

บทที่ 3

การพัฒนาระบบเลนส์อิเล็กตรอน

โครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอนประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ แกนเหล็กอ่อน สำหรับวงจรมแม่เหล็ก (yoke) ขดลวดสนามแม่เหล็ก (coil) และช่องเปิดของขั้วแม่เหล็ก (gap) ซึ่งรูปร่างของแม่เหล็กจะต้องออกแบบให้สอดคล้องกับหน้าที่ของเลนส์ ที่สำคัญ คือ ต้องออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบสุญญากาศและสามารถถอดประกอบ เพื่อทำความสะอาดช่องทางผ่านลำอิเล็กตรอนได้สะดวก ในระบบปรับโฟกัสปลายลำอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กมากนั้นจะประกอบด้วยเลนส์อย่างน้อย 2 ชุด คือ เลนส์คอนเด็นเซอร์ (Condenser lens) ทำหน้าที่รวมลำอิเล็กตรอน และเลนส์ออฟเจกทีฟ (Objective lens) ทำหน้าที่ปรับความคมปลายลำอิเล็กตรอน จากงานวิจัยที่ผ่านมา[1] ได้มีการพัฒนาเป็นอิเล็กตรอนสำหรับผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส ซึ่งควบคุมลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์คอนเด็นเซอร์ไว้แล้วนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะออกแบบในส่วนของเลนส์ออฟเจกทีฟเพิ่มเติมเข้าไปกับ โครงสร้างของระบบเพื่อทดสอบผลการควบคุมคุณภาพของลำอิเล็กตรอนในการผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

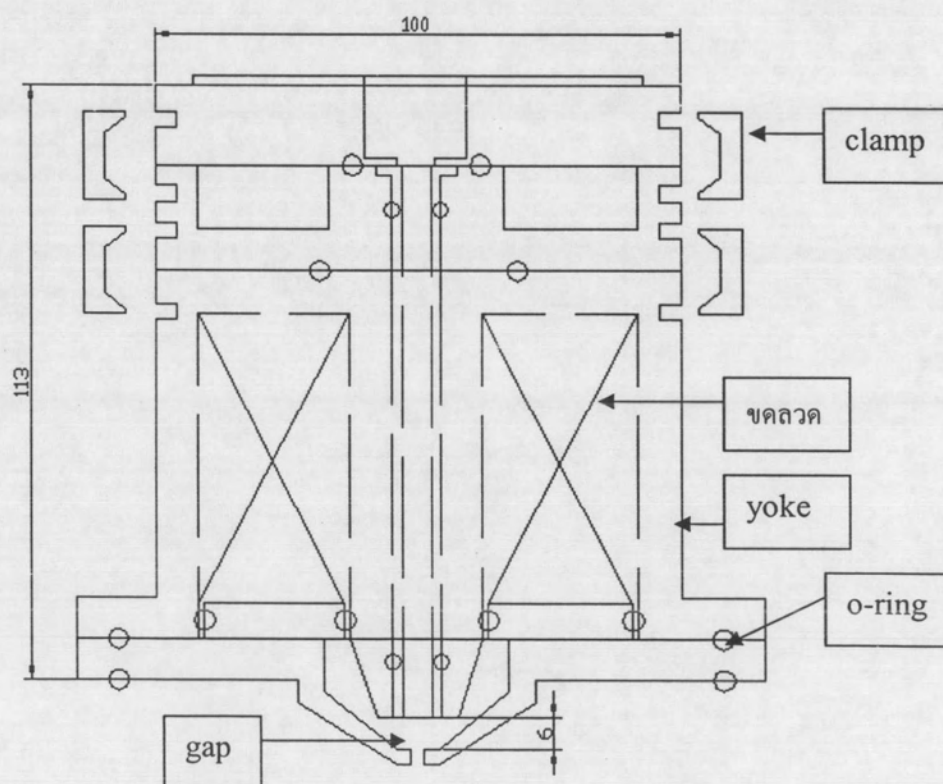
3.1 การออกแบบเลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจกทีฟ

เลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจกทีฟมีโครงสร้างซับซ้อนสูงกว่าเลนส์คอนเด็นเซอร์ เนื่องจากบริเวณช่องเปิดดวงจรมแม่เหล็กจะต้องอยู่ใกล้กับบริเวณปลายลำอิเล็กตรอน เพื่อให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงพอในการปรับโฟกัส แกนเหล็กอ่อนที่เลือกใช้เป็นเหล็กชนิดคาร์บอนต่ำมากที่สุดที่หาได้ในประเทศ (เหล็ก 98% คาร์บอน 0.2% ธาตุอื่น 5%)[ภาคผนวก ข] เนื่องจากต้องการเหล็กที่มีคุณสมบัติของเหล็กอ่อน (soft iron) เพื่อป้องกันการเป็นแม่เหล็กถาวรและเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างในการออกแบบจะคำนึงสิ่งต่อไปนี้

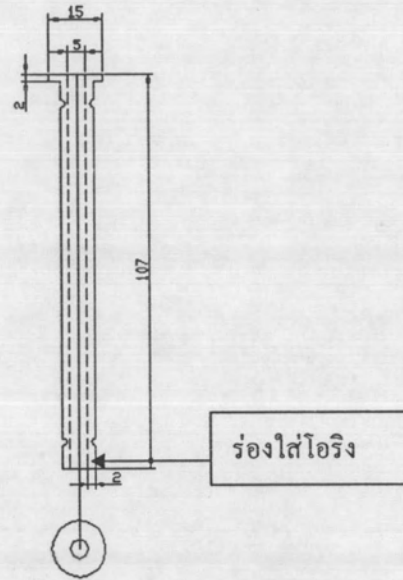
1. ขนาดและสัดส่วนของเลนส์ที่เหมาะสมกับ โครงสร้างระบบกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่มีอยู่
2. ตำแหน่งและขนาดของบริเวณช่องเปิดดวงจรมแม่เหล็ก
3. ความสะดวกในการถอดประกอบชิ้นส่วนเลนส์
4. ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพียงพอกับการใช้งาน
5. การวางตำแหน่ง โอริง (o-ring) เพื่อรักษาภาวะสุญญากาศในคอลัมน์ของระบบผลิตลำอิเล็กตรอน

3.1.1 โครงสร้างของเลนส์ออฟเจ็ทที่ฟ

ขนาดของเลนส์ออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับโครงสร้างของงานวิจัยเดิม ทำให้ได้ขนาดของเลนส์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 101.6 มม. ขนาดความสูง 94 มม. ขนาดท่อทางผ่านของอิเล็กตรอน (bore size, D) มีขนาด 3 มม. และได้นำช่องทางผ่านนี้ไปพิจารณาขนาดของช่องเปิดวงจรมแม่เหล็ก (gap, S) ร่วมกับเส้นกราฟสำเร็จรูปตามทฤษฎีออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้า และจากข้อมูลงานวิจัยด้านเลนส์ออฟเจ็ทที่ฟ[6] เลือกอัตราส่วนของ $S/D = 2$ ดังนั้นระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กจะมีขนาดเท่ากับ 6 มม. เพื่อให้บริเวณเส้นแรงแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอ สำหรับตำแหน่งของปากช่องเปิดวงจรมแม่เหล็กออกแบบให้อยู่ใกล้บริเวณปลายลำอิเล็กตรอนที่จะใช้งาน ดังโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 โดยขนาดและความหนาของแกนแม่เหล็กที่ออกแบบแสดงใน [ภาคผนวก ก] มีการแยกส่วนประกอบพร้อมตำแหน่งของโอริง (o-ring) ที่พยายามใช้ให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดบริเวณรั่วซึมของระบบสุญญากาศอันเป็นจุดอ่อนของการสร้างสภาพสุญญากาศของคอลัมน์ผลิตลำอิเล็กตรอน พร้อมทั้งออกแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างเลนส์และคอลัมน์ที่จำเป็นในการประกอบโครงสร้างระบบเลนส์และทางผ่านของลำอิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 3.2



