การพัฒนาเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดออฟเจ็กทีฟสำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอน

นพวรรณ์ ตัญเจริญสุขจิต* สุวิทย์ ปุณณชัยยะ เดโช ทองอร่าม

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ 0-2218-6781 โทรสาร 0-2218-6780 e-mail:fnespn@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ได้พัฒนาเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดออฟเจ็กทีฟ เพื่อประกอบเข้ากับเลนส์คอนเด็นเซอร์ในการโฟกัสลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ ให้มีความสามารถสูงในการผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส โครงสร้างของเลนส์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย แกนวงจรแม่เหล็กซึ่งทำจากเหล็กคาร์บอนต่ำที่หาได้ในประเทศ มีขนาด ϕ 10 ซม. × 9.4 ซม. เปิดช่องสนามแม่เหล็กขนาด 6 มม. และขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบ 2,857 รอบ มีน้ำหนักรวม 1,800 กรัม สามารถแปรเปลี่ยนสนามแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอได้ระหว่าง 0 - 0.3 เทสลา ผลทดสอบการทำงานของระบบเลนส์ที่พัฒนาขึ้นพบว่า เมื่อใช้พลังงานของลำอิเล็กตรอน 20 keV ที่กระแส 100 µA สามารถปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีเอกซ์ที่มีจุดโฟกัสขนาด 68 µm โดยใช้กระแสของเลนส์คอนเด็นเซอร์ และเลนส์ออฟเจ็กทีฟที่ 30 และ 140 mA ตามลำดับ

คำสำคัญ : เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า เลนส์ออฟเจ็กทีฟ ลำอิเล็กตรอน รังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

Development of an Electromagnetic Objective Lens for Electron Beam Focusing

Noppawan Tancharoensukjit* Suvit Punnachaiya Decho Thong-aram

Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Tel. 0-2218-6781, Fax. 0-2218-6780, e-mail:fnespn@eng.chula.ac.th

Abstract

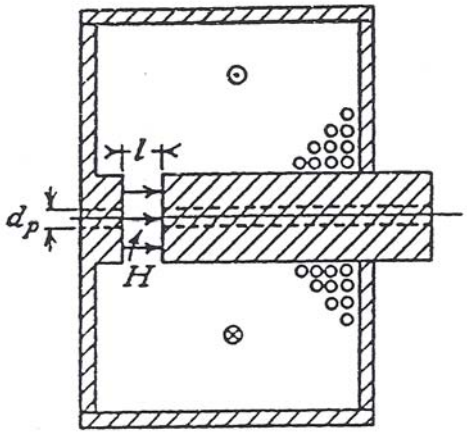
The electromagnetic objective lens had been developed to assembly with the condenser lens for powerful electron beam focusing of an x-ray microfocus generation from a laboratory scale electron gun. The developed lens structure comprised the local low carbon iron of ϕ 10 cm × 9.4 cm magnetic yoke with 6 mm opened magnetic gap and magnetic coil of 2,857 turns of wire. The total weight of the lens was 1,800 grams. The uniform magnetic field ranged between 0 - 0.3 Tesla could be adjusted. In this developed lens testing, the 68 µm x-ray focal spot could be generated by the electron energy at 20 keV and 100 µA beam current. The focusing current of the condenser and objective lens were found at 30 and 140 mA, respectively.

Keyword : electromagnetic lens, objective lens, electron beam, microfocus x-ray

บทนำ

เลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็กทีฟเป็นเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ประกอบอยู่ในระบบจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทำหน้าที่ปรับโฟกัสปลายลำอิลีกตรอนให้มีขนาดเล็กมากที่สุด จึงเป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้ชิ้นตัวอย่างและสามารถนำมาใช้กับระบบเลนส์อิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส โดยโครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอนประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ แกนเหล็กอ่อนสำหรับวงจรแม่เหล็ก (Yoke) ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Coil) และช่องเปิดของขั้วแม่เหล็ก (Gap) ดังในรูปที่ 1 ซึ่งรูปร่างของแกนเหล็กจะต้องออกแบบให้สอดคล้องกับหน้าที่ของเลนส์ ที่สำคัญต้องออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบสุญญากาศ และสามารถถอดประกอบเพื่อทำความสะอาดช่องทางผ่านลำอิเล็กตรอนได้สะดวก ในระบบปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนนั้นจะประกอบด้วยเลนส์อย่างน้อย 2 ชุด[1] คือ เลนส์คอนเด็นเซอร์ (Condenser lens) ทำหน้าที่รวมลำอิเล็กตรอน และเลนส์ออฟเจ็กทีฟ (Objective lens) ทำหน้าที่ปรับความคมปลายลำอิเล็กตรอนที่ระยะโฟกัสซึ่งจะขึ้นกับปริมาณกระแสและองค์ประกอบของเลนส์ดังสมการที่ 1[2]

