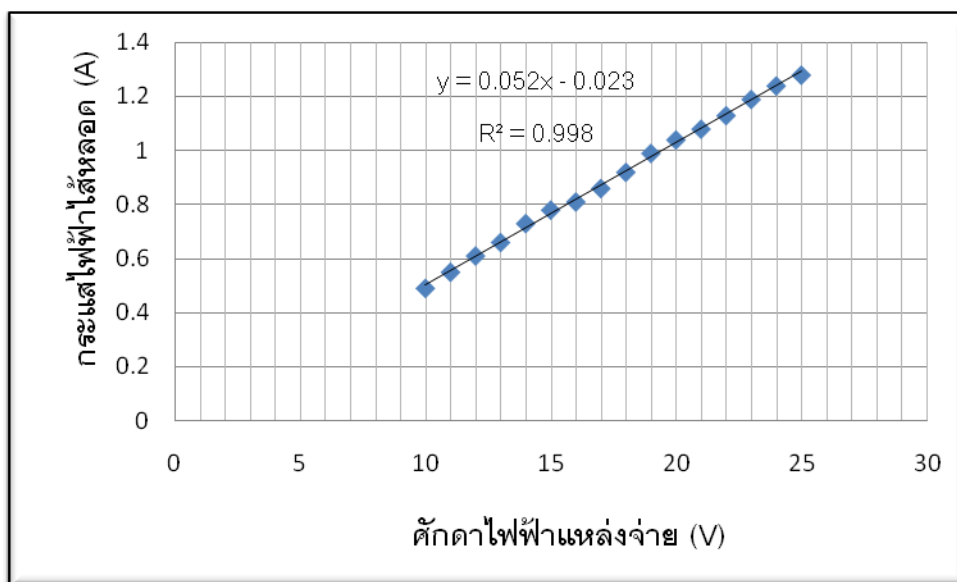
ภาพที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดล้าอิลีกตรอน

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสไฟฟ้าไร้หลอดที่ค่าศักดาไฟฟ้าแหล่งจ่ายค่าต่างๆ

ศักดาไฟฟ้าแหล่งจ่าย (V)	กระแสไฟฟ้าไร้หลอด (A)
10	0.49
11	0.55
12	0.61
13	0.66
14	0.73
15	0.78
16	0.81
17	0.86

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่ากระแสไฟฟ้าไหลลอดที่ค่าศักดาไฟฟ้าแหล่งจ่ายค่าต่างๆ

18	0.92
19	0.99
20	1.04
21	1.08
22	1.13
23	1.19
24	1.24
25	1.28



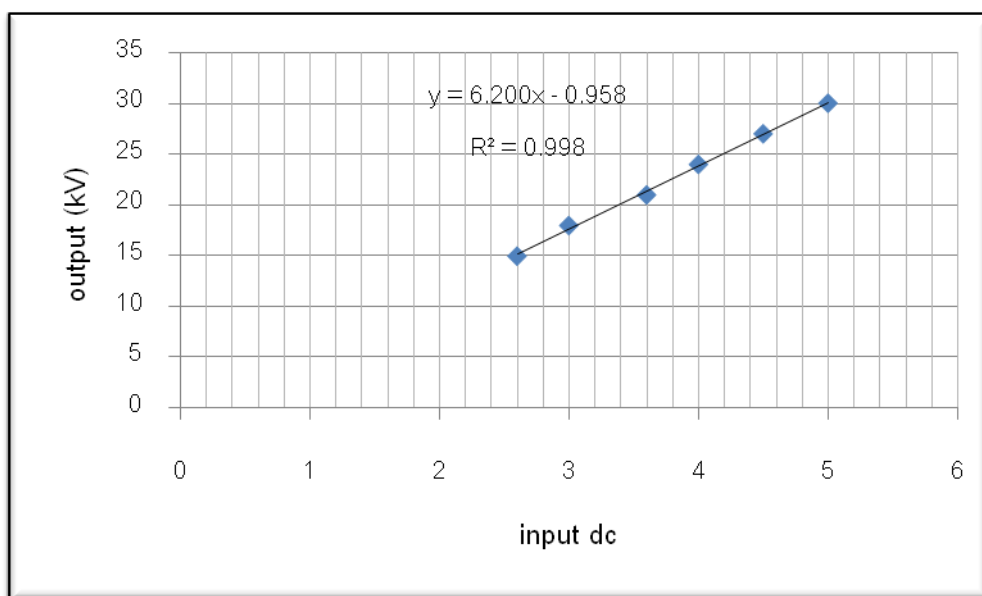
ภาพที่ 4.2 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลลอดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าไหลลอด

#### 4.1.3 การทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

จัดระบบการทดสอบตามแผนภาพภาพที่ 4.1 ทดสอบการจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ขณะไม่จ่ายกระแสแก่อโหลด โดยแปรเปลี่ยน ศักดาไฟฟ้าแรงดันต่ำ ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าทางเข้าและบันทึกค่าศักดาไฟฟ้าแรงสูงทางออก ผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2 และเส้นกราฟการจ่ายกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดในภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกับแรงดันไฟฟ้าสูงขณะไม่มีโหลด

ศักดาไฟฟ้าแหล่งจ่าย (V)	ศักดาไฟฟ้าสูงทางออก ขณะไม่มีโหลด (kV)
2.6	-15
3.0	-18
3.6	-21
4.0	-24
4.5	-27
5.0	-30



ภาพที่ 4.3 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าแหล่งจ่ายและไฟฟ้าศักดาสูงขณะไม่มีโหลด



