บทที่ 3

การออกแบบและสร้างระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

จากที่กล่าวมาแล้วว่ากล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์สมรรถนะสูงนั้น อาศัยโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) เป็นส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัส และประยุกต์ระบบฉายภาพรังสีเอกซ์เพิ่มเข้าไป แต่เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีราคาสูงและออกแบบให้ใช้งานเฉพาะด้านจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังนั้นจึงพยายามสร้างระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์สำหรับงานที่ไม่ต้องการกำลังขยายสูงมาก ด้วยการดัดแปรหลอดรังสีแคโทดในส่วนของปืนอิเล็กตรอน ให้สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัส ประกอบเข้ากับอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ และฟิล์มบันทึกภาพถ่ายในห้องสุญญากาศ เพื่อใช้ในการถ่ายภาพโครงสร้างภายในเนื้อวัสดุตัวอย่างที่มีความหนาแน่นต่ำ ด้วยรังสีเอกซ์ในย่านพลังงาน 5-10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (soft x-ray)

3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ

จากการศึกษาโครงสร้างของระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่ประยุกต์การทำงานบนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ และฟิล์มบันทึกภาพ ซึ่งทำงานในคอลัมน์สุญญากาศ ดังนั้นการดัดแปรหลอดรังสีแคโทดให้ทำงานแทนส่วนของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน จำเป็นต้องออกแบบให้มีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน ดังข้อมูลพื้นฐานต่อไปนี้

ก. แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน

หลอดรังสีแคโทดที่เลือกใช้เป็นของบริษัท โตชิบา (Toshiba) รุ่น 5UP1(F) ซึ่งแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเป็นแบบเผาไส้หลอดและแคโทด ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจุดไส้หลอด 6.3 โวลต์ กระแส 0.6 แอมแปร์ ควบคุมโฟกัสด้วยระบบเลนส์ไฟฟ้าสถิตย์ ใช้แรงดันไฟฟ้าสำหรับควบคุมโฟกัส 1,050 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าสูงของวงจรแอโนดรวมกับระบบโฟกัสเท่ากับ 25 กิโลโวลต์ กระแส 100 ไมโครแอมแปร์

ข. ระบบสุญญากาศ

ห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) สำหรับถ่ายภาพและติดตั้งอุปกรณ์จุลทรรศน์รังสีเอกซ์ดัดแปลงจากเครื่องฉาบผิวตัวอย่าง (vaccuum evaporation) ของบริษัท Edwards รุ่น 306 ซึ่งมีปริมาตรบรรจุอุปกรณ์ภายในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 36.5 เซนติเมตร ทำความดันสุญญากาศได้ในระดับ 10^{-5} ทอร์ เพื่อไม่ให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานขณะเคลื่อนที่สู่เป้ากำเนิดรังสีเอกซ์ ระยะเวลาในการทำสุญญากาศ 90 นาที เนื่องจากระบบสูบสุญญากาศความดันสูงเป็นแบบดิฟฟิวชัน (diffusion pump) จึงต้องทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็น (cooling system) ที่อุณหภูมิทางเข้าน้ำ 18 องศาเซลเซียสและทางออกน้ำ 30 องศาเซลเซียส

ค. อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์

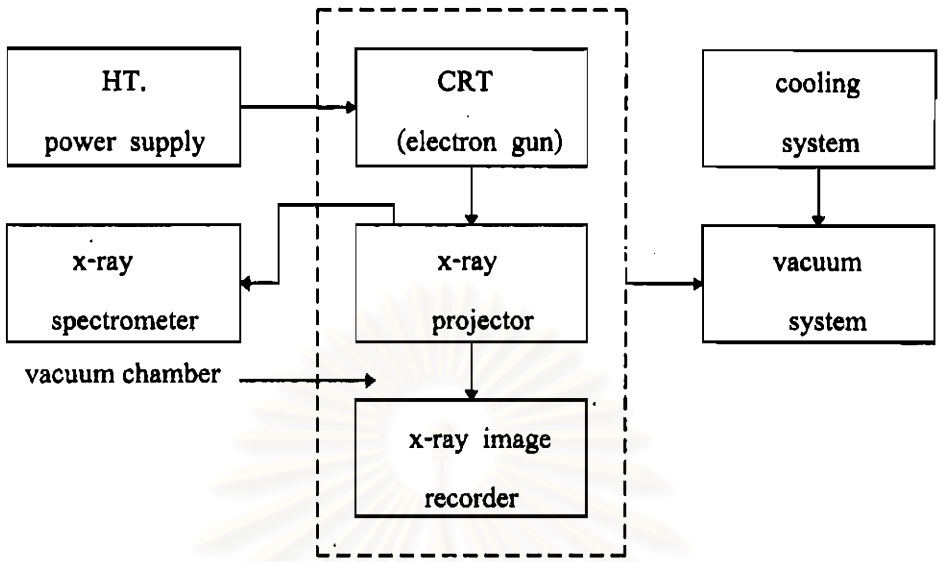
อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์เป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยเรื่อง "A Simple X-Ray Microscope for SEM" [1] ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายภาพที่ได้จากระบบที่จะพัฒนาขึ้นโดยใช้แผ่นเป้ากำเนิดรังสีเอกซ์เป็นแผ่นฟิล์มทองคำ ฉาบบนแผ่นไมกาบาง การที่เลือกทองคำเนื่องจากหาง่าย เตรียมแผ่นฟิล์มได้ง่าย และพลังงานของอิเล็กตรอนจากระบบสามารถกระตุ้น L x-ray (9.71 keV) ได้ให้ความเปรียบต่างของภาพเพียงพอ

ง. ฟิล์มบันทึกภาพ

แผ่นฟิล์มบันทึกภาพ ใช้แผ่นฟิล์มสำหรับจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของ บริษัท Fuji รุ่น F6 Orthochromatic เปรียบเทียบกับฟิล์มถ่ายภาพรังสีเอกซ์ของ Agfa STRUCTURIX D7 ขนาด 5.9 x 8.2 ตารางเซนติเมตร มาตัดแบ่งเป็นขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งเท่ากับขนาดของอุปกรณ์ฉายภาพที่นำมาใช้