$$\frac{1}{f} = \frac{q}{8mV}\int_0^l Hx^2\,dx \qquad \text{..... (1)}$$



f = ความยาวโฟกัส

m = มวลของอิเล็กตรอน

V = ศักดาไฟฟ้าเร่ง

q = ประจุของอิเล็กตรอน

d_p = ขนาดช่องลำอิเล็กตรอนผ่าน

H = สนามแม่เหล็ก

l = ระยะช่องว่าง (Gap)

รูปที่ 1 โครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอน

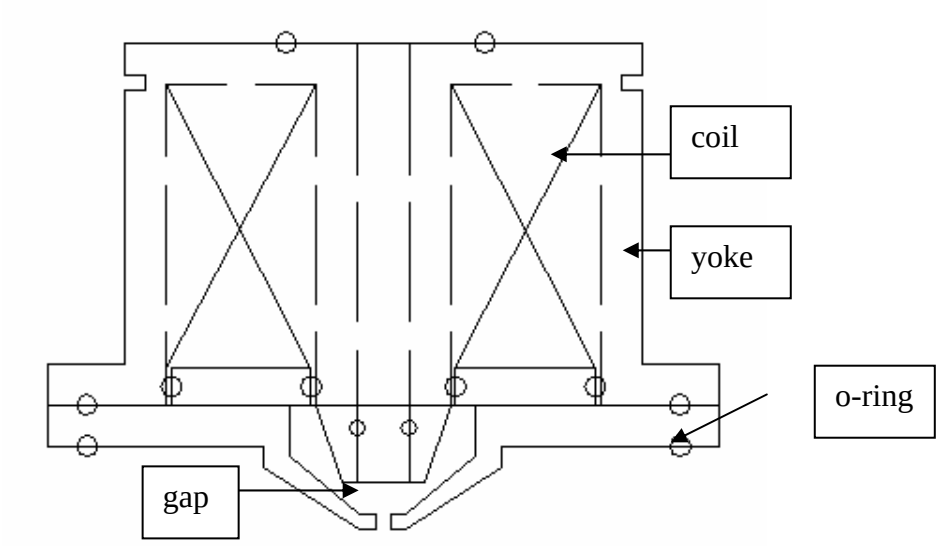
วิธีการออกแบบ

เลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็กทีฟมีโครงสร้างซับซ้อนสูงกว่าเลนส์คอนเด็นเซอร์ เนื่องจากบริเวณช่องเปิดวงจรแม่เหล็กจะต้องอยู่ใกล้กับบริเวณปลายลำอิเล็กตรอน เพื่อให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงพอในการปรับโฟกัส แกนเหล็กอ่อนที่เลือกใช้เป็นเหล็กชนิดคาร์บอนต่ำมากที่หาได้ในประเทศ (เหล็ก 98% คาร์บอน 0.2% ธาตุอื่น 5%) เนื่องจากต้องการเหล็กที่มีคุณสมบัติของเหล็กอ่อน (Soft iron) เพื่อป้องกันการเป็นแม่เหล็กถาวรและเกิดสนามแม่เหล็กตกค้าง โดยทั่วไปการออกแบบเลนส์อิเล็กตรอนจะคำนึงสิ่งต่อไปนี้