## 4.2 การทดสอบระบบสุญญากาศ

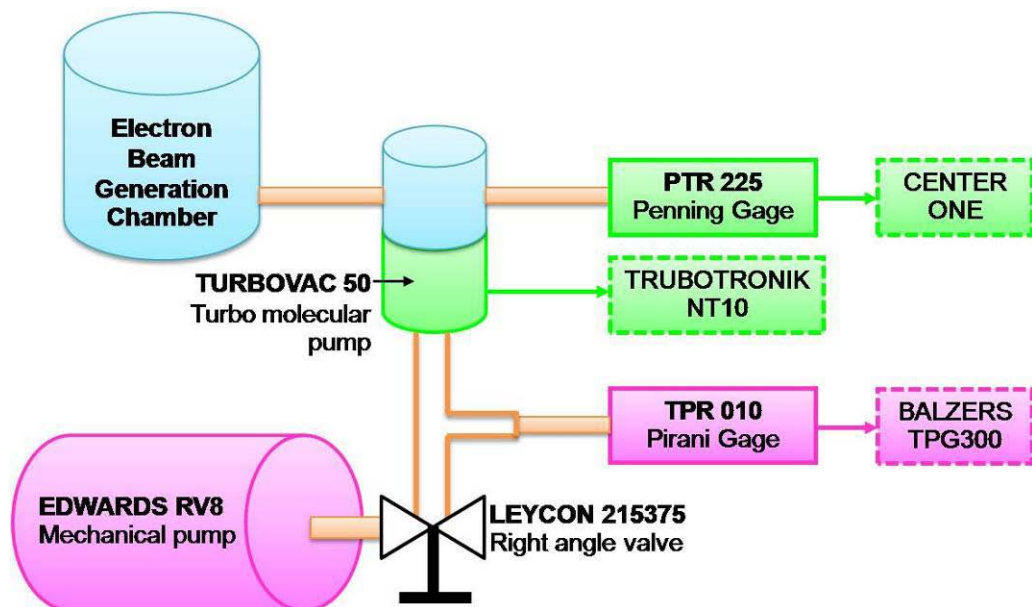
การทดสอบระบบสุญญากาศเป็นการทดสอบการรั่วของส่วนเชื่อมต่อและความสามารถในการสูบลำอากาศของระบบ พร้อมทั้งประเมินเวลาในการสร้างสภาพสุญญากาศในระดับ  $10^{-6}$  Torr เพื่อความพร้อมของห้องสุญญากาศในการเดินเครื่องเร่งอิเล็กตรอน โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

### 4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

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

### 4.2.2 ทดสอบระบบสุญญากาศ

ตรวจสอบความพร้อมของระบบสุญญากาศที่พัฒนาขึ้นตามแผนภาพภาพที่ 4.4 ปิด Air leak valve ของระบบ เริ่มเดินเครื่องสูบลำอากาศแบบโรตารี (Mechanical pump) พร้อมจับเวลาจนกระทั่งได้ระดับสุญญากาศที่ประมาณ  $10^{-2}$  Torr จากนั้นเริ่มเดินเครื่องสูบลำอากาศแบบเทอร์โบโมเลกุล พร้อมทั้งบันทึกที่ระดับความดันสุญญากาศในช่วงเวลาต่างๆ จากมาตรวัดสุญญากาศ ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.4 แผนภาพระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการทำงานระบบสุญญากาศ

สภาวะการทดสอบ	เวลา (นาทีก)	ระดับสุญญากาศที่เกจ ความดันต่ำ (Pirani Gage) (torr)	ระดับสุญญากาศที่เกจ ความดันสูง (Penning Gage) (torr)
เดินเครื่องสุญญากาศ แบบโรตารี	0	-	-
เดินเครื่องสุญญากาศ แบบเทอร์โบโมเลกูลาร์	2	$2.40 \times 10^{-2}$	-
	3	$2.00 \times 10^{-2}$	$9.90 \times 10^{-5}$
	10	$1.90 \times 10^{-2}$	$3.80 \times 10^{-5}$
	20	$1.90 \times 10^{-2}$	$2.34 \times 10^{-5}$
	30	$1.80 \times 10^{-2}$	$1.69 \times 10^{-5}$
	45	$1.70 \times 10^{-2}$	$1.38 \times 10^{-5}$
	60	$1.70 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^{-5}$
	75	$1.70 \times 10^{-2}$	$9.70 \times 10^{-6}$
	90	$1.70 \times 10^{-2}$	$9.63 \times 10^{-6}$
	105	$1.60 \times 10^{-2}$	$9.36 \times 10^{-6}$
	120	$1.60 \times 10^{-2}$	$7.29 \times 10^{-6}$
	135	$1.60 \times 10^{-2}$	$6.30 \times 10^{-6}$
	150	$1.60 \times 10^{-2}$	$6.46 \times 10^{-6}$
165	$1.60 \times 10^{-2}$	$6.18 \times 10^{-6}$	
180	$1.60 \times 10^{-2}$	$6.39 \times 10^{-6}$	

ในการเริ่มเดินระบบสุญญากาศนั้นภายในห้องสุญญากาศจะมีความชื้นหรือก๊าซที่ดูดซับอยู่บนผิววัสดุจึงต้องใช้เวลารวม 180 นาที ในการทำระดับสุญญากาศได้เต็มที่ของระบบที่สร้างขึ้น  $6.39 \times 10^{-6}$  Torr แต่หากมีการกักระดับความดันสุญญากาศของห้องสุญญากาศหลังการเดินระบบสุญญากาศครั้งแรกและเดินระบบครั้งใหม่จะใช้เวลาเพียง 10-20 นาที

ความดันสุญญากาศในห้องสุญญากาศจะลดระดับลงที่ประมาณ  $2.5 \times 10^{-5}$  Torr ขณะจุดได้หลอดเนื่องจากความร้อนจากไส้หลอดที่สูงมากจะถ่ายเทไปยังวัสดุที่เป็นอุปกรณ์ยึดจับได้หลอดและปล่อยก๊าซที่ดูดซับบนผิววัสดุออกมา (Out gas) ในห้องสุญญากาศ เมื่อปริมาณก๊าซที่ดูดซับบนผิววัสดุลดลง ระดับความดันสุญญากาศคืนสู่ระดับ  $10^{-6}$  Torr ดังเดิม

#### 4.3 การทดสอบการทำงานเต็มระบบของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

การทดสอบการทำงานเต็มระบบของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนเป็นการทดสอบการทำงานของระบบต่างๆ ร่วมกันทั้งระบบในการผลิตลำอิเล็กตรอน ได้แก่ การทดสอบความเสถียรของระบบ ทดลองแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าแรงกระแสลำแอโนด ลักษณะของบริเวณลำอิเล็กตรอนที่ผ่านหน้าต่าง รวมทั้งการวัดปริมาณรังสีรั่วไหล โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

- 1) เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้น
- 2) มาตรฐานกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้า
- 3) ฉากเรืองรังสีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
- 4) เครื่องวัดปริมาณรังสี ของ LUDLUM MEASUREMENTS Model 3