จากรายละเอียดของข้อมูลเบื้องต้นสามารถออกแบบระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์กำลังขยายต่ำ ซึ่งดัดแปรแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนจากหลอดรังสีแคโทด ได้ดังภาพโครงสร้างในรูปที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

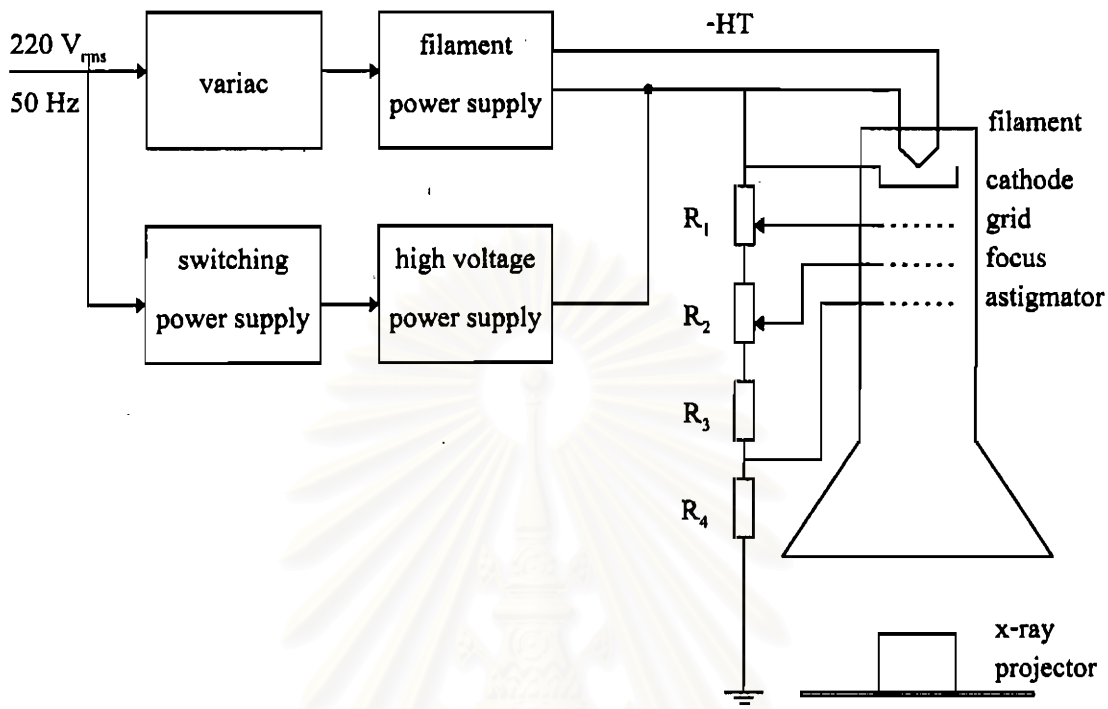


รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

ในแผนภาพรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อุปกรณ์ฉายรังสีเอกซ์และแผ่นฟิล์มบันทึกภาพจะติดตั้งอยู่ภายในห้องสุญญากาศ ซึ่งสร้างความดันสุญญากาศระดับ 10^{-5} ทอร์ จากระบบสูบสุญญากาศ แหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจ่ายให้กับส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน จะทำหน้าที่กำเนิดปริมาณอิเล็กตรอนพร้อมทั้งเร่งอิเล็กตรอนและโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดจุดโฟกัสเล็กตกกระทบบนแผ่นเป้าฟิล์มบางเหนืออุปกรณ์ฉายภาพ เพื่อกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส ส่งรังสีเอกซ์ผ่านชิ้นตัวอย่างเกิดภาพขยายบนแผ่นฟิล์ม นอกจากนี้ภายในห้องวัดได้ติดตั้งหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากแผ่นเป้าผลิตรังสีเอกซ์ ให้ส่งสัญญาณมายังระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีเอกซ์ภายนอกผ่านทางขั้วต่อสาย (feed through)

3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจรกำเนิดลำอิเล็กตรอน

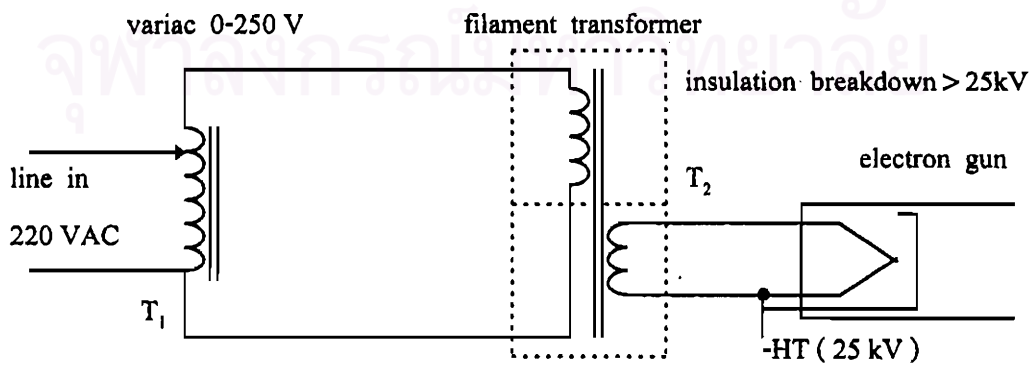
แหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจรกำเนิดอิเล็กตรอน ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ สำหรับวงจรไส้หลอดของหลอดรังสีแคโทด และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงปรับค่าได้จาก 0-25 กิโลโวลต์ สำหรับไบอัสให้วงจรปืนลำอิเล็กตรอน (electron gun) เพื่อเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนและควบคุมโฟกัสของลำอิเล็กตรอน ดังในแผนภาพรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจรกำเนิดลำอิเล็กตรอน

3.2.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด

แหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอดทำหน้าที่เผาไส้หลอดให้ร้อน และปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้จาก 6 ถึง 12 โวลต์ กระแส 1 แอมแปร์ สำหรับแปรเปลี่ยนความเข้มของลำอิเล็กตรอน มีวงจรดังรูปที่ 3.3