1. ขนาดและสัดส่วนของเลนส์ที่เหมาะสมกับโครงสร้างระบบกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่มีอยู่
2. ตำแหน่งและขนาดของบริเวณช่องเปิดวงจรแม่เหล็ก
3. ความสะดวกในการถอดประกอบชิ้นส่วนเลนส์
4. ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพียงพอกับการใช้งาน
5. การวางตำแหน่งโอริง (O-ring) เพื่อรักษาภาวะสุญญากาศในคอลัมน์

โครงสร้างของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

ขนาดของเลนส์ออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับโครงสร้างปืนอิเล็กตรอนของงานวิจัยเดิม ทำให้ได้ขนาดของเลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 101.6 มม. ขนาดความสูง 94 มม. ขนาดท่อทางผ่านของอิเล็กตรอน (Bore size,D) มีขนาด 3 มม. และได้นำช่องทางผ่านนี้ไปพิจารณาขนาดของช่องเปิดวงจรแม่เหล็ก (Gap,S) ร่วมกับเส้นกราฟสำเร็จรูปตามทฤษฎีการออกแบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า และจากข้อมูลงานวิจัยด้านเลนส์ออฟเจ็กทีฟ[3] เลือกอัตราส่วนของ l/d_p หรือ S/D = 2 ดังนั้นระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กจะมีขนาดเท่ากับ 6 มม. ทั้งนี้เพื่อให้บริเวณเส้นแรงแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอ ในส่วนของตำแหน่งปากช่องเปิดวงจรแม่เหล็กนั้นออกแบบให้อยู่ใกล้บริเวณปลายลำอิเล็กตรอนที่จะใช้งานมากที่สุด ดังโครงสร้างในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็กทีฟที่ออกแบบขึ้น

การออกแบบขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าของเลนส์อิเล็กตรอน

การคำนวณเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกแบบให้พันอยู่บนบอบบิน (Bobbin) ที่สามารถบรรจุในช่องว่างของแกนเหล็กอ่อน (Yoke) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ ให้ได้ 0.3 เทสลา (Tesla) ซึ่งสามารถกำหนดสัดส่วนเพื่อการคำนวณตามรูปที่ 3 และสมการที่ 2[2]

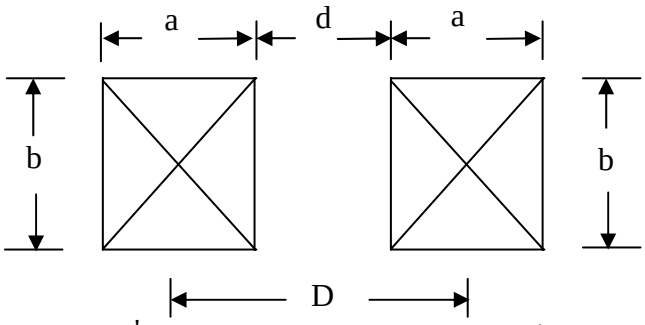
$$ab = [4\rho D(NI)^2] / (VI) \qquad \text{..... (2)}$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเลนส์ ρ = ความต้านทานจำเพาะเส้นลวด

a = ความหนาของจำนวนชั้นเส้นลวดในแนวรัศมี V = แรงดันไฟฟ้าของขดลวด

b = ความหนาของจำนวนชั้นเส้นลวดในแนวตั้ง I = กระแสไฟฟ้าของขดลวด

N = จำนวนรอบของขดลวด



d = 26 mm
D = 58 mm

รูปที่ 3 แสดงขนาดของชุดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

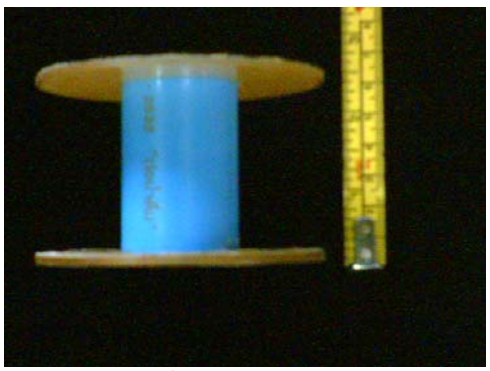
ในทางปฏิบัติเลนส์ออฟเจ็กทีฟสามารถกำหนดความต้องการจำนวนรอบของขดลวดและกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กได้ NI = 3500 amps-turn ถ้าเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้เลนส์มีค่า V = 45 V , I = 1 A จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวด N = NI/I = (3500)/1 = 3500 turns เมื่อเส้นลวดทองแดงที่ใช้มีค่า $\rho = 1.9 \times 10^{-6}$ Ω-cm สามารถพิจารณาสัดส่วนของพื้นที่ในแกนแม่เหล็กได้จากสมการที่ 2 ดังนี้