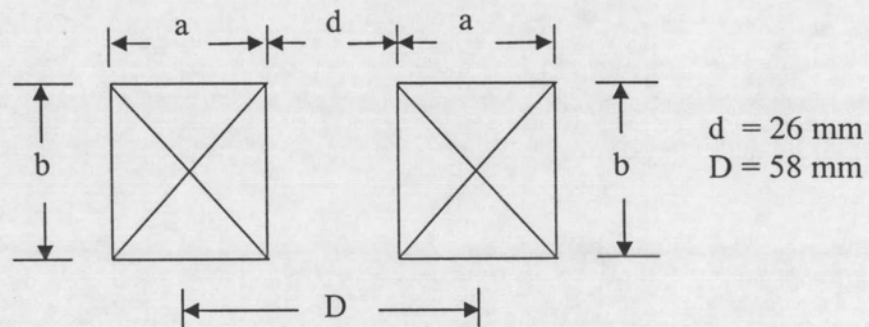
รูปที่ 3.1 แผนภาพตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็ทที่ฟที่ออกแบบขึ้น



รูปที่ 3.2 แผนภาพตัดขวางของท่อนำอิเล็กทรอนิกส์

3.1.2 การออกแบบขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าของเลนส์อิเล็กทรอนิกส์

การคำนวณเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกแบบให้พันอยู่บนบอบบินที่สามารถบรรจุในช่องว่างของแกนเหล็กอ่อน (yoke) ที่ใช้สร้างความเข้มสนามแม่เหล็กซึ่งกำหนดสัดส่วนเพื่อการคำนวณตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากโครงสร้างของเลนส์ออฟเจ็ทที่สามารถกำหนดความต้องการจำนวนรอบขดลวดและกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กได้ดังนี้

$$NI = 3500 \text{ amps-turn}$$

และ กำหนดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแก่เลนส์จ่ายได้ $V = 45 \text{ V}$, $I = 1 \text{ A}$

ดังนั้นจำนวนรอบในการพันเลนส์ $N = NI/I = (3500)/1 = 3500 \text{ turns}$

เส้นลวดทองแดงที่ใช้มีค่า $\rho = 1.9 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$

จากสมการ (18)

$$ab = [4\rho D(NI)^2] / (VI)$$

เมื่อ $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเลนส์ $= 5.8 \text{ cm}$

$a =$ ความหนาของจำนวนชั้นลวดในแนวรัศมี

$b =$ ความหนาของจำนวนชั้นลวดในแนวตั้ง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนของพื้นที่ในแกนแม่เหล็กจะได้

$$\begin{aligned} ab &= [4 \times 1.9 \times 10^{-6} \times 5.8 \times (3500)^2] / (45 \times 1) \\ &= 12 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$a = 2.4 \text{ cm}$, $b = 5 \text{ cm}$, $D = 5.8 \text{ cm}$

หาขนาดลวด, d

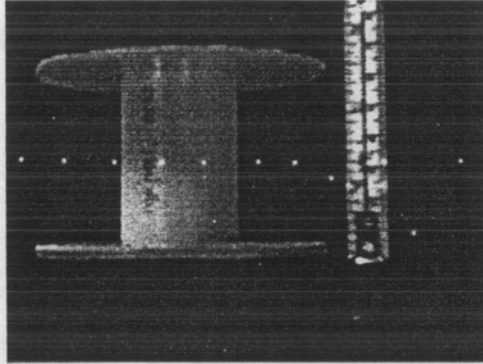
$$\begin{aligned} d &= \sqrt{\frac{ab}{N}} \\ &= \sqrt{\frac{12}{3500}} \\ &= 0.058 \text{ cm} \end{aligned}$$

จากตารางเทียบขนาดลวดจะเท่ากับขนาดลวดมาตรฐาน SWG เบอร์ 24

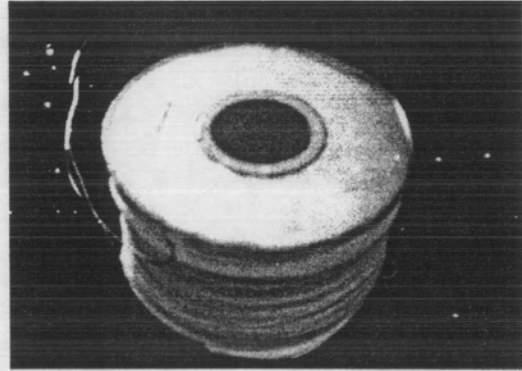
เมื่อเพื่อการพันและรองชั้นฉนวนเพื่อใช้งานจริงมีการปรับค่าต่างๆตามความเหมาะสมดังนี้

- จำนวนรอบที่พันด้วยลวด SWG เบอร์ 24 จริง คือ 2857 turns ดังนั้น NI จริง มีค่าเท่ากับ 2857 amps-turn
- ขนาด a และ b จริง คือ 2.4 cm และ 5 cm

เนื่องจากขนาดของแกนขดลวดที่ออกแบบไม่มีแกนสำเร็จรูปจึงสร้างแกนขดลวด โดยใช้ท่อ PVC และแผ่นอะคริลิกมาประกอบดังรูปที่ 3.4 สำหรับขดลวดที่พันเป็นขดลวดสนามแม่เหล็กแล้วแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แกนขดลวด

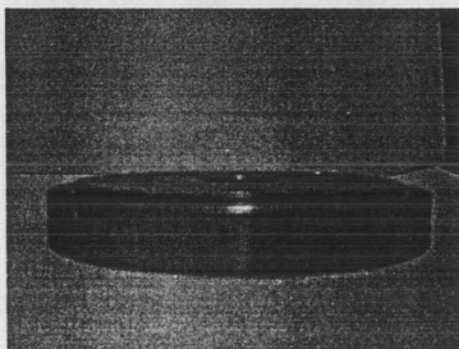


รูปที่ 3.5 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1.3 การสร้างชิ้นส่วนของเลนส์ออฟเจ็ททีฟ

จากแบบโครงสร้างในข้อ 3.1.1 สามารถนำมาถอดแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของเลนส์ได้ 6 ชิ้น วัสดุที่ใช้สร้างชิ้นส่วนหลักในการสร้างวงจรแม่เหล็กของเลนส์อิเล็กทรอนิกส์อนใช้เหล็กอ่อน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่เป็นส่วนประกอบในระบบสุญญากาศและทางผ่านของอิเล็กตรอนใช้ทองเหลืองและทองแดง ส่วนประกอบต่างๆ ที่สร้างขึ้น ได้แก่