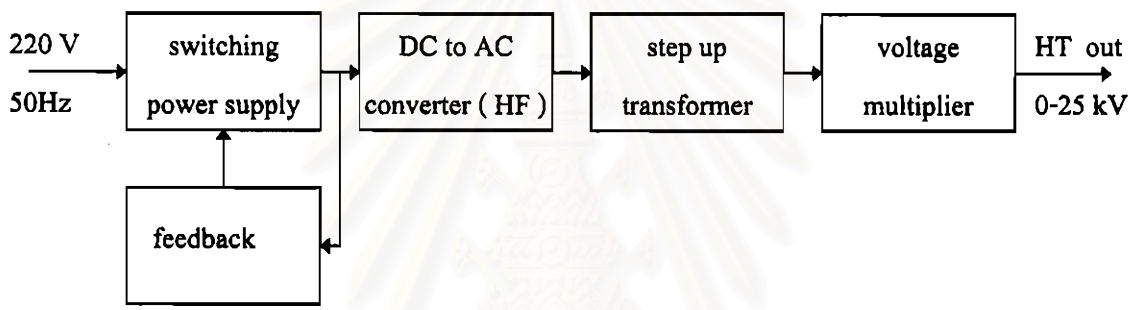


รูปที่ 3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด

วาริแอ็ก (variac) T_1 สามารถแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าได้จาก 0-250 โวลต์ เพื่อจ่ายให้หม้อแปลงไฟฟ้า T_2 ซึ่งเป็นหม้อแปลงลดแรงดันที่มีอัตรารอบ $N_p : N_s = 37:1$ ออกแบบให้ขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิทนการอาร์คจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงได้ถึง 28 กิโลโวลต์

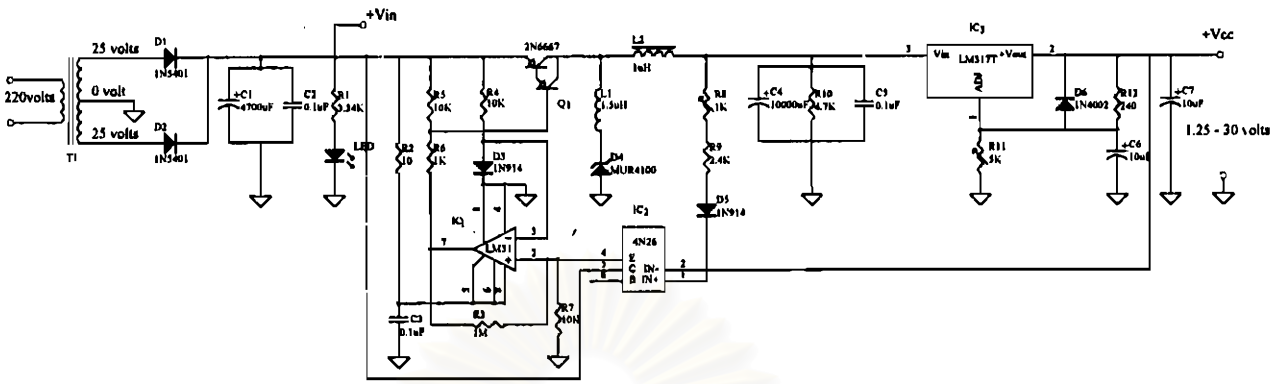
3.2.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (high tension power supply)

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงออกแบบให้กำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงปรับค่าได้ 0-25 กิโลโวลต์ กระแส 100 ไมโครแอมแปร์ สำหรับไบอัสให้วงจรปืนอิเล็กตรอนของหลอดรังสีแคโทดและเป้าผลิตรังสีเอกซ์ เพื่อควบคุมพลังงานของอิเล็กตรอน ความเข้มของลำอิเล็กตรอน และปรับขนาดโฟกัสของลำอิเล็กตรอน มีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรแหล่งไฟฟ้าแรงสูง

ก. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิตชิง (switching power supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจ่ายให้วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง สามารถปรับค่าได้จาก 1.25 ถึง 30 โวลต์ ที่กระแส 1.5 แอมแปร์ ออกแบบให้มีเสถียรภาพสูงทางด้านของโหลด โดยจัดวงจรป้อนกลับระหว่างวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางออกคงที่แบบอันดับ (series regulator) และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยใช้วงจรควบคุมแรงดันทางเข้าของวงจรด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตชิงให้รักษาระดับแรงดันที่พอเหมาะซึ่งวงจรควบคุมแรงดันทางออกแบบอันดับต้องการสำหรับการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง

วงจรควบคุมแรงดันทางออกแบบ series regulator (IC_3) เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM317T จัดวงจรให้ปรับค่าได้ โดยแรงดันทางออกคำนวณได้จาก

$$V_{out} = V_{ref}[1+(R_{11}/R_{12})] + I_{adj}(R_{11}) \quad \text{.....(3.1)}$$

ในกรณีที่ I_{adj} น้อยมากจะได้

$$V_{out} = V_{ref}[1+(R_{11}/R_{12})] \quad \text{.....(3.2)}$$

จากคู่มือ [ภาคผนวก ง] ค่าปรกติของ R_{12} จะมีค่าระหว่าง 120 Ω- 240 Ω และ V_{ref} เท่ากับ 1.25 โวลต์ ดังนั้นเมื่อต้องการแรงดันไฟฟ้าทางออก 1.25-30 โวลต์ และเลือกค่า R_{12} = 240Ω สามารถคำนวณค่าความต้านทานปรับค่าได้ R_{11} ที่ค่าสูงสุด ดังนี้