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

จากโครงสร้างของเลนส์พบว่า a = 2.4 cm , b = 5 cm , D = 5.8 cm หาขนาดลวด, d ได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{ab}{N}} = \sqrt{\frac{12}{3500}} = 0.058 \text{ cm}$$

เมื่อเทียบกับตารางลวดมาตรฐาน SWG จะได้เบอร์ 24 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างแกนขดลวดโดยใช้ท่อ PVC และแผ่นอะคริลิกมาประกอบดังรูปที่ 4 เพื่อพันเป็นขดลวดสนามแม่เหล็กดังในรูปที่ 5



รูปที่ 4 แกนขดลวด

รูปที่ 5 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

การสร้างชิ้นส่วนของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

จากโครงสร้างของเลนส์สามารถนำมาถอดแบบชิ้นส่วนต่างๆได้ 4 ชิ้น วัสดุที่ใช้สร้างชิ้นส่วนหลักในการสร้างวงจรแม่เหล็กของเลนส์อิเล็กตรอนใช้เหล็กอ่อน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่เป็นส่วนประกอบในระบบสุญญากาศและทางผ่านของอิเล็กตรอนใช้ทองเหลืองและทองแดง โดยส่วนประกอบต่างๆ ที่สร้างขึ้น ได้แก่

1. แกนปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ ใช้เหล็กแท่งตันกลึงเนื้อในออกเพื่อบรรจุขดลวดสนามแม่เหล็ก โดยสัดส่วนจะต้องสอดคล้องกับจานปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟและมุมของปลายแกนเหล็กอ่อนด้านในจะต้องสอดรับกับแผ่นจานปิดวงจรแม่เหล็ก เพื่อจะทำให้มีขนาดของช่องเปิดสนามแม่เหล็กพอดีกับที่ออกแบบไว้ ชิ้นส่วนของแกนปิดวงจรแม่เหล็กเลนส์ออฟเจ็กทีฟแสดงในรูปที่ 6 ก.และ ข. ส่วนจานปิดวงจรแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 7 ก.และ ข.

ก. ภาพด้านข้าง ข.ภาพด้านบน

รูปที่ 6 แกนปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

ก. ภาพด้านข้าง ข.ภาพด้านบน

รูปที่ 7 จานปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

2. ส่วนประกอบที่ช่วยในการเชื่อมต่อระบบเลนส์และการรักษาภาวะสุญญากาศของคอลัมน์เครื่องกำเนิดอิเล็กตรอน ได้แก่ ท่อนำลำอิเล็กตรอนที่สอดอยู่ในช่องกลางเลนส์ออฟเจ็กทีฟทำด้วยทองเหลืองเซาะร่องใส่โอริงเพื่อทำหน้าที่รักษาสภาพสุญญากาศดังในรูปที่ 8 ก. และจานยึดแกนขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้คอลัมน์มีสภาพเป็นสุญญากาศ ออกแบบเกลียวน๊อตสำหรับใส่เพื่อใช้สำหรับถอดประกอบในการทำความสะอาดดังในรูปที่ 8 ข.