1. ส่วนเชื่อมต่อกับปลาย pole piece ของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าของงานวิจัยเดิมมีลักษณะเป็นจานครอบปิดวงจรแม่เหล็กเดิม ออกแบบให้ประกอบกับเลนส์ออฟเจ็ททีฟใหม่ได้โดยยึดผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อมีรูปร่างดังรูปที่ 3.6



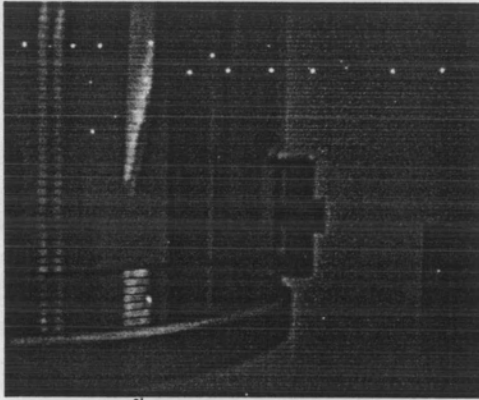
ก. ภาพด้านข้าง



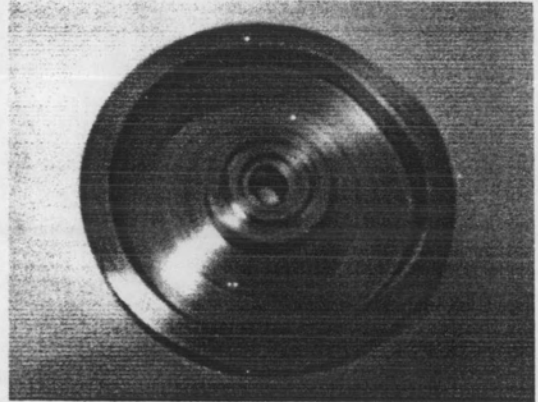
ข. ภาพด้านบน

รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนฝาปิดแกนแม่เหล็กของเลนส์คอนเดนเซอร์

2. ส่วนเชื่อมต่อระหว่างเลนส์คอนเด็นเซอร์เดิมกับเลนส์ออฟเจ็กทีฟที่พัฒนาขึ้น ออกแบบให้มีระยะห่างห่างกัน 2 cm เพื่อป้องกันการรบกวนกันระหว่างสนามแม่เหล็ก การยึดเลนส์ทั้ง 2 เข้าด้วยกันอาศัยชิ้นส่วนยึดเลนส์ (clamp) ที่ออกแบบเป็นปากมูม taper ให้สอดรับกับมูมที่เซาะเข้าไปในชิ้นส่วนเลนส์และส่วนเชื่อมต่อด้านนอกดังรูปที่ 3.7 ก. เมื่อยึดสกรูเข้าปากชิ้นส่วนดังกล่าวจะบีบชิ้นส่วนเลนส์และส่วนเชื่อมต่อให้กดทับ โอรังให้มาแนบสนิทกัน



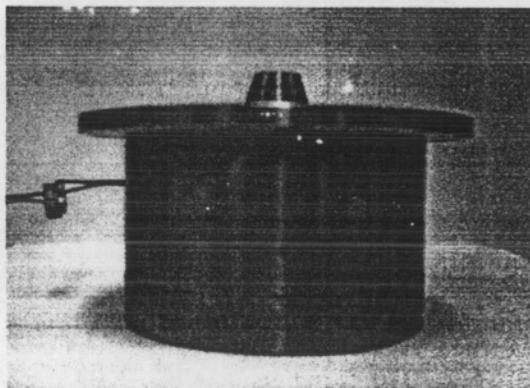
ก. ชิ้นส่วนยึดเลนส์เข้าด้วยกัน



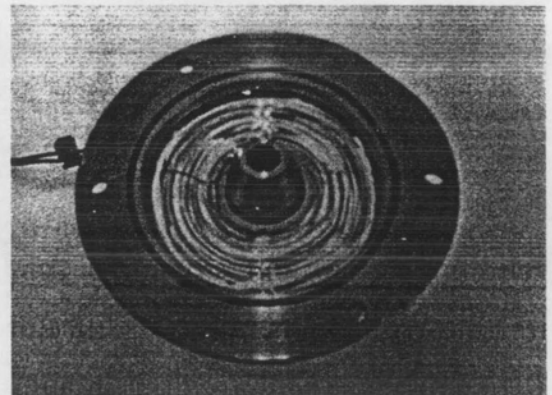
ข. ชิ้นส่วนเชื่อมเลนส์ 2 ชุดเข้าด้วยกัน

รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนสำหรับเชื่อมโยงเลนส์เข้าด้วยกัน

3. แกนปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ ใช้เหล็กแท่งตันกลึงเนื้อในออกเพื่อบรรจุขดลวดสนามแม่เหล็กและสัดส่วนจะต้องสอดคล้องกับงานปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ โดยมูมของปลายวงจรแม่เหล็กด้านในจะต้องสอดรับกับแผ่นงานปิดวงจรแม่เหล็ก เพื่อจะทำให้มีขนาดของช่องเปิดสนามแม่เหล็กพอดีกับที่ออกแบบไว้ ชิ้นส่วนของแกนปิดวงจรแม่เหล็กเลนส์ออฟเจ็กทีฟแสดงในรูปที่ 3.8 ก.และ ข. ส่วนงานปิดวงจรแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 3.9 ก.และ ข.