##### 4.3.2 ทดลองแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าแรงและกระแสแอโนด

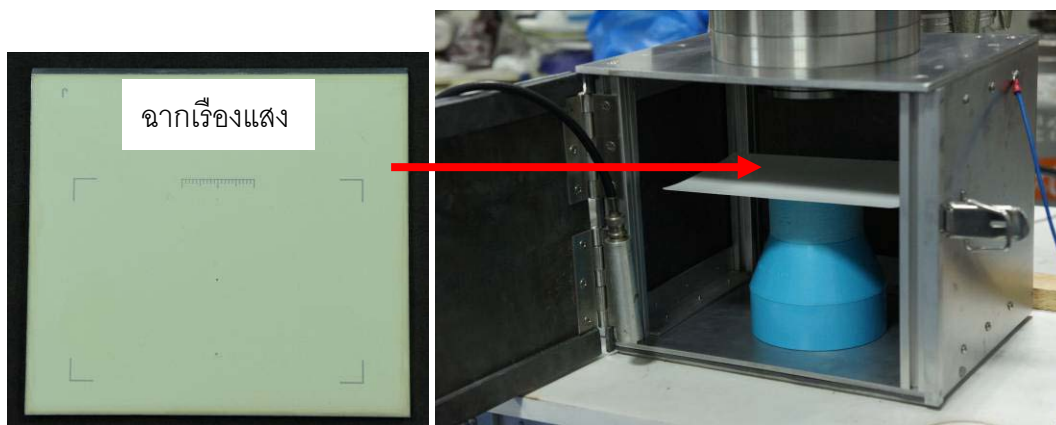
หลังผ่านการทดสอบความเสถียรของระบบ ตั้งค่ากระแสให้หลอดที่ 1 A ทดลองแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าแรงจาก 7.5 , 20, 30, 40,.....50 kV ที่กระแสให้หลอดเริ่มต้นที่ 75  $\mu$ A บันทึกความสัมพันธ์ของ ศักดาไฟฟ้าแรงและกระแสแอโนดได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าแรงกับกระแสลำอิเล็กตรอน

ศักดาไฟฟ้าแรง (kV)	กระแสแอโนด (mA)
7.5	0.075
20.0	0.150
30.0	0.175
40.0	0.250
50.0	0.300

##### 4.3.3 ทดลองผลการกำเนิดลำอิเล็กตรอน

จัดอุปกรณ์ทดลองในห้องใส่ตัวอย่างโดยวางฉากเรืองรังสีที่ระยะห่าง 3 cm ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ตั้งค่ากระแสให้หลอดที่ 1 A ทดลองแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าแรงจาก 40 , 50 และ 54 kV ถ่ายภาพความเข้มของฉากเรืองรังสีในแต่ละเงื่อนไข ผลการทดลองเป็นไปตามภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.5 การจัดอุปกรณ์ทดลองในห้องใส่ตัวอย่าง



ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายแสงเรืองที่เกิดขึ้นบนฉากเรืองแสง

แสงเรืองที่ปรากฏบนฉากเรืองแสงจะมีความเข้มสูงขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าแรงและกระแสแอโนด และได้ทำการวิเคราะห์ผลการเรืองแสงนี้ พบว่าเกิดจากปริมาณรังสีเอกซ์ของอันตรกิริยาเบรมส์ชตราลุงระหว่างลำอิเล็กตรอนในห้องสุญญากาศกับตะแกรงรองรับแผ่นหน้าต่างอิเล็กตรอนเป็นหลัก โดยมีเหตุผลดังนี้

- ก. ในการทดสอบความสามารถในการทะลุผ่านแผ่นพลาสติกที่บังหน้าต่างของหัวรังสีไกเกอร์มูลเลอร์สามารถทะลุผ่านได้ และวัดรังสีได้ในระยะไกลจากหน้าต่างทางผ่านลำอิเล็กตรอน
- ข. การวัดกระแสลำอิเล็กตรอนที่ผ่านออกออกมาจากหน้าต่างในระดั  $10 \mu\text{A}$  ตามการทดลองในหัวข้อ 4.4.4 พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสลำอิเล็กตรอนน้อยมาก
- ค. สอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยการจำลองความสามารถในการทะลุผ่านหน้าต่างอลูมิเนียมที่มีความหนา  $25 \mu\text{m}$  ของอิเล็กตรอนพลังงาน  $50 \text{ keV}$  แสดงให้เห็นว่ามีโอกาสทะลุผ่านน้อยมาก

#### 4.3.4 ทดสอบปริมาณรังสีรั่วไหล

การทดลองวัดปริมาณรังสีที่ผนังและรอยต่อบานฝาปิดของห้องใส่ตัวอย่างด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสี ดำเนินการโดยทดลองแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าแรงจาก 20 , 30, 40, และ 50 kV ที่กระแสไหลลด 1 mA บันทึกปริมาณรังสีได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณรังสีรั่วไหลของห้องใส่ตัวอย่าง

ศักดาไฟฟ้าแรง (kV)	ปริมาณรังสีที่ผนังด้านข้าง (mR/h)	ปริมาณรังสีที่รอยต่อบานฝาปิด (mR/h)
20	0.01	0.01
30	0.02	0.07
40	0.02	0.2
50	0.02	0.7

#### 4.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

การทดสอบการทำงานเต็มระบบของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนเป็นการประเมินพลังงานของอิเล็กตรอน พื้นที่ครอบคลุมการกระจายของลำอิเล็กตรอน ความเข้มลำอิเล็กตรอนและความสม่ำเสมอของลำอิเล็กตรอนบริเวณพื้นที่ใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

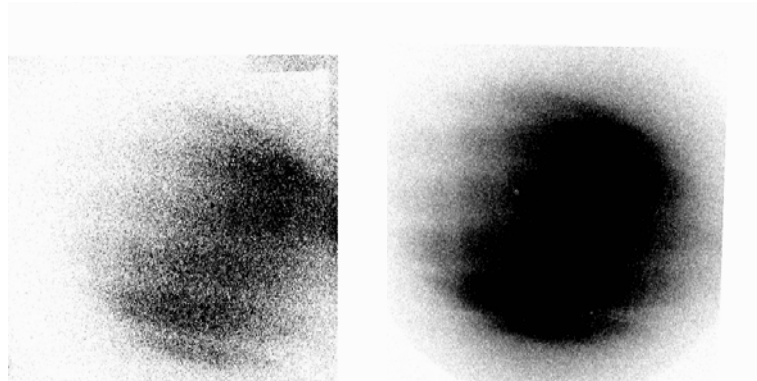
- 1) เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้น
- 2) มาตรฐานวัดกระแสลำอิเล็กตรอนและศักดาไฟฟ้า
- 3) แผ่นรับภาพและเครื่องอ่านผลภาพถ่ายรังสี
- 4) แผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสี GEX 3002

##### 4.4.2 การประเมินพลังงานของลำอิเล็กตรอน

จัดระบบทดสอบตามระบบของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นตามภาพที่ 3.40 ในบทที่ 3 โดยวาง Step wedge อลูมิเนียมบนแผ่นบันทึกภาพในห้องใส่ตัวอย่างห่างจากช่องหน้าต่าง 3 cm จากนั้นเริ่มเดินระบบสุบสุญญากาศจนระดับความดันสุญญากาศอยู่ที่ระดับ  $10^{-6}$  Torr ทดลองฉาย ลำอิเล็กตรอนที่ศักดาไฟฟ้าสูง 100 kV และกระแสลำอิเล็กตรอนที่ 1 mA เป็นเวลา 10 วินาที อ่านค่า PSL จากแผ่นบันทึกภาพ (รวมผลการทดลองที่สมบูรณ์)