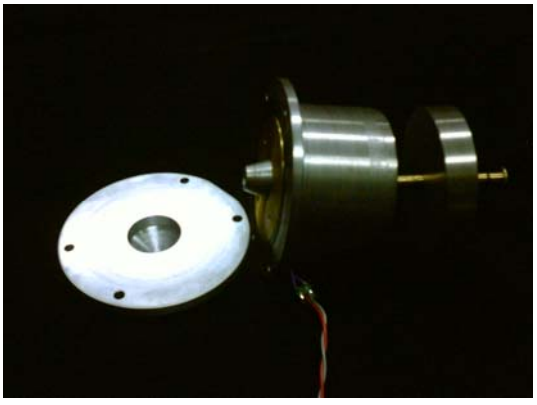
ก.ท่อนำลำอิเล็กตรอน

ข. จานยึดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

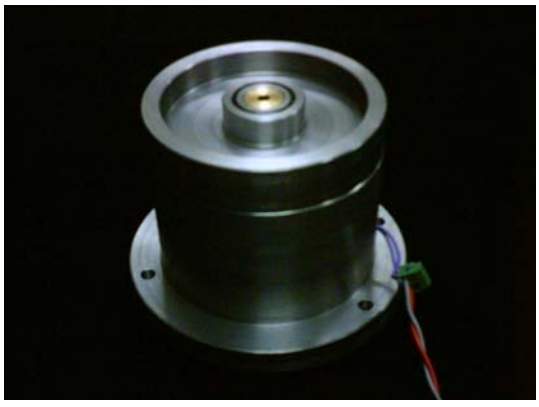
รูปที่ 8 ส่วนประกอบที่ช่วยในการเชื่อมต่อระบบเลนส์

การประกอบเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

ในรูปที่ 9 เป็นภาพแสดงตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆที่สร้างขึ้น สามารถถอดประกอบทำความสะอาดได้ง่ายพร้อมทั้งสามารถรักษาสภาพสุญญากาศของช่องทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนไว้ได้

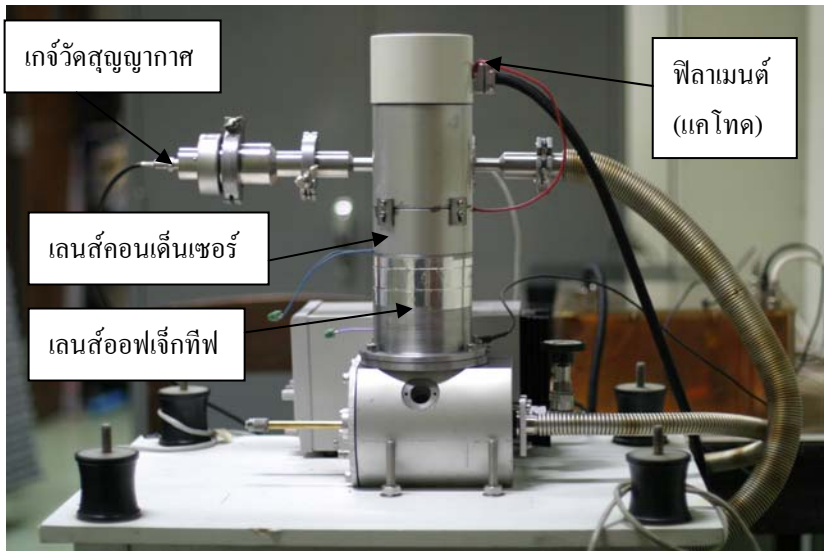


รูปที่ 9 แสดงชิ้นส่วนถอดประกอบของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ



รูปที่ 10 ภาพแสดงเลนส์ออฟเจ็กทีฟที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

โครงสร้างของระบบเลนส์ที่ประกอบขึ้นเป็นเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน



รูปที่ 11 โครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้น

การทดสอบระบบเลนส์

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเลนส์
2. เลนส์ออฟเจ็กทีฟที่พัฒนาขึ้น
3. เครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก (Guass meter) รุ่น BELL 620 ของ BELL., INC.
4. ฉากเรืองแสงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ TEM ขนาด 6.5 × 6.5 cm^2
5. เครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้น