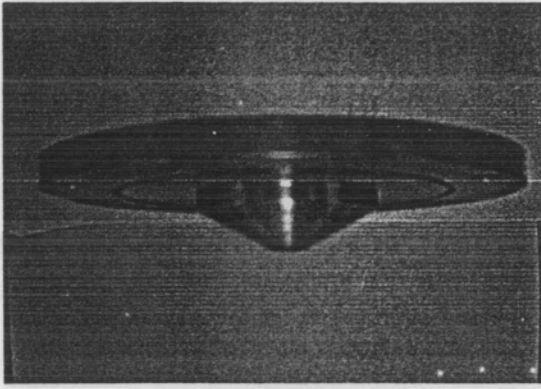


ก. ภาพด้านข้าง

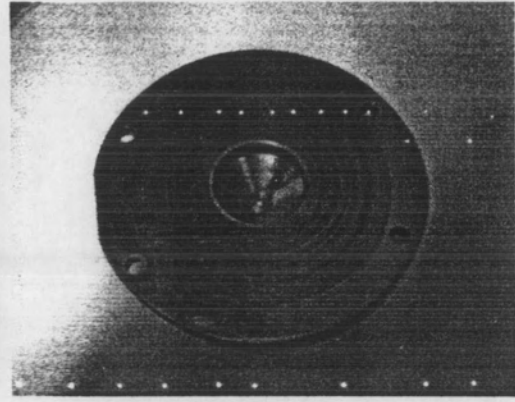


ข. ภาพด้านบน

รูปที่ 3.8 แกนปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ



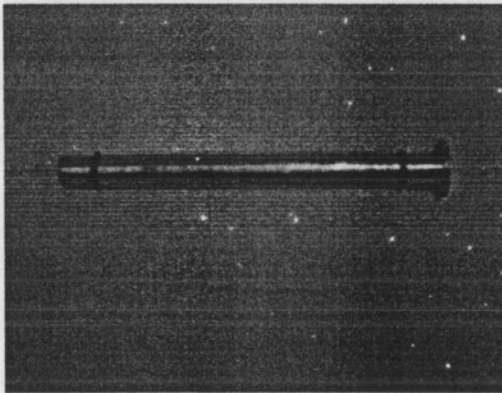
ก. ภาพด้านข้าง



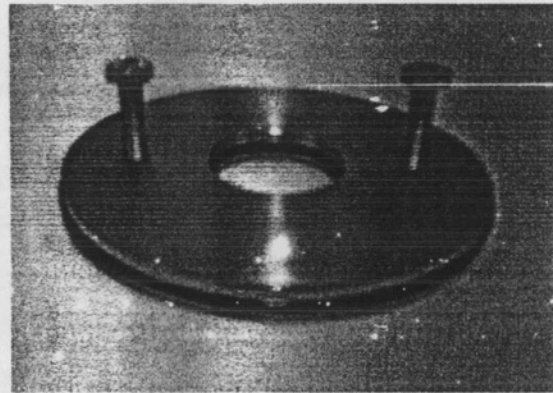
ข. ภาพด้านบน

รูปที่ 3.9 งานปัดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

4. ส่วนประกอบที่ช่วยในการเชื่อมต่อระบบเลนส์และการรักษาภาวะสุญญากาศของคอลัมน์เครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน ได้แก่ ท่อนำลำอิเล็กตรอนที่สอดอยู่ในช่องกลางเลนส์ออฟเจ็กทีฟ ทำด้วยทองเหลืองเจาะร่องใส่โอรังเพื่อทำหน้าที่รักษาสภาพสุญญากาศดังในรูปที่ 3.10 ก. และงานยึดแกนขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้คอลัมน์มีสภาพเป็นสุญญากาศ ออกแบบเกลียวน๊อตสำหรับใส่เพื่อใช้สำหรับถอดประกอบในการทำความสะอาดดังในรูปที่ 3.10 ข.



ก. ท่อนำลำอิเล็กตรอน



ข. งานยึดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

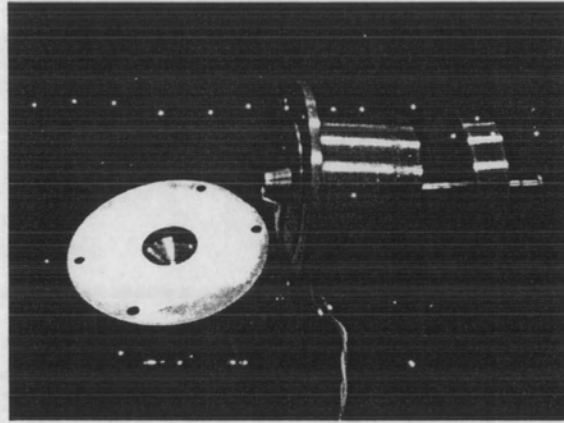
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบที่ช่วยในการเชื่อมต่อระบบเลนส์

3.2 การติดตั้งระบบเลนส์สำหรับปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอน

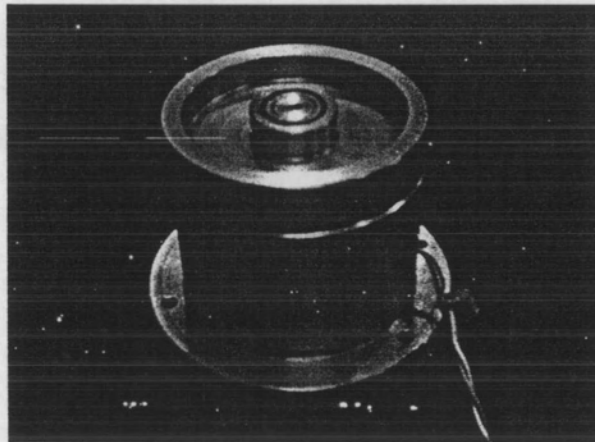
ชิ้นส่วนของเลนส์ต่างๆที่สร้างขึ้นได้นำมาประกอบเป็นเลนส์ออฟเจ็กทีฟและยึดเข้ากับระบบปรับโฟกัสของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนสำหรับผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส เพื่อทดสอบความสามารถในการควบคุมขนาดปลายลำอิเล็กตรอน ด้วยการวิเคราะห์ผลของภาพถ่ายรังสีเอกซ์

3.2.1 การประกอบเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

ในรูปที่ 3.11 เป็นภาพตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆที่สร้างขึ้น เพื่อการถอดประกอบทำความเข้าใจ สะอาดได้ง่ายพร้อมทั้งสามารถรักษาสภาพสุญญากาศของทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนไว้ได้



รูปที่ 3.11 แสดงชิ้นส่วนถอดประกอบของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

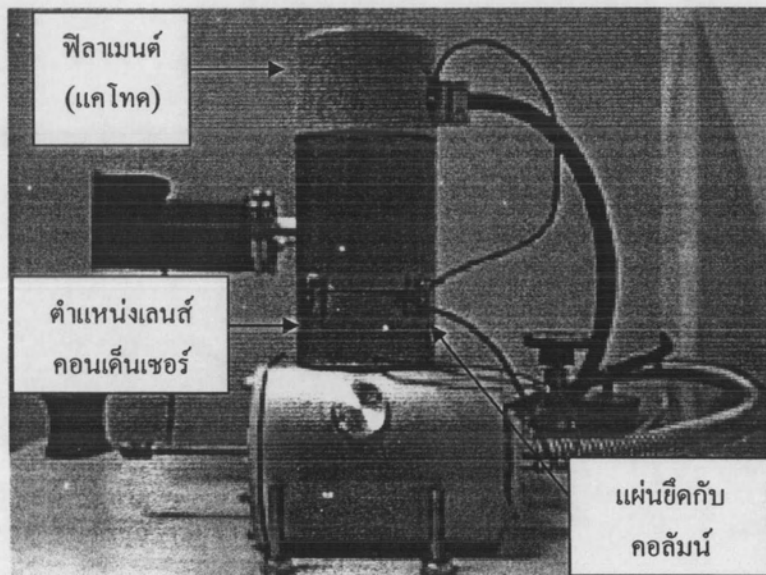


รูปที่ 3.12 ภาพแสดงเลนส์ออฟเจ็กทีฟที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