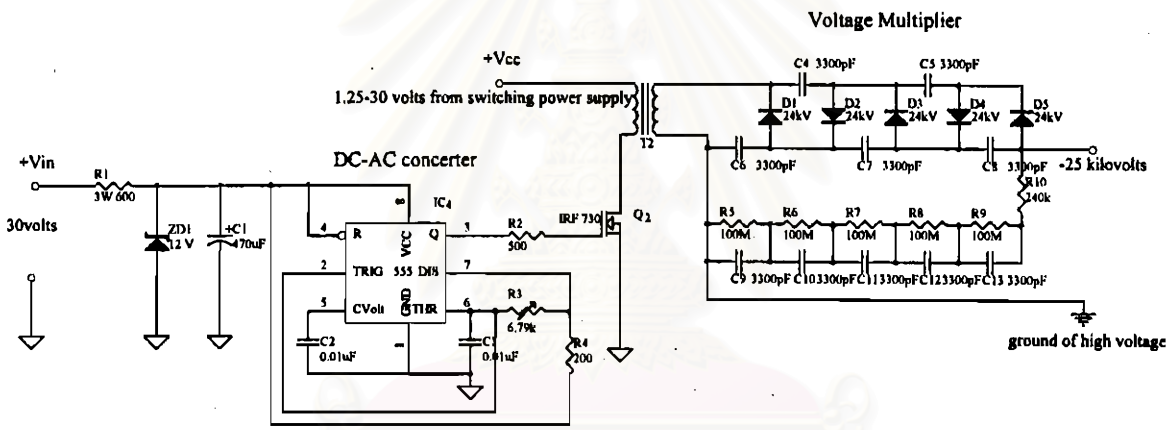
$$R_{11_{max}} = \left[\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1\right]R_{12} \quad \text{.....(3.3)}$$

$$R_{11} = 5.52\ k\Omega$$

แรงดันไฟฟ้าทางเข้าของ IC_3 รับจากวงจรสวิตชิงแบบ Buck ประกอบด้วย Q_1(2N6667) L_1 และ L_2 การปรับค่าของแรงดันทางออกควบคุมด้วยความกว้างพัลส์ (PWM) จากการเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงด้วย ไอซี LM 311 (IC_1) ด้วยการย้อนกลับของแรงดันตกคร่อม IC_3

ผ่านวงจรออปโตคลับเปลอร์ 4N26 (IC_2) กับแรงดันอ้างอิงที่ขากลับสัญญาณของไอซี LM 311 ทำให้วงจรเบสของ Q_1 ได้รับการควบคุมสัดส่วนของความกว้างพัลส์ในการสวิตช์ค่ากระแสไปประจุที่ C_4 เพื่อรักษาระดับแรงดันทางออกให้เพียงพอต่อการควบคุมแรงดันทางออกของวงจร series regulator ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

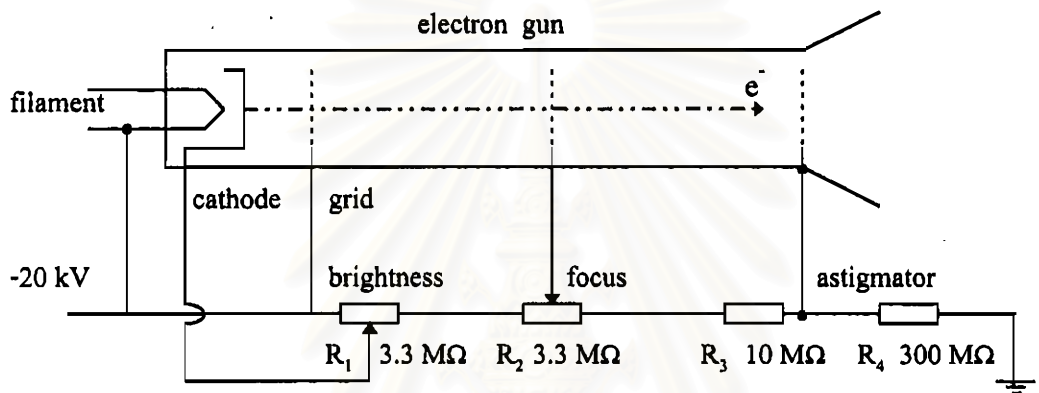
ข. วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง เป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC converter) แรงดันสูงปรับค่าได้จาก 1.2-25 กิโลโวลต์ จ่ายกระแสได้ 100 ไมโครแอมแปร์ เลือกการทำงานแบบ (flyback converter) ทำงานที่ความถี่ 10 kHz ขับหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีอัตรารอบ N_P:N_S เท่ากับ 1:200 ได้แรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลง 5.5 กิโลโวลต์ จากนั้นทวีแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรทวีศักดาไฟฟ้า 5 เท่า ดังวงจรในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

วงจรกำเนิดความถี่ 10 kHz เลือกใช้ไอซีเบอร์ NE555 (IC_4) สร้างสัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมที่มี duty cycle = 51.78 % ขับทรานซิสเตอร์มอสเฟต (Q_2) เบอร์ IRF730 ให้สวิตช์หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเฟอร์ไรต์ที่ออกแบบไว้ในภาคผนวก ก. ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าทางเข้าที่แปรเปลี่ยนได้จาก 1.25 ถึง 30 โวลต์ เป็น 0.2 ถึง 5.5 กิโลโวลต์ จ่ายให้วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า 5 เท่าแบบขั้วบวกเป็นด้านกราวนด์ (positive ground) โดยจัดวงจรตามรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย D_1 ถึง D_5 และ C_4 ถึง C_8 และวงจรกรองกระแสทางออกจัดเป็นวงจรอนุกรมของ R (R_5-R_9) และ (C_9-C_{13}) เพื่อให้ทนแรงดันทะลุได้สูง วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าจะให้แรงดันไฟฟ้าทางออกแปรเปลี่ยนค่าได้จาก 1.2-25 กิโลโวลต์ สำหรับจ่ายให้วงจรปืนอิเล็กตรอนต่อไป