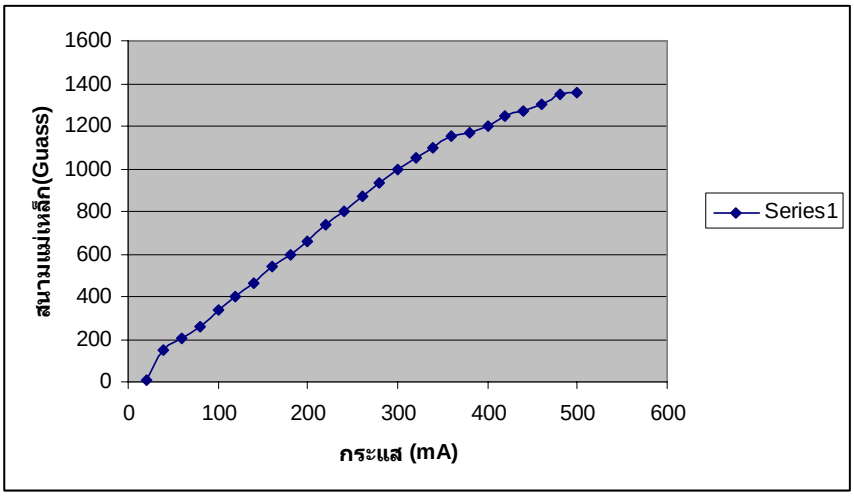
วิธีการทดสอบ

1. การทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์

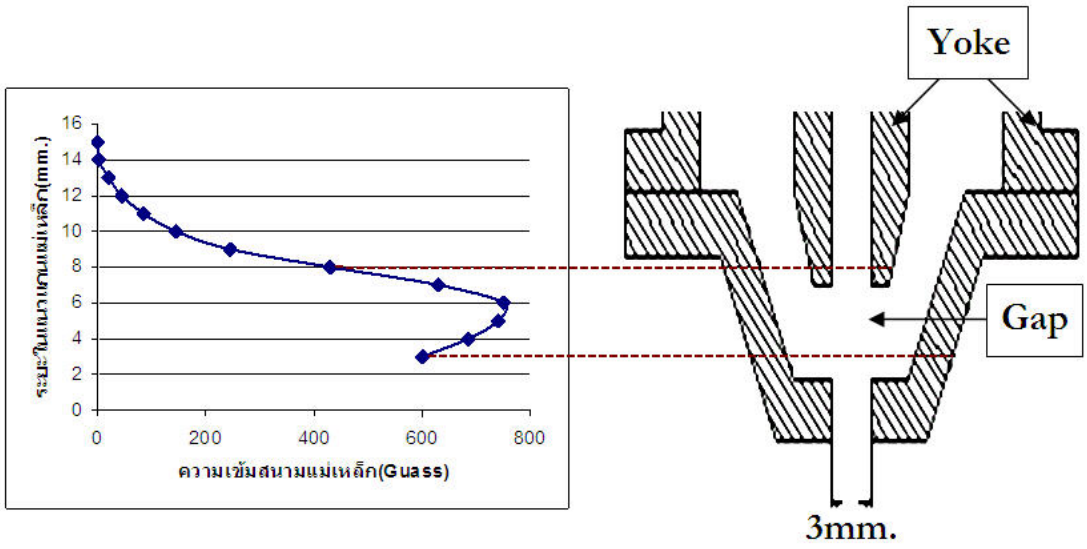
1.1 ทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้ Hall probe วัดความเข้มที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องเปิดวงจรแม่เหล็ก โดยแปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าในขดลวดสนามแม่เหล็ก ผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปตามเส้นกราฟรูปที่ 12 พบว่าเมื่อเปลี่ยนกระแสของขดลวดจาก 0-500 มิลลิแอมแปร์ เลนส์ออฟเจ็กทีฟแปรเปลี่ยนสนามแม่เหล็กจาก 0-0.135 เทสลา, [1เทสลา (T) = 10 กิโลเกาส์ (kG)]

1.2 วัดความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแม่เหล็กโดยใช้ Hall probe วัดความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวความยาวแม่เหล็กโดยการเลื่อน Hall probe ขึ้นที่ละ 1 มม. และ จ่ายกระแสให้กับเลนส์ 140 มิลลิแอมแปร์ จะได้เส้นกราฟเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางของเลนส์ออฟเจ็กทีฟดังรูปที่ 13

ผลการทดลองและวิจารณ์



รูปที่ 12 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแม่เหล็กไฟฟ้ากับระยะตามแนวแกนแม่เหล็ก

เลนส์อิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นมีความเข้มสนามแม่เหล็กที่การจ่ายกระแสสูงสุด 1 แอมแปร์ เท่ากับ 0.285 เทสลา ซึ่งเพียงพอในการปรับความยาวโฟกัสที่ระยะห่างของชิ้นงาน (Working distance) 3.6 ซม. ความเข้มสนามแม่เหล็กแปรตามกระแสอย่างสม่ำเสมอระหว่าง 0-500 มิลลิแอมแปร์ สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กจาก 0-0.135 เทสลา ความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกนบริเวณช่องเปิดวงจรแม่เหล็กขณะจ่ายกระแสคงที่จะมีลักษณะเป็นเส้นกราฟเกาส์เซียน (Gaussian) ดังในรูปที่ 13

ผลทดสอบแปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้กับเลนส์ออฟเจ็กทีฟจนกระทั่งได้ขนาดปลายลำอิเล็กตรอนที่เล็กที่สุด พบว่ากระแสเลนส์ออฟเจ็กทีฟเป็น 140 มิลลิแอมแปร์ จะได้จุดปลายลำอิเล็กตรอนที่คมชัดกว่าการไม่ใช้เลนส์ออฟเจ็กทีฟดังรูปที่ 14 ก. และ ข.

ก.ควบคุมเลนส์คอนเดนเซอร์ชุดเดียว ข. ควบคุมเลนส์คอนเดนเซอร์ร่วมกับเลนส์ออฟเจ็กทีฟ

รูปที่ 14 ภาพเรืองแสงของปลายลำอิเล็กตรอนบนฉากเรืองแสง

สรุปผล

ผลการพัฒนาเลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็กทีฟพบว่า การออกแบบและสร้างชิ้นส่วนมีความซับซ้อนกว่าการออกแบบและสร้างเลนส์คอนเด็นเซอร์ เนื่องจากช่องเปิดวงจรแม่เหล็กจะต้องอยู่ส่วนปลายของเลนส์และจะต้องจัดวางตำแหน่งโอริง (O-ring) ให้สามารถรักษาสภาพสุญญากาศของระบบเลนส์โดยรวมให้ได้ในระดับ 10^{-6} ทอร์ (Torr) เลนส์นี้มีน้ำหนักรวม 1800 กรัม สามารถถอดประกอบเพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ทางผ่านของอิเล็กตรอนได้ง่าย

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างชิ้นส่วนเลนส์ที่ออกแบบขึ้นสามารถหาได้ในประเทศ โดยส่วนแกนของวงจรแม่เหล็กใช้เพลาขาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และ 150 มม. มาตัดแบ่งและกลึงคว้านเนื้อในเหล็กออก ซึ่งเหล็กเพลาขาวนี้เป็นเหล็กในท้องตลาดที่มีคาร์บอนต่ำที่สุด ในขณะที่

โอริง (O-ring) มีให้เลือกหลายชนิดแต่โอริงสำหรับระบบสุญญากาศควรใช้ยางไวตอล (Vitol) จะมีคุณสมบัติดีกว่ายางทั่วไป

ผลทดสอบการทำงานของเลนส์ออฟเจ็กทีฟที่พัฒนาขึ้นร่วมกับเลนส์คอนเดนเซอร์เพื่อการปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนในเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนต้นแบบ พบว่าสามารถทำงานร่วมกันได้ดี โดยขนาดโฟกัสที่ระยะใช้งานระหว่างปากเลนส์ออฟเจ็กทีฟและตัวอย่าง 3.6 ซม. สามารถปรับปลายลำอิเล็กตรอนให้เล็กที่สุดด้วยการจ่ายกระแสที่เลนส์คอนเด็นเซอร์และเล็นส์ออฟเจ็กทีฟเท่ากับ 30 และ 140 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย พร้อมกันนี้ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์สำหรับงานทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. A.W. Agar, R.H. Alderson and D. Chescoe., 1966. Principles and Practice of Electron Microscopy Operation. North-Holland Publishing Company.
2. Cecil E. Hall.,1966. Introduction to Electron Microscopy. Massachusetts Institute of Technology. McGraw-Hill Inc.
3. A.S.A. Alamir. Magnetic Electron Lenses Performance., 2001. International Journal for Light and Electron Optics 11, p.507-510.
4. A.S.A. Alamir., 2002. A Study on Effect of Current Density on Magnetic Lenses., International Journal for Light and Electron Optics 2, p. 85-88.