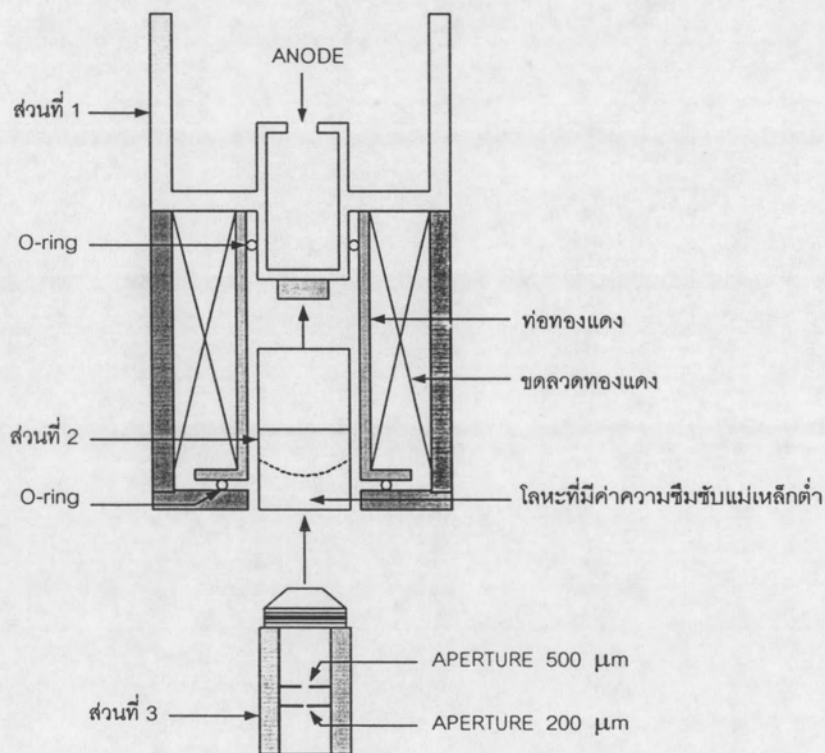
3.2.2 โครงสร้างของระบบเลนส์ที่ประกอบขึ้นเป็นเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน

ระบบเลนส์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเป็นส่วนที่นำมาติดตั้งเพิ่มเข้าไปในคอลัมน์ของเครื่องผลิตลำอิเล็กตรอน โดยอยู่ในตำแหน่งเหนือห้องใส่ตัวอย่างและเชื่อมต่อกับคอลัมน์ส่วนบนที่ประกอบด้วยเลนส์คอนเด็นเซอร์และปืนอิเล็กตรอน ดังแสดงภาพเปรียบเทียบระบบเดิมและระบบใหม่ตามรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

3.2.2.1 โครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนเดิมที่ใช้เลนส์ชุดเดียว

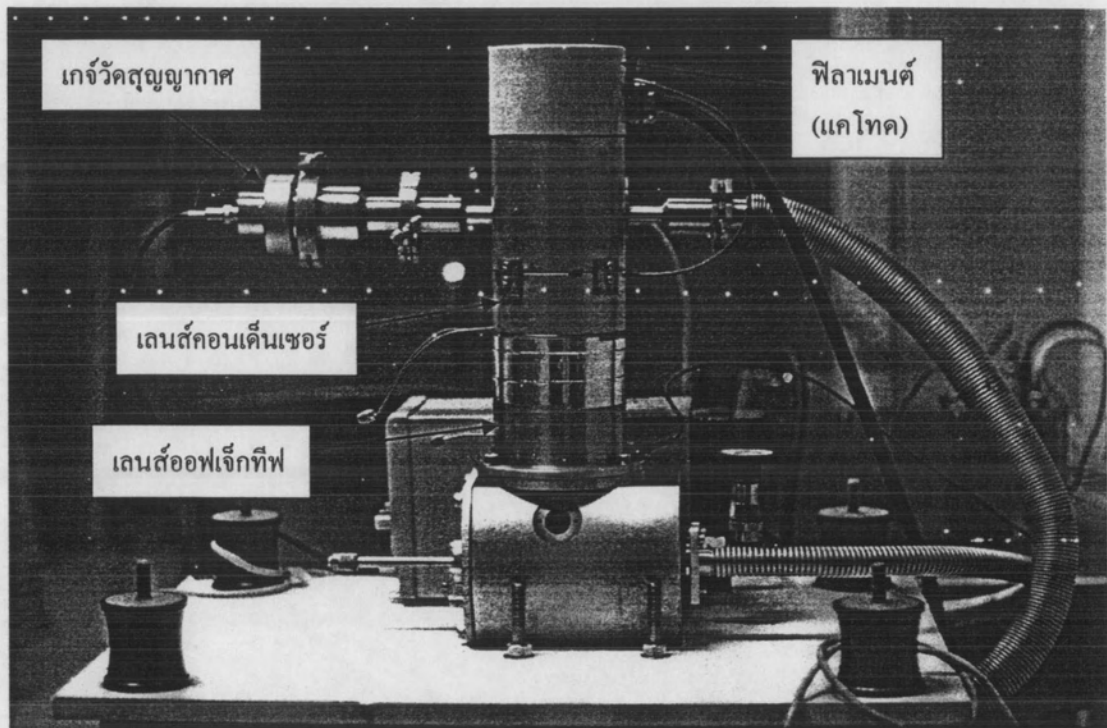


รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอน

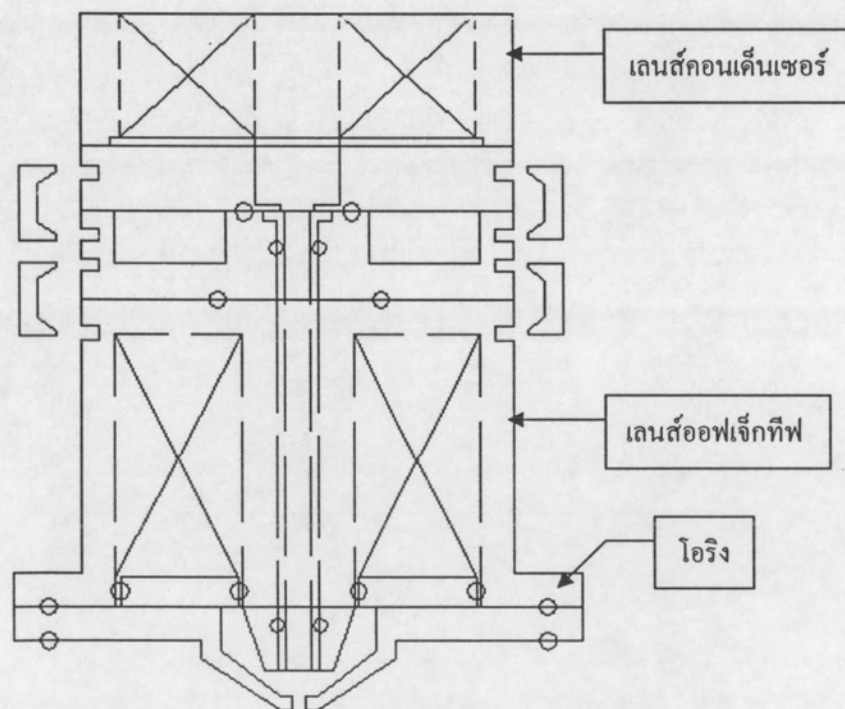


รูปที่ 3.14 โครงสร้างเลนส์เดิมซึ่งเป็นเลนส์คอนเด็นเซอร์

3.2.2.2 โครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนที่ปรับสมรรถนะขึ้น



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นใหม่



รูปที่ 3.16 โครงสร้างระบบเลนส์ใหม่

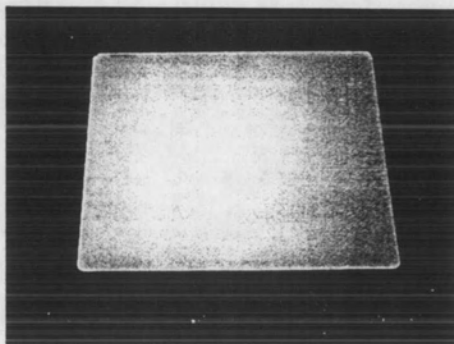
3.3 การจัดอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพของลำอิเล็กตรอน