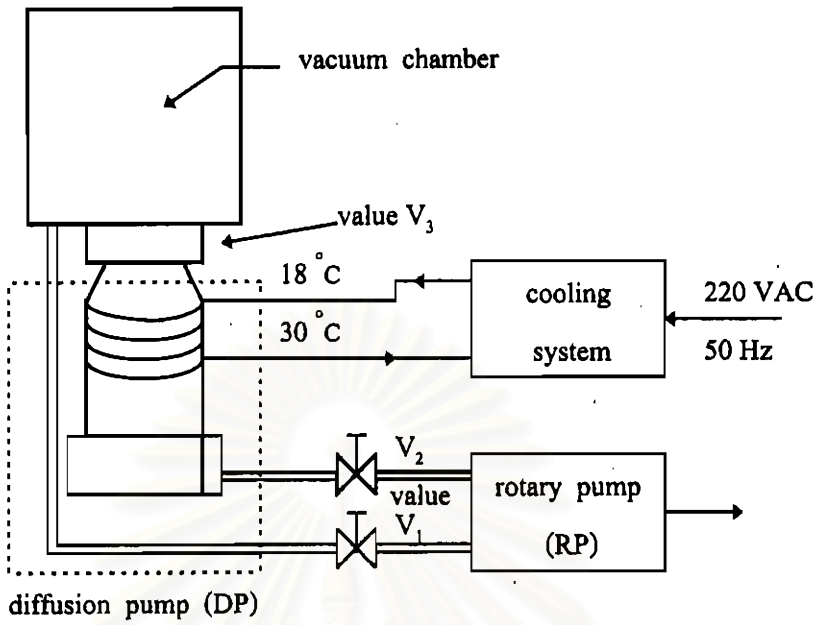
ค. วงจรควบคุมลำอิเล็กตรอน วงจรควบคุมลำอิเล็กตรอนใช้แรงดันไฟฟ้าทางออกจากวงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง จ่ายให้กับวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย R_1- R_4 ป้อนให้แคโทด กริด กริดโฟกัส และแอโนดตามลำดับ เพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงไปยังปลายทาง ความเข้มของอิเล็กตรอนปรับได้ที่ R_1 เป็นการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าของ กริด และแคโทด ส่วนการปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนควบคุมที่กริดโฟกัสด้วยการปรับ R_2 ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.7 และการคำนวณค่าความต้านทานในภาคผนวก ค



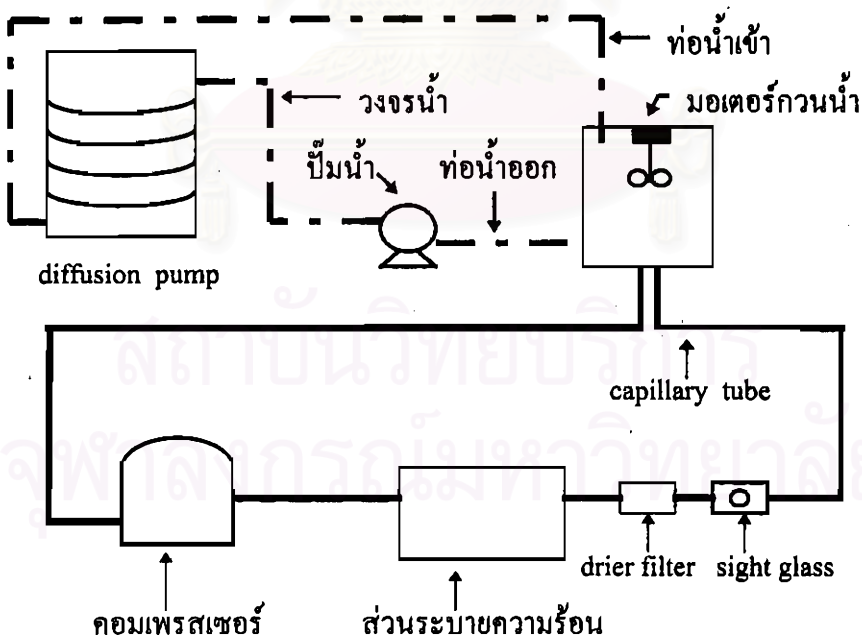
รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมลำอิเล็กตรอนของหลอดรังสีแคโทด

3.3 การออกแบบระบบสุญญากาศ

ระบบทำสุญญากาศเครื่องฉาบผิวโลหะของบริษัท Edwards รุ่น 306 ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีระบบสูบอากาศต่อเนื่องระหว่างเครื่องสูบอากาศแบบโรตารี (rotary pump) และเครื่องสูบอากาศแบบต้มไอน้ำมัน (diffusion pump) ใช้น้ำมัน SANTOVAC-5 สูบอากาศในห้องตัวอย่างได้ในระดับ 10^{-5} ทอร์ ในเวลา 90 นาที มีระบบวาล์วควบคุมขั้นตอนการสูบอากาศในระดับความดันต่ำและสูงที่ V_1, V_2 และ V_3 โดยจะต้องควบคุมอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 18 องศาเซลเซียส และทางออก 30 องศาเซลเซียส จึงได้ออกแบบระบบหล่อเย็นโดยใช้คอมเพรสเซอร์ของตู้เย็นขนาด 1272.676 Btu/hr จัดระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปิด ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.8 และ 3.9

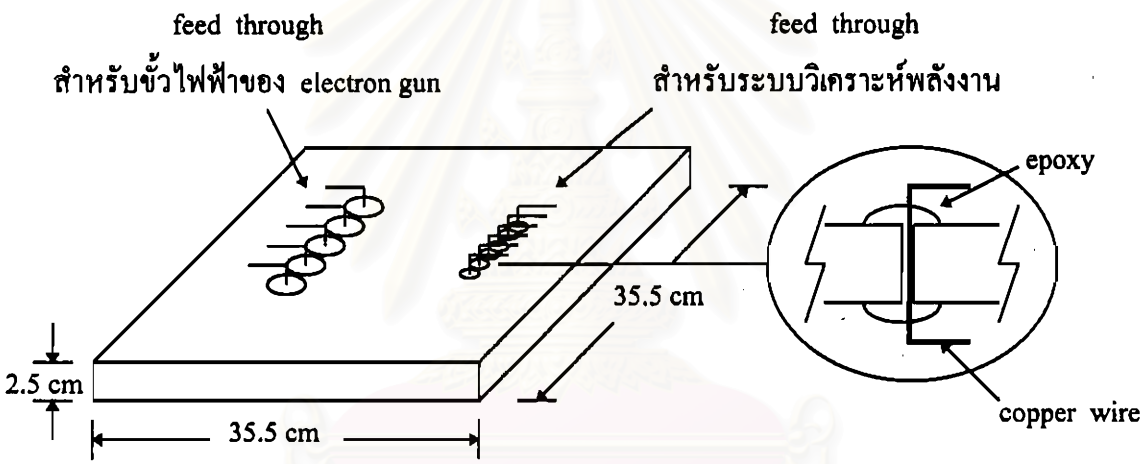


รูปที่ 3.8 แผนภาพของระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.9 แผนภาพการทำงานของระบบหล่อเย็น

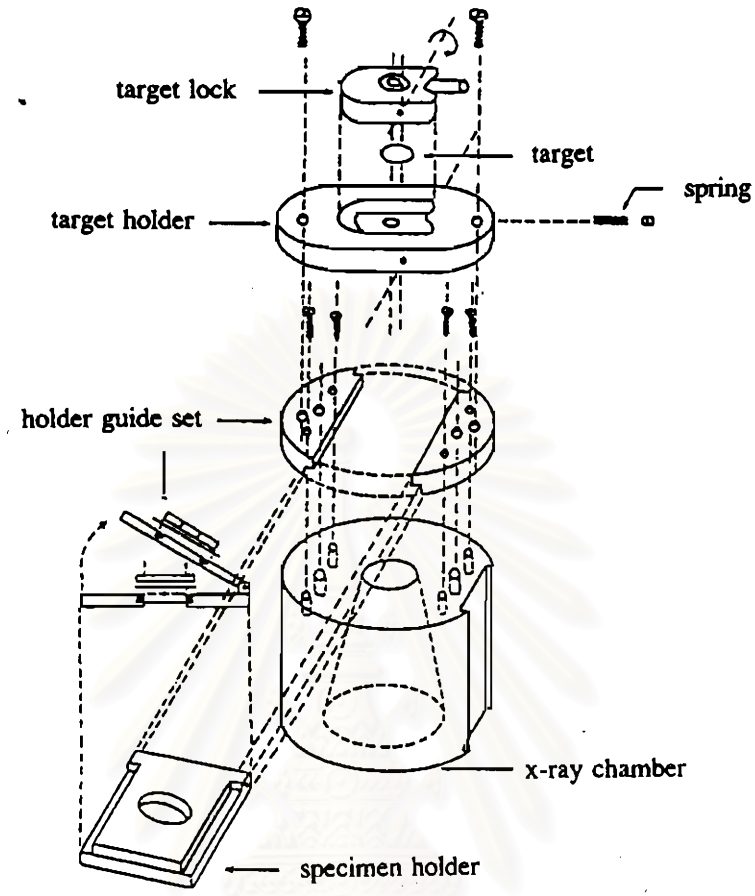
การจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงรวมทั้งการส่งสัญญาณเข้าและออกไปยังอุปกรณ์ภายในห้องตัวอย่างสุญญากาศ ได้ออกแบบแผ่นฝาปิดห้องสุญญากาศด้านบนของครอบแก้ว โดยเลือกใช้แผ่นอะคริลิก (Acrylic) ใส ความหนา 2.5เซนติเมตร ซึ่งสามารถทนแรงดันสุญญากาศระดับ 10^{-5} ทอร์ได้ และเป็นฉนวนไฟฟ้าขนาด 25-30 กิโลโวลต์ ที่ระยะห่างขั้ว 2.5 เซนติเมตรได้ ขั้วต่อไฟฟ้าออกแบบในลักษณะเป็น feed through ทำด้วยลวดทองแดงเจาะผ่านเนื้ออะคริลิกและอุดช่องป้องกันการรั่วซึมด้วยสารอิปีอกซี (epoxy) ซึ่งไล่ฟองอากาศออกขณะปล่อยให้แข็งตัว จัดไว้ 2 ชุด คือ ชุด feed through สำหรับจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ปืนอิเล็กตรอน และชุด feed through สำหรับระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดง feed through บนแผ่นฝาปิดห้องใส่ตัวอย่าง

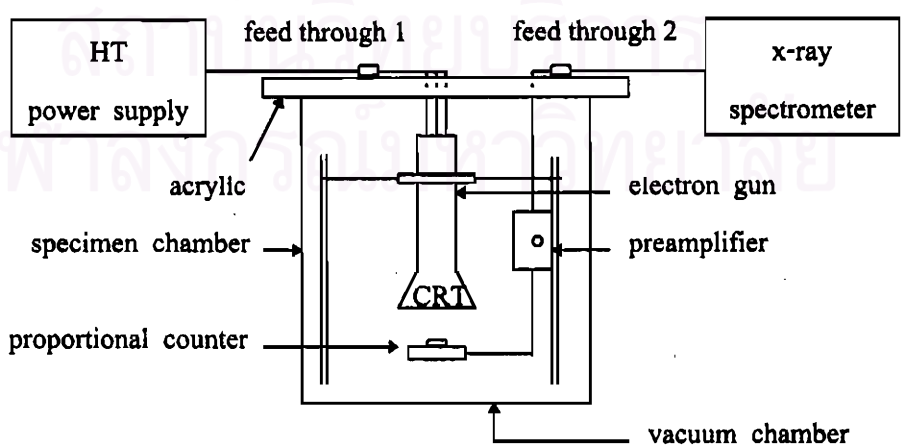
3.4 อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์

อุปกรณ์ฉายรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ชุดอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ที่ออกแบบไว้แล้ว[1] โดยมีโครงสร้างตามแผนภาพรูปที่ 3.11 ด้านบนเป็นชิ้นส่วนยึดจับแผ่นเป้าฟิล์มบาง (target holder) ซึ่งจะต้องเตรียมแผ่นฟิล์มบางของทองคำด้วยเทคนิคการ sputtering ทองบนผิวฐานไมกา ชิ้นส่วนชั้นต่ำลงไปอีกระดับหนึ่งเป็นชิ้นส่วนวางตัวอย่าง ซึ่งจะต้องวัดระยะ d_1 และ d_2 เพื่อกำหนดกำลังขยายของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ส่วนช่องด้านล่างเป็นที่วางแผ่นฟิล์มสำหรับบันทึกภาพถ่ายรังสีเอกซ์