#### 4.4.3 ทดสอบพื้นที่ครอบคลุมการกระจายลำอิเล็กตรอน

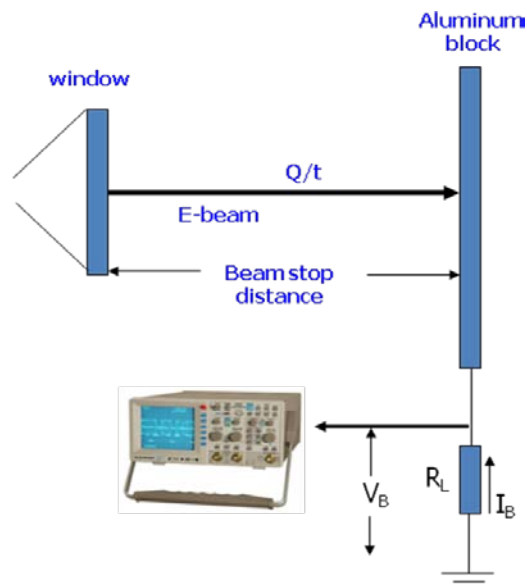
ใช้แผ่นบันทึกภาพถ่ายภาพลำอิเล็กตรอนที่ระยะห่างจากหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน 5 และ 10 cm ที่พลังงานอิเล็กตรอน 60 keV และ 80 keV กระแสลำอิเล็กตรอน 10  $\mu\text{A}$  อ่านผลภาพบริเวณพื้นที่ครอบคลุมการกระจายลำอิเล็กตรอนในแต่ละเงื่อนไข ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4. (รวมผลการทดลองที่สมบูรณ์)



ภาพที่ 4.7 การกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่ระดับศักย์ไฟฟ้าสูงค่าต่างๆ

#### 4.4.4 ทดสอบความเข้มของลำอิเล็กตรอน

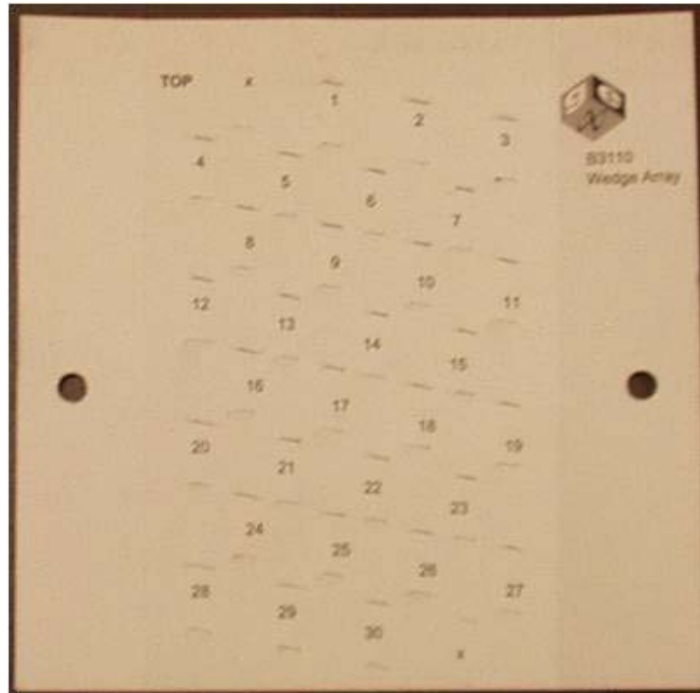
จัดอุปกรณ์วัดกระแสของลำอิเล็กตรอนที่ผ่านออกทางช่องหน้าต่างดังภาพที่ 4.8 โดยใช้  $R_L$  ค่า 1  $k\Omega$  วัดปริมาณความเข้มลำอิเล็กตรอนที่พลังงาน 100 keV และ 2 mA โดยใช้เครื่องอ่านรูปสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์ทางเข้า 10  $M\Omega$  อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าและคำนวณค่ากระแสจากลำอิเล็กตรอน (รวมผลที่สมบูรณ์ เนื่องจากมีปัญหาเรื่องสายเคเบิลอาร์ก)



ภาพที่ 4.8 การวัดกระแสลำอิเล็กตรอนที่ผ่านหน้าต่างลำอิเล็กตรอน

#### 4.4.5 ทดสอบความสม่ำเสมอของความเข้มลำอิเล็กตรอน

ติดแผ่นฟิล์มวัดปริมาณความเข้มลำอิเล็กตรอนที่พลังงาน 100 keV และ 2 mA บริเวณพื้นที่ครอบคลุมการกระจายลำอิเล็กตรอนบนแผ่นอะคริลิกที่แบ่งระยะกริดดังในภาพที่ 4.9 วางแผ่นวัดปริมาณความเข้มลำอิเล็กตรอนที่ระยะห่างจากหน้าต่าง 5 cm ฉายลำอิเล็กตรอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อ่านค่าปริมาณรังสีและคำนวณความสม่ำเสมอครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน =  $D_{\min}/D_{\max}$



ภาพที่ 4.9 การแบ่งระยะกริดบนแผ่นฟิล์มวัดปริมาณความเข้มลำอิเล็กตรอน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ในประเทศเป็นหลัก ยกเว้นสายเคเบิลทึนไฟฟ้าศักดาสูง สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้หลอดสามารถปรับได้อย่างเป็นเชิงเส้น โดยปรับศักดาไฟฟ้าได้ตั้งแต่ .25-25 V จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 2 A ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสามารถปรับศักดาไฟฟ้าแรงได้ต่อเนื่องจาก 7.5-100 kV ให้กระแสแอโนดสูงสุดมากกว่า 2 mA

5.1.2 คอลัมน์สุญญากาศที่ออกแบบสามารถรองรับระดับความเป็นสุญญากาศได้ถึง  $6.39 \times 10^{-6}$  Torr ใช้เวลาในการสูบอากาศครั้งแรกจากบรรยากาศ 3 ชั่วโมง แต่หลังการสูบอากาศเริ่มต้นและกักสภาพสุญญากาศในห้องสุญญากาศโดยไม่มีการรั่วซึมของอากาศ เมื่อสูบสุญญากาศครั้งใหม่จะใช้เวลาเพียง 10-20 นาที ขึ้นกับการปลดปล่อยก๊าซที่ดูดซับบนผิววัสดุ (out gas) จากวัสดุภายในคอลัมน์สุญญากาศ