การทดสอบคุณภาพของเลนส์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เลือกวิธีทดสอบคุณภาพของลำอิเล็กตรอนจากภาพถ่ายลำอิเล็กตรอนตรงบนแผ่นบันทึกภาพ และภาพจากการถ่ายภาพรังสีเอกซ์หลังการทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนกับเป้าผลิตรังสีเอกซ์และอาศัยสมการความคมชัดของภาพถ่ายรังสีคำนวณย้อนกลับ การบันทึกภาพเปลี่ยนจากการใช้ฟิล์มมาเป็นแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate; IP.) ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในวงการถ่ายภาพรังสี แต่เนื่องจากชนิดของแผ่นบันทึกภาพมีหลายชนิดและมีราคาค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องเลือกคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพที่จะใช้งาน

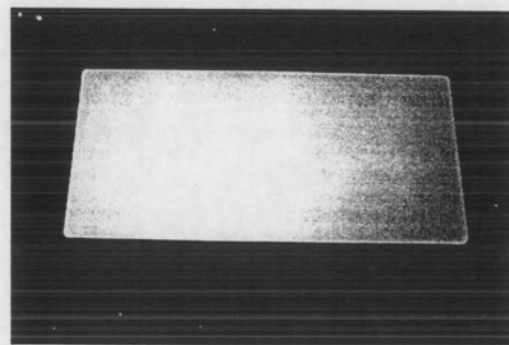
3.3.1 การเลือกชนิดของแผ่นบันทึกภาพ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ไมโครโฟกัสที่มีพลังงานต่ำ (soft x-ray) ระหว่างพลังงาน 5-20 keV เพื่อตรวจวัดคุณภาพของลำอิเล็กตรอน จึงต้องการแผ่นบันทึกภาพที่มีความไวและความละเอียดสูง ซึ่งปัจจุบันมีแผ่นบันทึกภาพที่ใช้งานด้านถ่ายภาพรังสีเอกซ์และอนุภาคพลังงานต่ำอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นบันทึกภาพชนิดความไวสูง แผ่นบันทึกภาพชนิดความละเอียดสูง แผ่นบันทึกภาพชนิดที่ไม่มีการเคลือบผิวสำหรับงานถ่ายภาพ auto radiography เป็นต้น ในห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีมีแผ่นบันทึกภาพของ Fuji ทั้ง 3 รุ่น ได้แก่ รุ่นความไวสูง BAS – MS2040 รุ่นความละเอียดสูง BAS – SR2040 และรุ่นความละเอียดสูงไม่เคลือบผิว BAS – TR2025 สำหรับถ่ายภาพรังสีบีตาพลังงานต่ำจาก H-3

ได้นำแผ่นบันทึกภาพชนิดความละเอียดสูง 2 ชนิด คือ รุ่น BAS-SR2040 และรุ่น BAS-TR2025 ทดสอบการถ่ายภาพรังสีเอกซ์จากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ Fe-55 พลังงาน 5.9 keV ความแรง 0.5 mCi ในบรรยากาศปกติ โดยทำลิ้มทดสอบจากกระดาษขนาดความหนาชั้นละ 0.08 มม. 8 ชั้น โดยจัดการถ่ายภาพรังสีดังแผนภาพรูปที่ 3.17 ข. ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 3 นาที

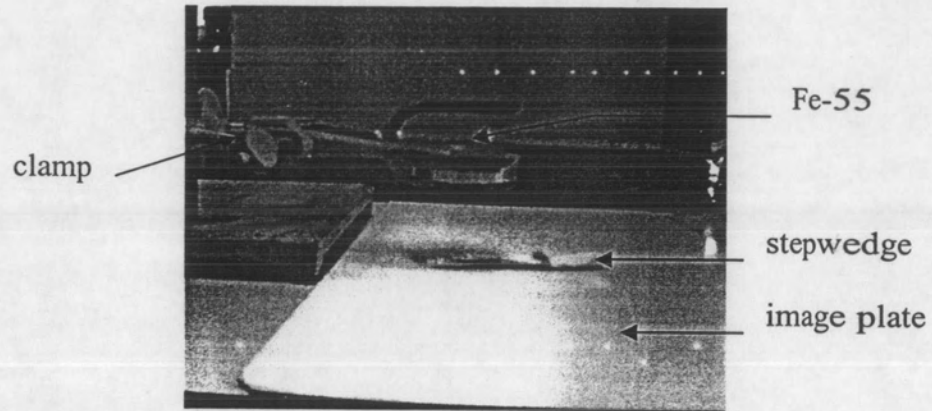


BAS –TR2025



BAS- SR2040

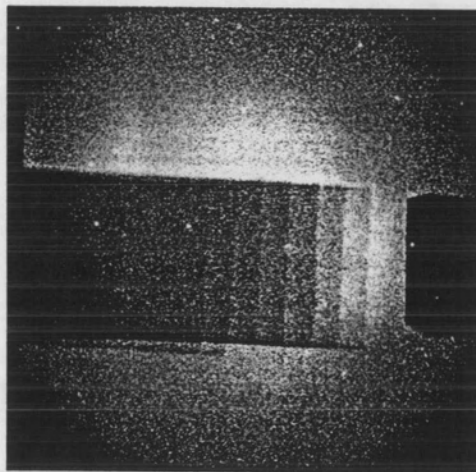
ก. แผ่นบันทึกภาพของ Fuji



ข. อุปกรณ์ทดสอบ

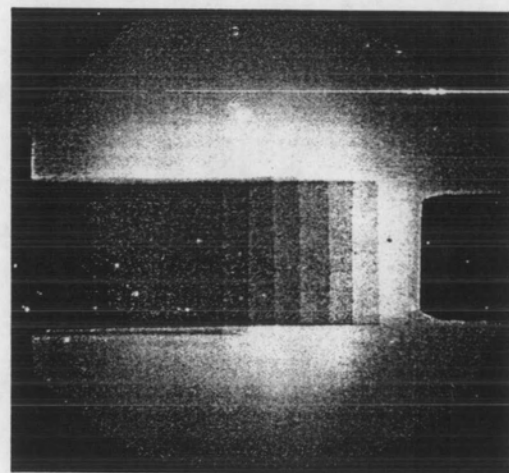
รูปที่ 3.17 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบภาพถ่ายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

ผลของภาพถ่ายรังสีแสดงในรูปที่ 3.18 จะเห็นว่าคุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของลิ้มทดสอบจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ Fe-55 ด้วยแผ่นบันทึกภาพชนิด BAS-TR2025 ให้ความคมชัดและความเปรียบต่าง (Contrast) ของภาพดีกว่า จึงเลือกใช้สำหรับงานทดสอบคุณภาพของลำอิเล็กตรอนในงานวิจัยนี้