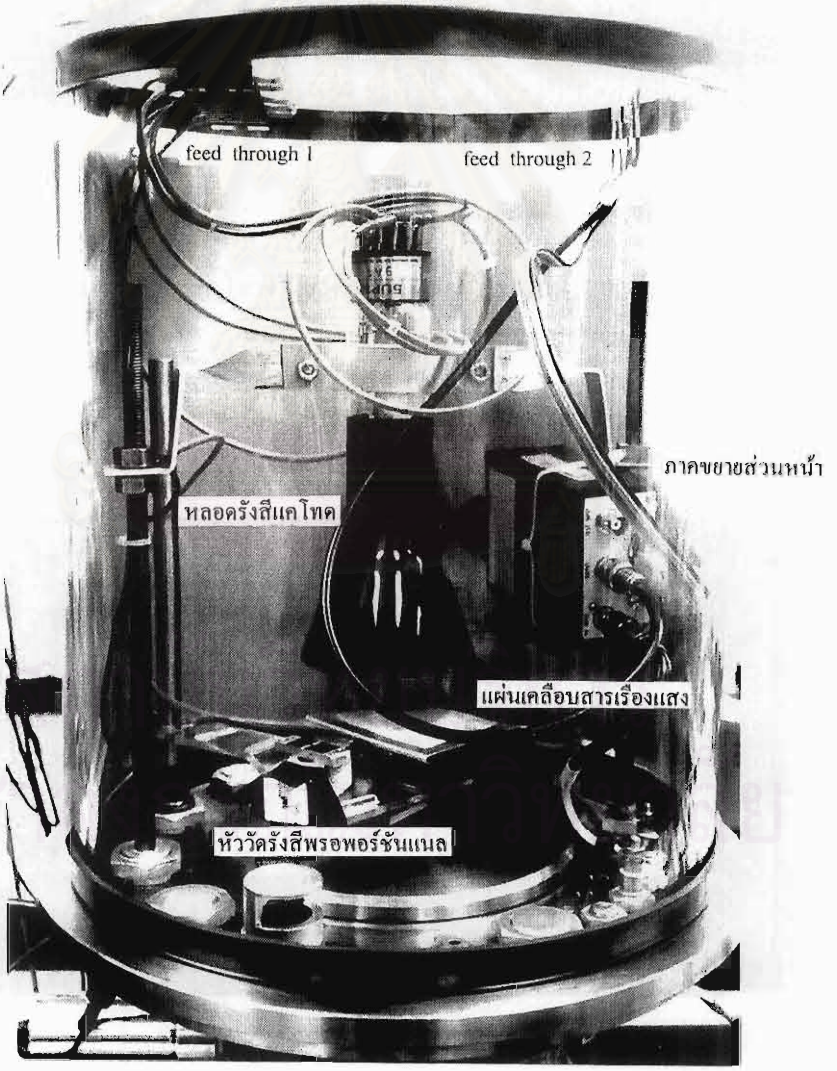
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของอุปกรณ์ฉายรังสีเอกซ์

3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ในห้องตัวอย่างสุญญากาศ

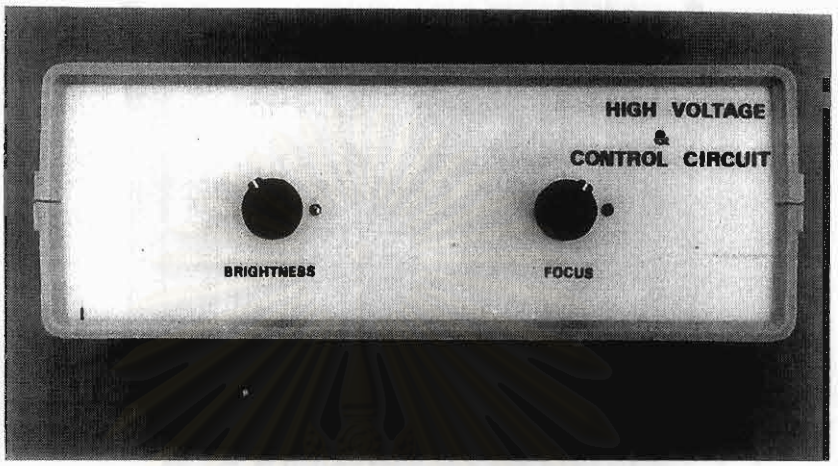


รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองในห้องตัวอย่างสุญญากาศ

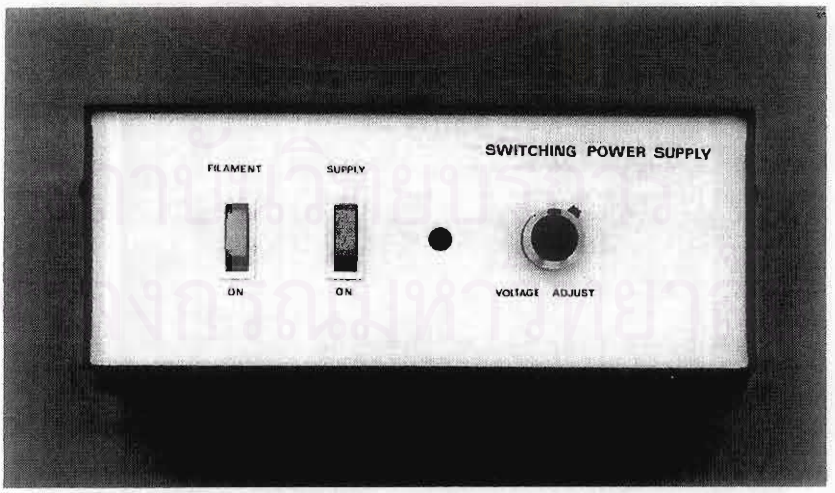
ภายในห้องสุญญากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 36.5 เซนติเมตร ซึ่งด้านบนปิดด้วยแผ่นฝาอะคริลิก จะติดตั้งส่วนกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun) และจ่ายไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าผ่าน feed through ชุดที่ 1 ส่วนหัววัดรังสีพรอพอชันแนลและภาคขยายส่วนหน้ายึดอยู่คนละด้านกัน ใช้ทางผ่านสัญญาณที่ feed through ชุดที่ 2 ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.12 เนื่องจากระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้นไม่สามารถสแกนภาพอิเล็กตรอนบนจอได้ การหาตำแหน่งของเป้าจึงต้องอาศัยสารเรืองแสง (phosphor) เคลือบบริเวณที่ขอบรอบนอกแผ่นเป้าก่อนจะเข้าสู่ตำแหน่งลำอิเล็กตรอนตกกระทบ ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในห้องสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.13 อุปกรณ์ควบคุมต่างๆที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 3.14-3.18 ซึ่งออกแบบให้มีโครงเป็นพลาสติกแยกส่วนและขั้วต่อมีฉนวนหุ้มป้องกันการอาร์คจากไฟฟ้าแรงสูง