5.1.3 การทดสอบระบบจ่ายศักดาไฟฟ้าแรงเข้าระบบพบว่า

- ก. การใช้สายเคเบิลทึนไฟฟ้าศักดาสูงที่มีตัวนำหุ้มภายนอกกันการดิซชาร์จจากไฟฟ้าสถิตย์ สามารถปรับศักดาไฟฟ้าแรงได้ถึง 80 kV แต่พบว่ามีกระแสรั่วไหลในสายเคเบิลสูงถึง 2 mA มีผลให้จ่ายกระแสแอโนดได้น้อย ประมาณ 10  $\mu$ A ทำให้ได้อิเล็กตรอนพลังงานสูง แต่ได้ปริมาณรังสีจากระบบน้อย
- ข. การใช้สายเคเบิลทึนไฟฟ้าศักดาสูงแบบไม่มีตัวนำหุ้ม สามารถปรับศักดาไฟฟ้าแรงได้เพียง 50 kV พบการดิซชาร์จจากไฟฟ้าสถิต แต่ได้กระแสแอโนดสูงถึง 500  $\mu$ A ทำให้ได้อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ มีปริมาณรังสีทางช่องหน้าต่างสูง

5.1.4 การทดสอบการทำงานของระบบพบว่า

ในเงื่อนไขที่มีข้อจำกัดด้านวัสดุและอุปกรณ์ที่มีส่วนสำคัญต่อการผลิตลำอิเล็กตรอน 2 ส่วน ได้แก่ สายเคเบิลทึนไฟฟ้าศักดาสูงชนิดที่มีสายส่งไฟฟ้าจุดได้หลอดภายในและหน้าต่างช่องทางออกลำอิเล็กตรอนพร้อมตะแกรงรับแรงนี้ สามารถทดสอบการเดินเครื่องที่ศักดาไฟฟ้าแรง 54kV กระแสแอโนด 300  $\mu$ A พบว่า

- ก. การประเมินลำรังสีที่ได้ด้วยการใช้ฉากเรืองแสงวางไว้หน้าต่าง สามารถเห็นการเรืองแสงจากปริมาณรังสีที่กระทบฉากเรืองแสงได้อย่างชัดเจน โดยความเข้มรังสีเพิ่มขึ้นตามขนาดศักดาไฟฟ้าแรงและกระแสแอโนด แต่จากการวิเคราะห์ชนิดของรังสี



พบว่าส่วนใหญ่เป็นรังสีเอกซ์จากผลของเบรมส์ชตราลุง เนื่องจากอิเล็กตรอนที่พลังงานต่ำกว่าระดับ 50 keV มีโอกาสทะลุหน้าต่างที่ความหนา 25  $\mu\text{m}$  ได้น้อยมาก

ข. สามารถเพิ่มกระแสได้ตลอดเพื่อเพิ่มกระแสแอโนดได้สูงกว่า 500  $\mu\text{A}$  แต่ทิศทางของลำอิเล็กตรอนจะกระจายเข้าหาผนังห้องสุญญากาศ จากผลของสนามไฟฟ้าที่บังคับทิศทางอิเล็กตรอนต่ำไป มีผลให้ลำอิเล็กตรอนไม่ลงมายังช่องหน้าต่าง

5.1.5 ผลการวัดปริมาณรังสีรั่วไหลของห้องใส่ตัวอย่างพบว่าระดับรังสีที่ผนังห้องใส่ตัวอย่างและคอลัมน์เร่งอิเล็กตรอนมีระดับรังสีที่ระดับแบกกราวด์ เนื่องจากได้เพื่อกำบังรังสีสูงกว่าที่ประเมินมาก และไม่พบปริมาณรังสีรั่วไหลบริเวณรอยต่อบานปิดเปิดและตะเข็บ

5.1.6 จากการเดินเครื่องโดยใช้เงื่อนไขในข้อ 5.1 .3 ก. พบว่ามีปริมาณอิเล็กตรอนผ่านทางช่องหน้าต่าง โดยวิเคราะห์ด้วยการกำบังหน้าต่างหัววัดไกเกอร์ด้วยแผ่นพลาสติกและได้สังเกตการกระจายลำอิเล็กตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพถ่ายภาพลำอิเล็กตรอนที่ระยะห่างจากหน้าต่างทางออกลำอิเล็กตรอน 3 cm ปรากฏว่ายิ่งระยะห่างจากหน้าต่างมากการกระจายลำอิเล็กตรอนยิ่งมากแต่ความเข้มบริเวณศูนย์กลางจะลดลง และพลังงานอิเล็กตรอนยิ่งมากยิ่งได้ความเข้มลำอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงที่ระยะไกลจากหน้าต่างมากขึ้น โดยกระจายตัวที่ระยะ 4 cm จากช่องหน้าต่างเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 cm

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 ระบบสุญญากาศยังมีอัตราในสุบอากาศต่ำไปสำหรับการสูบก๊าซที่ปลดปล่อยจากผิววัสดุเมื่อได้รับ ความร้อนสูงจากไส้หลอด ดังนั้นเมื่อเพิ่มกระแสไส้หลอดเกินกว่า 15 V ระดับสุญญากาศจะลดต่ำลงไปอยู่ในระดับ  $5 \times 10^{-5}$  Torr ซึ่งต้องรอเวลาการสุบอากาศออกจนกว่าระดับสุญญากาศจะลดลงที่ระดับ  $10^{-6}$  Torr

5.2.2 การดิสชาร์จในสายเคเบิลทนส์คักดาไฟฟ้าสูงจะก่อให้เกิดการรบกวนการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์และเป็นอันตรายต่อระบบรวมถึงความปลอดภัยในการทำงาน จึงเป็นอุปสรรคในการเพิ่มศักดาไฟฟ้าแรงในการเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนและการบังคับลำอิเล็กตรอนให้ทะลุผ่านหน้าต่าง ดังนั้นสายเคเบิลทนส์คักดาไฟฟ้าสูงจึงต้องมีการศึกษาและปรับปรุง

5.3.3 การลดปริมาณรังสีเอกซ์เกี่ยวข้องโดยตรงกับส่วนประกอบของหน้าต่าง เนื่องจากต้องใช้วัสดุที่มีความบางเพื่อให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านได้ง่ายและมีความแข็งแรงในการรองรับแรงดันสุญญากาศ ในการรับแรงได้ออกแบบตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมรองรับ ทำให้ลดพื้นที่ทางออกลำอิเล็กตรอนจากส่วนที่บังการเคลื่อนผ่านลำอิเล็กตรอนและยังก่อให้เกิดรังสีเอกซ์จากผลของเบรมส์ชตราลุง จึงต้องออกแบบวัสดุรองรับใหม่ที่แข็งแรง นำไฟฟ้าและเป็นธาตุเบา