ก. ภาพถ่ายจากแผ่นบันทึกภาพชนิด

BAS-SR2040



ข. ภาพถ่ายจากแผ่นบันทึกภาพชนิด

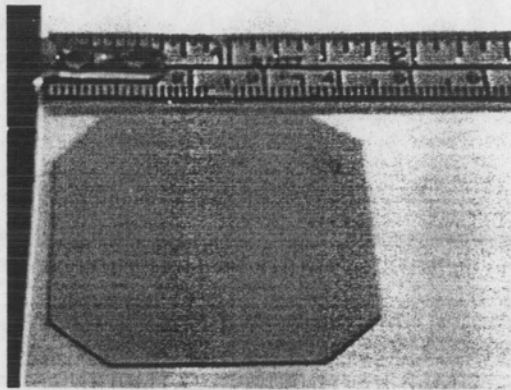
BAS-TR2025

รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบผลของภาพถ่ายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำจากแผ่นบันทึกภาพ

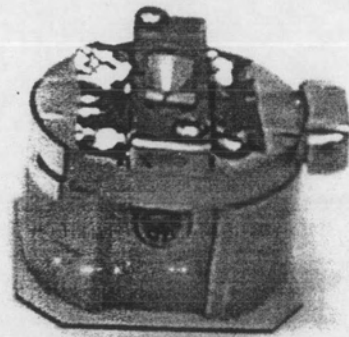
3.3.2 การเลือกอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพของลำอิเล็กตรอน

เมื่อเลือกชนิดของแผ่นบันทึกภาพแล้ว ได้ศึกษาวิธีการ 2 วิธีที่จะทำการตรวจวัดคุณภาพของลำอิเล็กตรอน ได้แก่ การบันทึกขนาดของปลายลำอิเล็กตรอนโดยตรง และการใช้เทคนิค edge

spread จำนวนขนาดจุดโฟกัสจากระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์ โดยเริ่มทดสอบจากลำอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ด้วยอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้เพื่อการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส[1] ในกล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับแผ่นบันทึกภาพที่ตัดให้ได้ขนาดพอดีกับอุปกรณ์ที่จะใช้ถ่ายภาพรังสี ดังในรูปที่ 3.19 ก.และ ข. อุปกรณ์ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ใช้เป่าก้านีดรังสีเอกซ์แบบฟิล์มบางของทองคำเพื่อผลิตรังสีเอกซ์



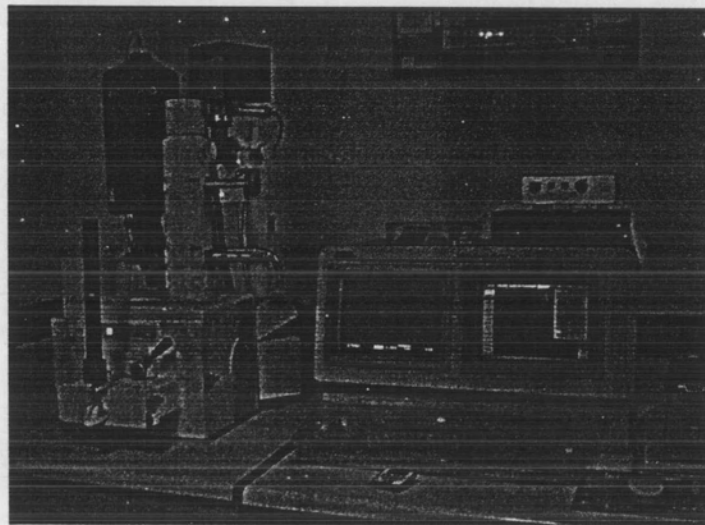
ก. แผ่นบันทึกภาพ BAS-TR2025



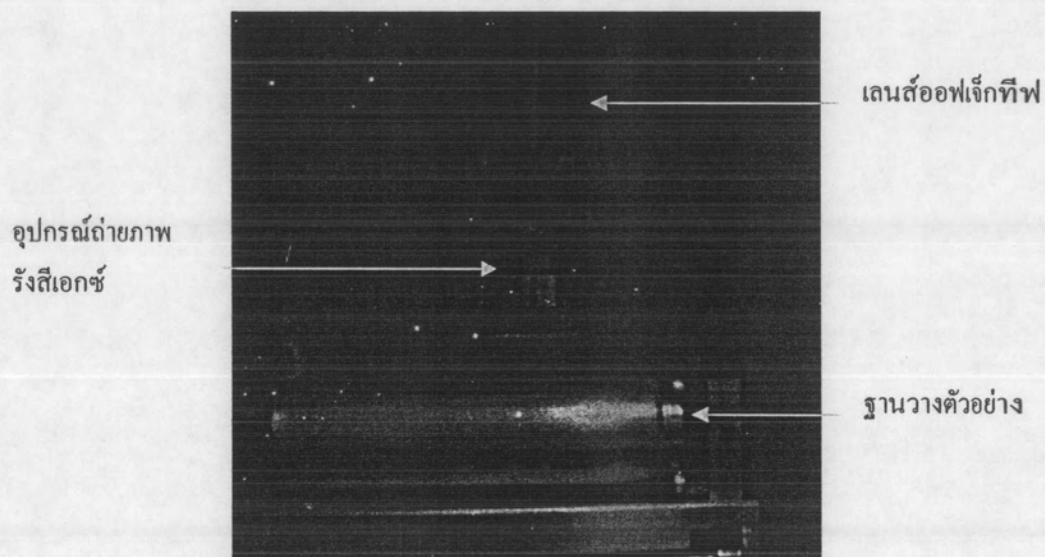
ข. อุปกรณ์ถ่ายภาพรังสีเอกซ์

รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีผู้วิจัยพัฒนาไว้แล้ว[1]

อุปกรณ์ดังกล่าวได้นำไปทดสอบการวัดคุณภาพของลำอิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น JSM-5800LV ของ JEOL โดยใช้พลังงานของลำอิเล็กตรอน 20 keV โดยวิธีที่ 1 ถ่ายภาพปลายลำอิเล็กตรอนด้วยแผ่นบันทึกภาพโดยตรงในเวลาสั้นๆ 5, 10, 15, 20, ..., 70 วินาที วิธีที่ 2 ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ของขอบใบมีดโกนหนวด โดยใช้เวลา 16 นาที จากนั้นนำแผ่นบันทึกภาพมาอ่านภาพถ่ายด้วยเครื่องสแกนภาพรุ่น FLA-5100 ของ Fuji

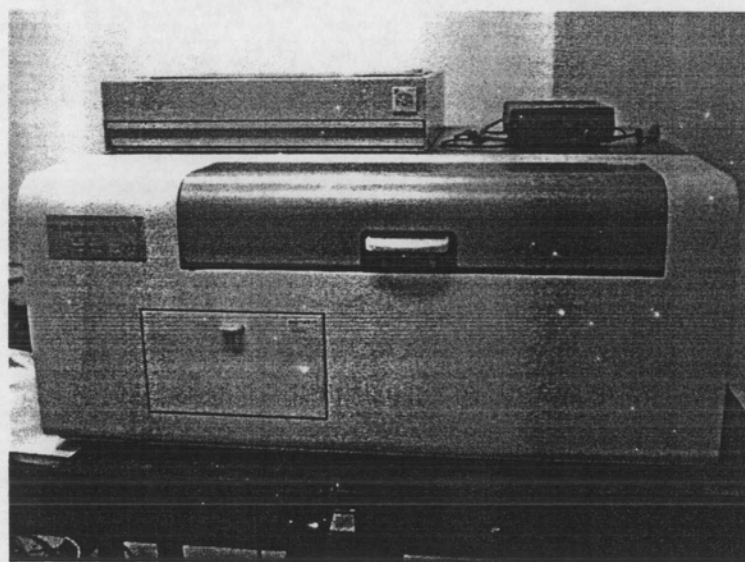


ก. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น JSM-5800LV



จ. แสดงการใส่อุปกรณ์ถ่ายภาพในกล้อง SEM

รูปที่ 3.20 รูปแสดงการจัดอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพลำอิเล็กตรอนด้วยการบันทึกภาพปลายลำอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.21 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100

ผลของภาพถ่ายปลายลำอิเล็กตรอนด้วยวิธีที่ 1 ดังรูปที่ 3.22 พบว่าภาพปลายลำอิเล็กตรอนที่ได้ในเวลาถ่ายภาพที่แตกต่างกัน มีขนาดต่างกัน โดยเวลาถ่ายภาพสั้นจะมีขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนบนแผ่นบันทึกภาพ ขณะที่การใช้ความละเอียดในการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพที่แตกต่างกันระหว่าง $50 \mu\text{m}$ และ $10 \mu\text{m}$ จะให้ขนาดของบริเวณลำอิเล็กตรอนตกกระทบต่างกันอีก เมื่อนำโปรไฟล์ของสัญญาณ PSL (Photo stimulated luminescence) มาพิจารณา

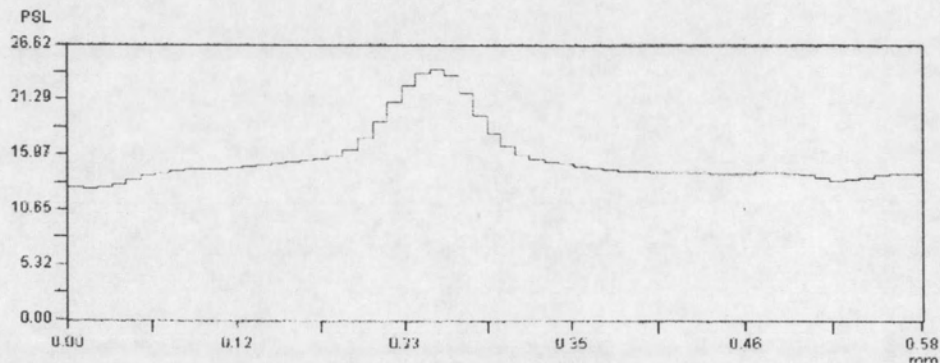
จะมีลักษณะเป็นกราฟเกาส์เซียน (Gaussian shape) ตำแหน่งที่จะอ่านขนาดยังไม่สามารถตัดสินใจว่าจะอ่านที่ใด เนื่องจากไม่สามารถอ้างอิงกับการวิจยใด



ถ่ายที่ 15 และ 20 วินาทีอ่านภาพที่
ความละเอียด 50 μm

ถ่ายที่ 15 และ 20 วินาทีอ่านภาพที่
ความละเอียด 10 μm

ก. ขนาดของบริเวณลำอิเล็กตรอนที่อ่านภาพที่ความละเอียดต่างกัน



ข. โปรไฟล์สัญญาณ PSL ของภาพ

รูปที่ 3.22 ผลการอ่านภาพถ่ายปลายลำอิเล็กตรอนด้วยแผ่นบันทึกภาพ

ผลของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของขอบใบมีดโกนในวิธีที่ 2 พบว่าภาพขอบภาพถ่ายของใบมีดโกนเป็นไปตามธรรมชาติของการเกิดความไม่คมชัดหรือขอบเงามัว (Penumbra) ซึ่งสามารถอ่านโปรไฟล์ของสัญญาณ PSL จากเครื่องอ่านภาพได้ดังรูปที่ 3.23 และสามารถทราบระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์กับชิ้นงานและจากชิ้นงานถึงแผ่นบันทึกภาพ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการความคมชัดของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ประเมินขนาดขอบบริเวณทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนกับเป้าผลิตรังสีเอกซ์ได้จาก

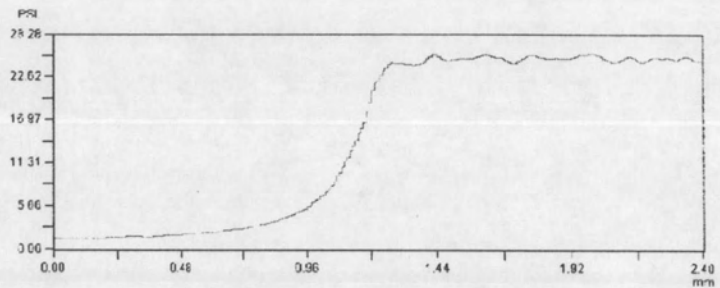
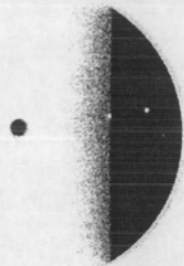
$$F = P(d1/d2) \quad (19)$$

โดย F = ขนาดของจุดโฟกัส

P = ขนาดความไม่คมชัด

d_1 = ระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสกับชิ้นงาน

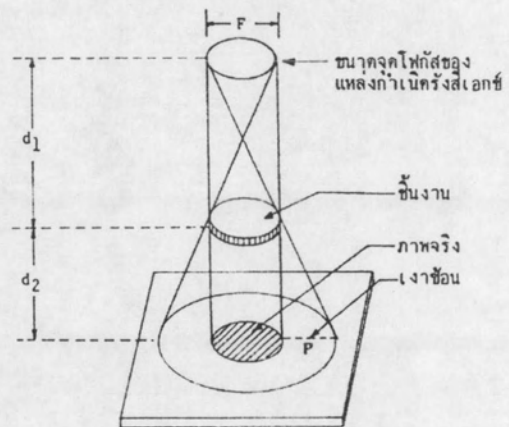
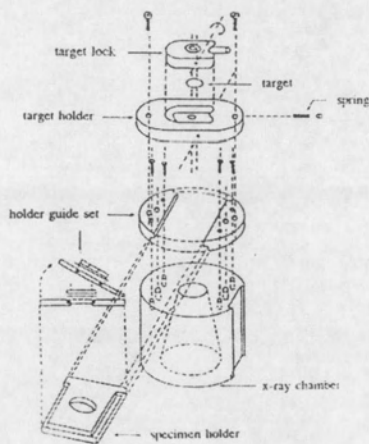
d_2 = ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับแผ่นบันทึกภาพ



ก. ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของขอบใบมีดโกน

ข. โปรไฟล์สัญญาณ PSL ของภาพ

รูปที่ 3.23 ผลการอ่านภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของขอบใบมีดโกน



อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพรังสี

แผนภาพของการเกิดความไม่คมชัด

รูปที่ 3.24 ข้อมูลระยะห่าง d_1 และ d_2 ของอุปกรณ์ถ่ายภาพรังสี

การอ่านขนาดของความไม่คมชัด (P) อาศัยมาตรฐานการอ่านตำแหน่งสัญญาณภาพด้วยเทคนิคของ edge spread ในการวิเคราะห์คุณภาพของภาพถ่ายรังสี[7,8] โดยใช้จุดตัดสัญญาณ PSL ที่ 25% และ 75% มาอ่านค่าขนาด P บนระนาบตามสัญญาณ PSL