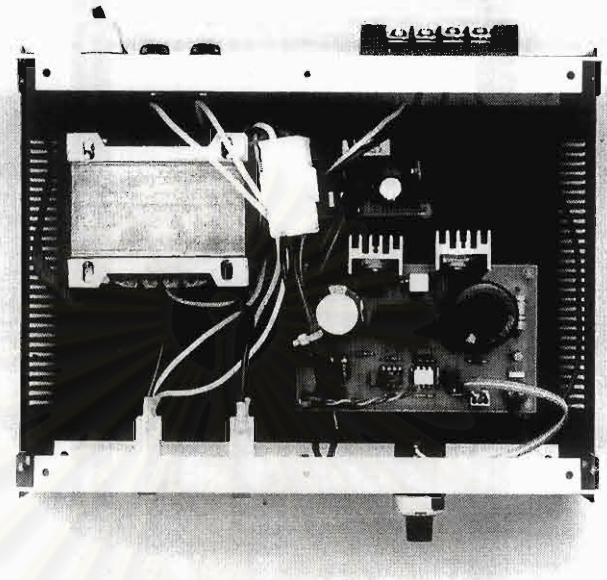
รูปที่ 3.13 ภาพแสดงอุปกรณ์ภายในห้องใส่ตัวอย่างสุญญากาศ



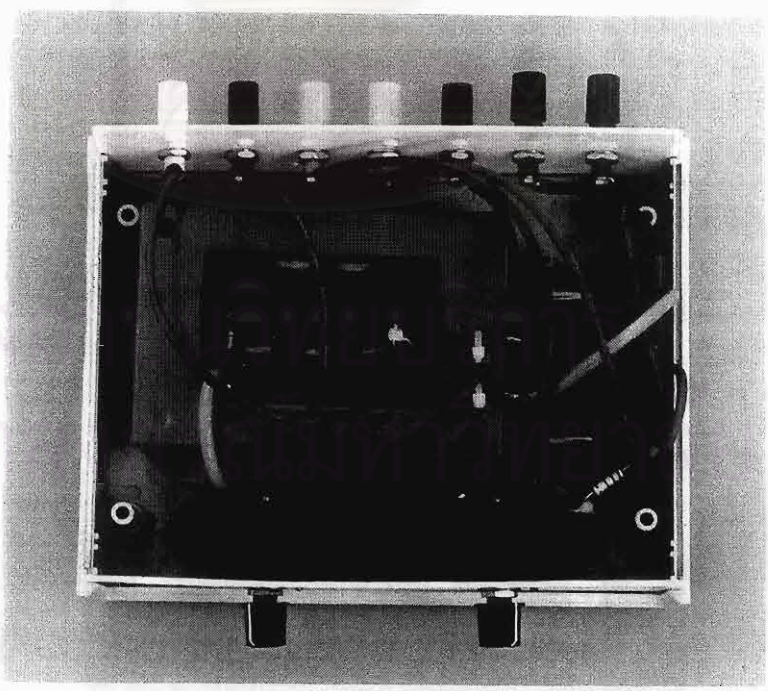
รูปที่ 3.14 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง 25 กิโลโวลต์, 100 ไมโครแอมแปร์



รูปที่ 3.15 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงต่ำแบบสวิตชิง



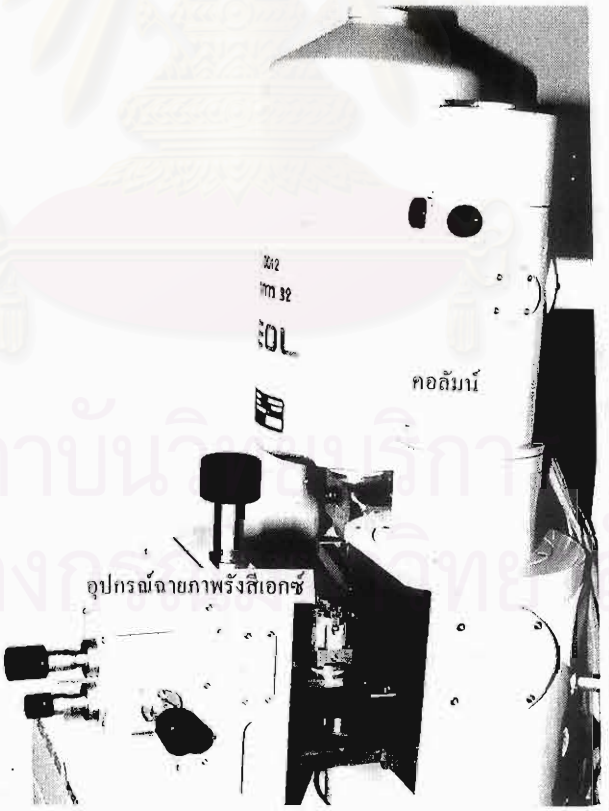
รูปที่ 3.16 การจัดวางอุปกรณ์ภายในเพื่อไม่ให้เกิดการสปาร์ค



รูปที่ 3.17 การจัดวางอุปกรณ์ภายในของวงจรทวีศักดาไฟฟ้าและวงจรของปืนอิเล็กตรอน เพื่อไม่ให้เกิดการอาร์ค

รูปที่ 3.18 ระบบหล่อเย็นเครื่องสูบสุญญากาศ

รูปที่ 3.19 การจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.20 อุปกรณ์ฉายภาพขณะติดตั้งในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ของ JEOL รุ่น JSM-220