5.2.4 ความหนาแน่นของลำอิเล็กตรอนที่ผ่านช่องหน้าต่างออกมานั้นยังมีปริมาณน้อย เนื่องจากถูกลดทอนด้วยความหนาแน่นของอะลูมิเนียมพอยล์ที่ใช้ เนื่องจากไม่สามารถหาขนาดที่บางกว่านี้ได้ตามท้องตลาด และการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนให้สูงมากๆ ด้วยการเพิ่มศักดาไฟฟ้าเร่งและเพิ่มกระแสอิเล็กตรอนก็จะทำให้เกิดความร้อนมากขึ้น หากเกิดความร้อนสูงมากเกินไปกว่า 600 องศาเซลเซียสอะลูมิเนียมพอยล์ที่ไม่สามารถทนความร้อนนี้ได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นควรมีการออกแบบให้ส่วนของหัวต่อสายศักดาไฟฟ้าเร่งและศักดาไฟฟ้าจ่ายให้กับไส้หลอด อีกระยะจากส่วนของคอลัมน์สุญญากาศเพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนไส้หลอดมากขึ้นและทำให้มีความแข็งแรงของหัวต่อมากขึ้นด้วย

5.3.2 การกลิ้งขึ้นรูปคอลัมน์สุญญากาศควรมีความละเอียดแม่นยำในเรื่องขนาดมากกว่านี้ เพราะชิ้นส่วนที่ขนาดไม่ตรงตามการออกแบบมากเกินไปเป็นสาเหตุเมื่อประกอบแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันอาจมีการเอียงจนทำให้ระบบสุญญากาศรั่ว ต้องเสียเวลาในการปรับระดับการวางชิ้นส่วนใหม่หลายครั้ง นอกจากนี้หากสามารถลดปริมาณชิ้นส่วนที่ประกอบเป็นคอลัมน์ลงได้ก็จะช่วยลดจุดต่อเชื่อมแต่ละชิ้นส่วนทำให้ลดจุดที่จะเกิดการรั่วซึมของอากาศลงได้ และยังลดต้นทุนของวัสดุในการป้องกันการรั่วซึมลงอีกด้วย

5.3.3 ควรพัฒนาระบบสุญญากาศให้มีอัตราในการสูบอากาศที่เร็วขึ้น เมื่อเกิดก๊าซปลดปล่อยจากผิวของวัสดุขณะได้รับความร้อนจากไส้หลอด เพื่อให้ระบบสามารถเข้าสู่ระดับความดันสุญญากาศสูงได้เร็ว โดยการเปลี่ยนขนาดของปั๊มสูบอากาศแบบเทอร์โบโมเลกุลารี่ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

5.3.4 วัสดุที่ต้องมีการศึกษาวิจัยเป็นพิเศษในการพัฒนาเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนชนิดไฟฟ้ากระแสตรง ได้แก่ สายเคเบิลทนแรงดันไฟฟ้าสูงชนิดที่มีสายส่งไฟฟ้าจุดไส้หลอดภายในและหน้าต่างช่องทางออกลำอิเล็กตรอนพร้อมตะแกรงรับเร่ง

## รายการอ้างอิง

- [1] Sadat, T., and Huber, T. E-beam a new transfer system for isolator technology. Radiation Physics and Chemistry 63 (2002) : 587-589.
- [2] กิตติพงษ์ เกษมสุข, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และเดโช ทองอร่าม. การพัฒนาปืนอิเล็กตรอนแบบ ไมโครโฟกัสสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์. วารสารสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย 4, 2 (ธันวาคม 2546) : 47-59.
- [3] Rios, P.B., Cruz, M.T.F. Da, Martins, M.N., and Morel, J.C.O. Window transparency optimization of E-beam machines. Radiation Physics and Chemistry 71 (2004) : 531-533.
- [4] Armitage, A., and Hart, A.D. Electron gun and an electron beam window. Patent Application Publication US 2005/0253496 A1 (2005).
- [5] Crewe, A., Gorodezkey, I. Flat Electron Beams. Optik-International Journal for Light and Electron Optics 117 (2006) : 15-20.
- [6] Tsoulfanidis, N., Landsberger, S. Measurement and detection of Radiation 3<sup>rd</sup> ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [7] นवलฉวี รุ่งธนเกียรติ. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- [8] Gardner, R.P., Ralph L. Ely, Jr. Radioisotope Measurement Applications in Engineering Reinhold Publishing Corporation, 1967
- [9] Knoll, G.F. Radiation Detection and Measurement 3<sup>rd</sup> ed. USA : John Wiley & Sons, 2000.
- [10] Drobny, J.G. Radiation Technology for Polymers USA : CRC Press LLC, 2003.
- [11] Takeshi, H. Welcome to Toyo Ink EB R&D Center : Toyo Ink MFG. Co. Ltd, 2002.
- [12] สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, และเดโช ทองอร่าม. แคโทดสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4, 2 (2537) : 139-169.
- [13] Michaelson, H.B. The work function of the elements and its periodicity. J. Appl. Phys 48, (1977) : 4729.
- [14] Sproull, R.L. Modern Physics New York : John Wiley & Sons, 1963.
- [15] Slade, P.G. The Vacuum Interrupter Theory, Design, and Application CRC Press, 2008.

- [16] GEX Corporation. B3202 Energy Measurement Stack Technical and Usage Information USA : GEX Corporation, 2002.
- [17] Hansen, S.P. Some Vacuum Basics. The Bell Jar [online]. 2008. Available from : [www.belljar.net/basics.htm](http://www.belljar.net/basics.htm) [2011,October 9]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ประสิทธิภาพของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคักดาวน์สำหรับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่  
ค่าความถี่ของวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณพัลส์ค่าต่างๆ

f(kHz)	Vp(V)	Ip(A)	Pin	Vs(V)	Is(A)	Pout	eff
10	20	0.66	13.2	10	1.03	10.3	78.0303
18	20	0.6	12	9.2	0.89	8.188	68.23333
19	20	0.6	12	9	0.88	7.92	66
20	20	0.6	12	8.9	0.86	7.654	63.78333
21	20	0.6	12	8.8	0.85	7.48	62.33333
22	20	0.58	11.6	8.75	0.82	7.175	61.85345
23	20	0.58	11.6	8.65	0.8	6.92	59.65517
24	20	0.58	11.6	8.6	0.79	6.794	58.56897
25	20	0.57	11.4	8.5	0.79	6.715	58.90351
30	20	0.55	11	8	0.62	4.96	45.09091
35	20	0.52	10.4	7.6	0.55	4.18	40.19231
40	20	0.52	10.4	7.2	0.46	3.312	31.84615
45	20	0.5	10	6.9	0.37	2.553	25.53
50	20	0.48	9.6	6.6	0.3	1.98	20.625
55	20	0.46	9.2	6.4	0.24	1.536	16.69565
60	20	0.43	8.6	6.1	0.19	1.159	13.47674

ตารางที่ ก.2 ค่าประสิทธิภาพของวงจร กำลังอินพุตและเอาต์พุต กระแสโพรมาวี กระแสเซคันดารี ศักดาไฟฟ้าเซคันดารี เมื่อเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าโพรมาวีไปที่ค่าต่างๆ และใช้ความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เท่ากับ 20 kHz

Vp(V)	Ip(A)	Pin	Vs(V)	Is(A)	Pout	%eff
10	0.32	3.2	3.3	0.49	1.617	50.53
11	0.38	4.18	3.8	0.55	2.09	50.00
12	0.39	4.68	4.4	0.61	2.684	57.35
13	0.4	5.2	5	0.66	3.3	63.46
14	0.42	5.88	5.5	0.73	4.015	68.28
15	0.43	6.45	6	0.78	4.68	72.56
16	0.48	7.68	6.3	0.81	5.103	66.45
17	0.5	8.5	6.8	0.86	5.848	68.80
18	0.52	9.36	7.5	0.92	6.9	73.72
19	0.54	10.26	7.9	0.99	7.821	76.23
20	0.56	11.2	8.4	1.04	8.736	78.00
21	0.58	12.18	8.8	1.08	9.504	78.03
22	0.61	13.42	9.4	1.13	10.622	79.15
23	0.64	14.72	9.9	1.19	11.781	80.03
24	0.66	15.84	10.5	1.24	13.02	82.20
25	0.68	17	11	1.28	14.08	82.82



ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของอะลูมิเนียมและไทเทเนียม

คุณสมบัติ	อะลูมิเนียม	ไทเทเนียม
<b>ทั่วไป</b> สัญลักษณ์, เลขอะตอม หมู่, คาบ, บล็อก มวลอะตอม	Al, 13 13, 3, p 26.9815386 กรัม/โมล	Ti, 22 4, 4, d 47.867 กรัม/โมล
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b> สถานะ ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.) ความหนาแน่นของของเหลวที่m.p. จุดหลอมเหลว ความร้อนจำเพาะ	ของแข็ง 2.70 ก./ซม. <sup>3</sup> 2.375 ก./ซม. <sup>3</sup> 933.47 K (660.32 °C) (25 °C) 24.200 J/(mol·K)	ของแข็ง 4.506 ก./ซม. <sup>3</sup> 4.11 ก./ซม. <sup>3</sup> 1941 K (1668 °C) (25 °C) 25.060 J/(mol·K)
<b>อื่น ๆ</b> การนำความร้อน โมดูลัสของยังก์ โมดูลัสของแรงเฉือน โมดูลัสของแรงบีบอัด ความเค้นแรงดึง	(300 K) 237 W/(m·K) 70 GPa 26 GPa 76 GPa 90MPa	(300 K) 21.9 W/(m·K) 116 GPa 44 GPa 110 GPa 434 MPa

# 304/304L

## STAINLESS STEEL

UNS S30400/UNS S30403



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

**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  
Oersteds, 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



## Information About *Dow Corning*<sup>®</sup> 3110, 3112, and 3120 RTV Rubbers

### Type

Two-part RTV silicone rubber

### Color

*Dow Corning* 3110 and 3112  
RTV Rubbers – White

*Dow Corning* 3120 RTV Rubber  
– Red

### Physical Form

#### – As Supplied

Pourable liquid

#### – As Cured

Firm, flexible silicone rubber;  
at room temperature, choice  
of four catalysts offers cure  
times ranging from 12 min-  
utes to 12 or more hours

### Primary Uses

Potting and encapsulating of  
electrical/electronic products;  
moldmaking RTV Rubbers

## DESCRIPTION

### Encapsulants

*Dow Corning*<sup>®</sup> 3110, 3112 and 3120 RTV Rubbers are pourable rubber bases that become firm, flexible silicone rubber when cured. They can be cured with any of four catalysts. The cured rubbers exhibit good dielectric properties, and various combinations of base and catalyst allow a wide range of working times and curing rates that can satisfy most potting, coating and moldmaking needs.

These RTV rubbers:

- Are easily mixed and poured
- Cure at room temperature in any thickness
- Give accurate reproduction of masters for moldmaking
- With primer, can obtain strong adhesion to many surfaces
- Provide wide service temperature ranges
- Absorb mechanical shock and vibration

### Catalysts

Usually, a recommended mixing ratio of 10:1 base to catalyst assures more accurate measuring and mixing of catalyst, particularly when automatic equipment is used to mix and/or dispense the RTV silicone rubber.<sup>1</sup> Do not use *Dow Corning*<sup>®</sup> RTV Catalyst S or F when molding polyesters because the polyester can be inhibited.

## HOW TO USE

### Preparation of Units

To ensure maximum reliability and complete environmental protection, the following procedure should be followed:

1. Clean assembly of all contaminants such as oil, grease, solder flux, moisture and dirt.

2. For strong adhesion, dip, spray or brush surfaces with *Dow Corning*<sup>®</sup> 1201 RTV Primer and allow to cure at least 30 minutes. Silicone rubber surfaces should not be primed, but should be abraded and cleaned.

### Catalyst Selection

A common catalyst concentration is 10 percent by weight of the RTV base. Varying the catalyst concentration will change the curing rate as indicated in Table II. Decreasing the catalyst level will slow the cure and give longer working and demold times.

*Dow Corning*<sup>®</sup> RTV Catalyst 4 is used where very fast curing is necessary for polyester molds. The recommended mixing ratio is 200:1.

*Dow Corning* RTV Catalyst F is used for high speed production. It is ideally suited for use with automated mixing-dispensing equipment, where the mixing is done in a mixing head immediately before dispensing.

*Dow Corning* RTV Catalyst F will lose its activity rapidly when exposed to air. Keep all catalyst containers tightly closed when not in use.

### Mixing

*Dow Corning* 3110 RTV Rubber base should be stirred before using, since filler separation may occur upon prolonged standing.

Catalysts can be added to the base material in its shipping container or any clean, dry container. If vacuum deairing is planned, the container should be no more than one-half full to allow for the expansion during the vacuum cycle.

Either hand mixing or mechanical mixing is satisfactory. With either method, care should be taken not to whip large amounts of air into the mixture. Avoid vigorous mechanical mixing since sufficient frictional heat may be generated to accelerate the cure rate.

<sup>1</sup>A 10:1 mixing ratio is not recommended for *Dow Corning* RTV Catalyst 4.

**TYPICAL PROPERTIES**

These values are not intended for use in preparing specifications.

	<i>Dow Corning</i> 3110 RTV Rubber <sup>1</sup>	<i>Dow Corning</i> 3112 RTV Rubber <sup>1</sup>	<i>Dow Corning</i> 3120 RTV Rubber <sup>1</sup>	
<b>Processing Considerations</b>				
	Color .....	White	White	Red
ASTM D 1084B	Viscosity at 25°C (77°F), poise .....	130	280	280
ASTM D 792A	Specific Gravity at 25°C (77°F) .....	1.14	1.30	1.45
MIL-S-23586	Corrosion Resistance .....	Good/Pass <sup>2</sup>	Good/Pass <sup>2</sup>	Good/Pass <sup>2</sup>
<b>Physical and Chemical Properties</b>				
	Radiation Resistance, Cobalt 60 Source, 25°C (77°F), megarads .....	100	100	100
	Useful Temperature Range, °C (°F) .....	-55 to 200 (-67 to 392)	-55 to 250 (-67 to 482)	-55 to 300 (-67 to 572)
ASTM D 2214	Thermal Conductivity, Cenco-Fitch, 25-100°C (77-212°F), gm cal/cm <sup>2</sup> sec-(°C/cm) .....	5.7x10 <sup>-4</sup>	—	7.5x10 <sup>-4</sup>
	Volume Expansion, 25-150°C (77-302°F), cc/cc/°C .....	7.35x10 <sup>-4</sup>	8.85x10 <sup>-4</sup>	10.5x10 <sup>-4</sup>
<b>Mechanical Properties</b>				
ASTM D 412	Tensile Strength, die C, psi .....	400	700	900
ASTM D 412	Elongation, die C, percent .....	175	130	120
ASTM D 2240	Durometer Hardness, Shore A, points .....	45	60	60
<b>Electrical Properties</b>				
ASTM D 150	Dielectric Constant at 25°C (77°F), at 100 Hz .....	2.29	3.25	4.19
	100 kHz .....	2.20	3.20	3.54
ASTM D 150	Dissipation Factor at 25°C (77°F), at 100 Hz .....	0.010	0.030	0.070
	100 kHz .....	0.0010	0.004	0.017
ASTM D 149	Dielectric Strength, 1/16" sample, volts/mil .....	434	545	457
ASTM D 257	Volume Resistivity, 500 V dc, ohm-cm .....	7.3x10 <sup>13</sup>	4.2x10 <sup>13</sup>	2.7x10 <sup>13</sup>

<sup>1</sup>Using *Dow Corning* RTV Catalyst F or S at 10:1 base to catalyst ratio. Wide departures from normal 10:1 ratio may slightly alter physical properties such as hardness and elongation.

<sup>2</sup>With *Dow Corning* RTV Catalysts F and S.

**Specification Writers: Please obtain a copy of the Dow Corning Sales Specification for this product and use it as a basis for your specifications. It may be obtained from any Dow Corning Sales Office, or from Dow Corning Customer Service in Midland, MI. Call (517) 496-6000.**

**Table I: Catalysts**

Catalyst	Color	Consistency	Demold Time	Cure Conditions
F (Fast rate)	light tan	paste	25 minutes - 2 hours	room temperature – any thickness or in confined spaces
S (Standard rate)	light blue	paste	5-12 hours	room temperature – any thickness or in confined spaces
1 (Same as S but no corrosion inhibitor)	light blue	paste	5-12 hours	room temperature – any thickness or in confined spaces
4 (Fast rate, 200:1 ratio, no corrosion inhibitor)	clear straw	liquid	10 minutes-2 1/2 hours	room temperature – any thickness or in confined spaces



## B3202 ENERGY MEASUREMENT STACK

### Technical and Usage Information

#### General Information

The B3202 dosimeter stack was developed for penetration range energy measurements in electron beam process systems with probable energies between 50keV and 100keV. The B3202 product was developed for use with the S5100 *WINDose for Excel* software product to provide automated calculation of energy with a plot of the dosimeter measurements with slope and intercept calculations. The product is designed to be implemented as a standard product to be used to monitor the reproducibility of an electron beam operating in the specified energy range. More accurate energy measurements may be possible with this product when incorporating some further application analysis. For details and information on a prescribed method for monitoring energy for this energy range see ISO/ASTM 51818 or contact GEX Corporation.

#### Instructions for Use

The product holds a stack of *B3WINDose*<sup>TM</sup> dosimeters. The average batch thickness of the dosimeters is found on the dosimeter box. The B3 radiochromic film material is polyvinyl butyral (PVB). The paper overlay on each dosimeter provides separation with an approximate 50 micron air gap between film layers.

Keep the B3202 package sealed until just prior to use so that the environmental conditions are maintained. Use a target of 30 kGy or somewhere in the midrange of your calibration curve. For consistent results always target the same dose.

Attach the stack firmly to the material or fixture on which it will be carried on. Be sure to orient the stack in the down web direction as the fixture is designed to move over web rollers in that fashion.

#### Post Irradiation Handling

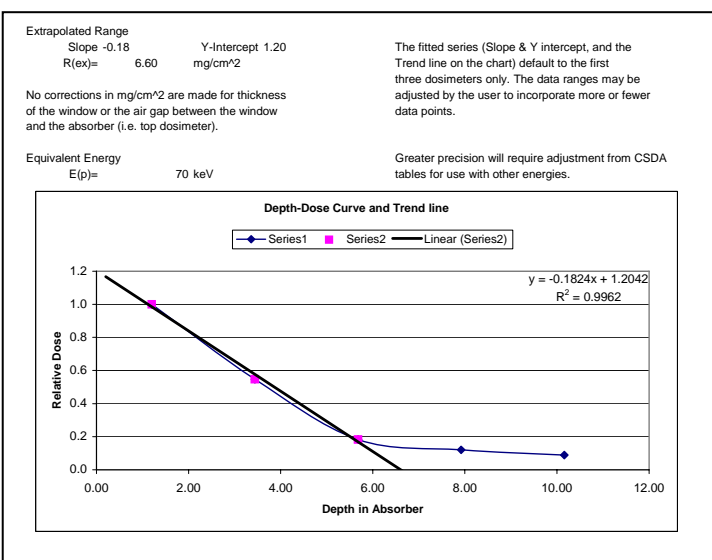
Minimize exposure to ultraviolet sources and follow a post-irradiation protocol as with all B3 dosimeter products to complete any post process color development.

#### Measurements

After exposure, remove the paper overlay from the top of the stack (this may require using a sharp cutting instrument) being careful not to damage the films and read the dosimeters. They are sequentially numbered from lowest to highest top to bottom. Use the automated *WINDose for Excel* worksheet program (S5100) for the dose measurements with automated plotting. For information, contact GEX Corporation.

#### Reference

ISO/ASTM 51818 - Standard Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 80 and 300 keV.



©2002 GEX Corporation. B3WINDose is a trademark of GEX Corporation.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรา ศรีสวัสดิ์ เกิดวันที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2550 และในปีการศึกษา 2551 ได้เข้าศึกษาระดับ ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี ที่ภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย