

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ

3.1 การเลือกค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ

ค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบจะขึ้นกับวัสดุทดสอบดังที่ได้กล่าวแล้วในข้อ 2.8 ในปัจจุบันวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศจะอยู่ในย่านไม่เกิน 36 กิโลโวลต์ เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า สายเคเบิล หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น จากตารางที่ 1.1 จะใช้ค่าแรงดันทดสอบกระแสสลับเท่ากับ 70 kV และจากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ผลิตขึ้นภายในประเทศนี้จะใช้ค่ากระแสสูงสุดสำหรับทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าความถี่กำลังระยะสั้นประมาณ 0.1-0.5 A ดังนั้นด้วยเหตุผลในแง่วิศวกรรม จึงวิจัยออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV และมีค่ากระแสกำหนดเท่ากับ 0.1 A ซึ่งทำให้มีขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 10 kVA ส่วนแรงดันม้วนเข้าจะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กันตามปกติคือ 220 V ดังนั้นค่ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบสร้างมีดังต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้า	S_n	10	kVA
แรงดันม้วนเข้า (แรงต่ำ)	V_1	220	V
แรงดันจ่ายออก (แรงสูง)	V_2	100/50	kV
กระแสม้วนเข้า	I_1	45.45	A
กระแสจ่ายออก	I_2	0.1	A
จำนวน เฟส		1	Phase
ความถี่	f	50	Hz

3.2 การออกแบบแกนแม่เหล็กและขดลวดโดยการคำนวณ

เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันทดสอบต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุด ดังกล่าวแล้วในข้อ

2.7.1 ซึ่งค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก B_c จะต้องอยู่ในย่านเชิงเส้น จาก

รูปที่ 4.2 [28] ค่า B_c ที่เข้าใกล้ย่านอิ่มตัวจะประมาณ 1.6 Wb/m^2 ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า B_c เท่ากับ 1.35 Wb/m^2 ซึ่งพื้นที่ภาคตัดขวางแกนแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ [12]

$$A_{Fe} = C \sqrt{\frac{S_n}{f}}$$

เมื่อ C คือ ค่าฟอร์มแฟกเตอร์ของหม้อแปลง ซึ่งจากโรงงานจะใช้ค่าประมาณ $7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{J}^{-\frac{1}{2}}$ สำหรับหม้อแปลงแบบน้ำมัน

$$\text{ใช้ค่า } C = 7.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{J}^{-\frac{1}{2}}$$

$$A_{Fe} = 7.15 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{10 \times 10^3}{50}}$$

$$= 0.01011 \text{ m}^2$$

ใช้ภาคตัดขวางแกนแม่เหล็กเป็นแบบคอร์ มีภาคตัดขวางเป็นแบบสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม 3 ชั้น ดังในรูปที่ 3.1

ใช้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่แกนแม่เหล็กในวงกลม

$$F_{Cu} = 85.1 \%$$

ซึ่งเป็นค่าจากโรงงาน

ใช้ค่าแฟกเตอร์เนื้อแผ่นเหล็ก

$$K_{Fe} = 0.97$$

ซึ่งเป็นค่าจากบริษัทผู้ผลิตแผ่นเหล็กซิลิคอนที่ใช้

รัศมีของภาคตัดขวางแกนแม่เหล็กหาได้จากสมการ [12]

$$d = \sqrt{\frac{A_{Fe} \times 4}{\pi \times F_{cu} \times K_{Fe}}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.01011 \times 4}{\pi \times 0.851 \times 0.97}}$$

$$= 0.1248 \quad \text{m}$$

ใช้

$$d = 0.125 \quad \text{m}$$

$$= 12.5 \quad \text{cm}$$

จากการเลือกค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $B_c = 1.35 \text{ Wb/m}^2$ ดังนั้นเส้นสนามแม่เหล็ก

$$\phi = B_c \times A_{Fe}$$

$$= 1.35 \times 0.01011$$

$$= 0.01365 \quad \text{Wb}$$

การคำนวณค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนแม่เหล็ก

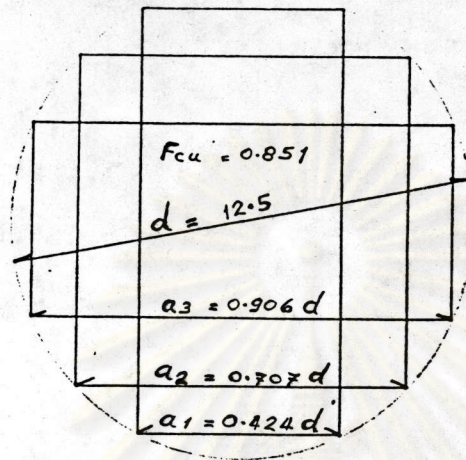
จากกราฟการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนแม่เหล็กชนิด Z7H (ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนา $0.3 \pm 0.03 \text{ mm}$) ในรูปที่ 4.1 [28] จะได้ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่อกิโลกรัมที่ $B_c = 1.35 \text{ Wb/m}^2$

$$P'_{Fe} = 0.66 \quad \text{W/kg}$$

ถ้าเพิ่มการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอีก 12 % ซึ่งเป็นค่าจากโรงงาน เนื่องจากผลของการตัดการเรียง การเคลือบแกนเหล็กซิลิคอน เป็นต้น ดังนั้น

$$P'_{Fe} = 1.12 \times 0.66$$

$$= 0.739 \quad \text{W/kg}$$



$$a_1 = 5.29$$

$$a_2 = 8.83$$

$$a_3 = 11.31$$

หน่วยเป็น เซนติเมตร

รูปที่ 3.1 รูปร่างและขนาดภาคตัดขวางแกนแม่เหล็ก

การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

ใช้ความหนาแน่นกระแสในขดลวดแรงต่ำ J_1 และแรงสูง J_2 ดังรายละเอียด
ในภาคผนวก ข. คือ

$$J_1 = 200 \quad \text{A/cm}^2$$

$$J_2 = 100 \quad \text{A/cm}^2$$

$$P' = 2.37 \times J^2 \times k \times 10^{-4}$$

เมื่อ k คือ แฟกเตอร์สำหรับเพิ่มการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวด เนื่องจากการสูญเสีย
สเตรย์ในแคลมป์เหล็ก และในขดลวดเอง

ใช้ค่า $k = 1.1$ ซึ่งเป็นค่าจากโรงงาน

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงสูงต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned} P'_2 &= 2.37 \times (100)^2 \times 1.1 \times 10^{-4} \\ &= 2.607 \quad \text{W/kg} \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงต่ำต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned} P'_1 &= 2.37 \times (200)^2 \times 1.1 \times 10^{-4} \\ &= 10.428 \quad \text{W/kg} \end{aligned}$$

จำนวนรอบของขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{U_2}{4.44 f \phi} \\ &= \frac{100 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 0.01365} \\ &= 33,000 \quad \text{รอบ} \end{aligned}$$

จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{U_1}{4.44 f \phi} \\ &= \frac{200}{4.44 \times 50 \times 0.01365} \end{aligned}$$

$$= 72.6 \quad \text{รวม}$$

$$\text{ใช้ } N_1 = 72 \quad \text{รวม}$$

กระแสที่กำหนดของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{S_n \times 10^3}{U_1} \\ &= \frac{10 \times 10^3}{220} \\ &= 45.45 \quad \text{A} \end{aligned}$$

กระแสที่กำหนดของขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{S_n \times 10^3}{U_2} \\ &= \frac{10 \times 10^3}{100 \times 10^3} \\ &= 0.1 \quad \text{A} \end{aligned}$$

พื้นที่ภาคตัดขวางของ เส้นลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{I_2}{J_2} \\ &= \frac{0.1}{100} \\ &= 1.0 \times 10^{-3} \quad \text{cm}^2 \end{aligned}$$

$$A_2 = 0.1 \quad \text{mm}^2$$

พื้นที่ภาคตัดขวางของ เส้นลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{I_1}{J_1} \\
 &= \frac{45.45}{200} \\
 &= 0.22725 \quad \text{cm}^2 \\
 A_1 &= 22.725 \quad \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

เนื่องจากขดลวดแรงต่ำจะมี 2 ชุด สำหรับต่ออนุกรมหรือขนานกัน เพื่อเปลี่ยนแรงดันทดสอบสูงสุด ดังนั้นเส้นลวดแรงต่ำของแต่ละชุดจะมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ

$$22.725/2 = 11.3625 \quad \text{mm}^2$$

3.3 การออกแบบขดลวดและแกนแม่เหล็ก

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบนี้ประกอบด้วย ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง และขดลวดต่อควม รูปลักษณะขดลวดทั้งสาม เป็นแบบชั้นทรงกระบอก และแกนแม่เหล็กจะเป็นแบบคอร์

3.3.1 ขดลวดแรงต่ำ

จากข้อ 3.2 เส้นลวดของขดลวดแรงต่ำจะใช้ลวดแบนขอบมนอาน้ำยา (PEW) ซึ่งมีขนาดดังต่อไปนี้

ลวด เปลือย	2 × 6	mm ²
ลวดอาน้ำยา	2.06 × 6.05	mm ²
พื้นที่ภาคตัดขวางลวด	11.64	mm ²

พื้นที่ภาคตัดขวางลวดหาจากพื้นที่ภาคตัดขวางจริงของสี่เหลี่ยม ซึ่งมีขอบมน จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำแต่ละชุด

$$N_1 = 72 \quad \text{รวม}$$

ขดลวดพันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก 4 ชั้นๆ ละ 18 รอบ สำหรับขดลวดแบบชั้น
จะต้องเผื่อไว้ 1 รอบ สำหรับเริ่มต้นการพัน ดังนั้นความกว้างของขดลวดแรงต่ำแต่ละขด

$$(18 + 1) \times 0.605 = 11.5 \quad \text{cm}$$

ให้ขดลวดทั้งสองห่างกัน 1 cm โดยใช้เมลิเนกซ์กัน ดังในรูปที่ 3.2

$$\text{แรงดันต่อรอบ} = \frac{220}{72} = 3.056 \quad \text{V}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 3.056 \times 2 \times 18 = 110 \quad \text{V}$$

ใช้เมลิเนกซ์หนา 0.075 mm 2 ชั้น เป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงต่ำ ซึ่งค่า
แรงดันเบรกดาวน์ของ เมลิเนกซ์หนา 0.075 mm เท่ากับ 10 kV

ความหนาของขดลวดแรงต่ำแต่ละขด (ความหนาของเส้นลวดชั้นรวมกับความหนาของ
ฉนวน)

$$t_1 = (4 \times 2.05) + (2 \times 0.075) \times 4$$

$$= 8.8 \quad \text{mm}$$

$$= 0.88 \quad \text{cm}$$

$$\text{ใช้ } t = 1.2 \quad \text{cm}$$

เผื่อไว้สำหรับในกรณีพันขดลวดและฉนวนไม่แน่น ดังนั้น

$$J_1 = \frac{I_1}{A_1} = \frac{45.45}{0.2328}$$

$$= 195.23 \quad \text{A/cm}^2$$

ซึ่งใกล้เคียงกับค่า J_1 ที่คำนวณไว้ในข้อ 3.2 คือ 200 A/cm^2 ความยาวรอบ เจลลี่ของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} \ell_1 &= 2\pi \left(\frac{7 + 8.2}{2} \right) \\ &= 47.75 \quad \text{cm} \end{aligned}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} W_1 &= N_1 \times A_1 \times \ell_1 \times 8.87 \times 10^{-3} \\ &= 72 \times (2 \times 0.1164) \times (47.75) \times 8.87 \times 10^{-3} \\ &= 7.1 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงต่ำ

$$\begin{aligned} P_1 &= 2.37 J_1^2 W_1 \times 1.1 \times 10^{-4} \\ &= 2.37 (195.23)^2 \times 7.1 \times 1.1 \times 10^{-4} \\ &= 70.55 \quad \text{W} \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำที่ 75°C

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{P_1}{I_1^2} \\ &= \frac{70.55}{(45.45)^2} \\ &= 0.03415 \quad \Omega \end{aligned}$$



3.3.2 ขดลวดแรงสูง

จากข้อ 3.2 เส้นลวดของขดลวดแรงสูงจะใช้ลวดกลมอาบนํ้ายา (PEW) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัด ดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางลวดเปลือย	0.35	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางลวดอาบนํ้ายา	0.392	mm
พื้นที่ภาคตัดขวางลวดเปลือย	0.09621	mm ²
จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดแรงสูง	$N_2 = 33,000$	รอบ

ขดลวดพันแบบขดลวดชั้นทรงกระบอก โดยจะแบ่งเป็น 3 ชั้น ดังรูปที่ 3.2 เพื่อเพิ่มการฉนวน เมื่อจำนวนรอบหรือแรงดันมีค่าสูงขึ้น โดย

ชั้นที่หนึ่ง	มี 35 ชั้นๆ ละ 520 รอบ	รวม	$N_{21} = 18,200$	รอบ
ชั้นที่สอง	มี 22 ชั้นๆ ละ 408 รอบ	รวม	$N_{22} = 8,976$	รอบ
ชั้นที่สาม	มี 16 ชั้นๆ ละ 370 รอบ	รวม	$N_{23} = 5,920$	รอบ
ดังนั้นใช้ จำนวนรอบทั้งหมด			$N_2 = 33,096$	รอบ

(การคำนวณขนาดของการฉนวนสำหรับขดลวดแรงสูงแสดงไว้ในภาคผนวก ก.)

$$\text{แรงดันต่อรอบ} = \frac{100,000}{33,096} = 3.0215 \text{ V}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 3.0215 \times 2 \times 520$$

$$= 3142.36 \text{ V}$$

ใช้ เบลี เนกซ์หนา 0.075 mm 4 ชั้น หนารวม 0.3 mm เป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง

ชั้นที่หนึ่ง

$$\text{ความกว้างของขดลวด } b_{21} = (520 + 1) \times 0.392 = 204.23 \quad \text{mm}$$

$$\text{ใช้ } b_{21} = 20.4 \quad \text{cm}$$

$$\text{ความหนาของขดลวด } t_{21} = (35 \times 0.392) + (35 \times 0.3) = 24.22 \quad \text{mm}$$

$$\text{ใช้ } t_{21} = 2.45 \quad \text{cm}$$

ชั้นที่สอง

$$\text{ความกว้างของขดลวด } b_{22} = (408 + 1) \times 0.392 = 16.033 \quad \text{mm}$$

$$\text{ใช้ } b_{22} = 16.0 \quad \text{cm}$$

$$\text{ความหนาของขดลวด } t_{22} = (22 \times 0.392) + (22 \times 0.3) = 15.224 \quad \text{mm}$$

$$\text{ใช้ } t_{22} = 1.53 \quad \text{cm}$$

ชั้นที่สาม

$$\text{ความกว้างของขดลวด } b_{23} = (370 + 1) \times 0.392 = 145.432 \quad \text{mm}$$

$$\text{ใช้ } b_{23} = 14.5 \quad \text{cm}$$

$$\text{ความหนาของขดลวด } t_{23} = (16 \times 0.392) + (16 \times 0.3) = 11.072 \quad \text{mm}$$

$$\text{ใช้ } t_{23} = 1.11 \quad \text{cm}$$

$$\text{ดังนั้น } J_2 = \frac{I_2}{A_2} = \frac{0.1}{0.0009621}$$

$$= 103.94 \quad \text{A/cm}^2$$

ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ในข้อ 3.2 คือ 100 A/cm²

ความยาวรอบ เฉลี่ยของขดลวดแรงสูง

ชั้นที่หนึ่ง

$$\begin{aligned} \ell_{21} &= 2\pi \frac{(9.6 + 12.05)}{2} \\ &= 68 \quad \text{cm} \end{aligned}$$

ชั้นที่สอง

$$\begin{aligned} \ell_{22} &= 2\pi \frac{(12.05 + 13.58)}{2} \\ &= 80.52 \quad \text{cm} \end{aligned}$$

ชั้นที่สาม

$$\begin{aligned} \ell_{23} &= 2\pi \frac{(13.58 + 14.69)}{2} \\ &= 88.82 \quad \text{cm} \end{aligned}$$

น้ำหนักทองแดงของขดลวดแรงสูง

ชั้นที่หนึ่ง

$$\begin{aligned} W_{21} &= N_{21} \times A_2 \times \ell_{21} \times 8.87 \times 10^{-3} \\ &= 18200 \times 0.0009621 \times 68 \times 8.87 \times 10^{-3} \\ &= 10.56 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

ชั้นที่สอง

$$\begin{aligned} W_{22} &= N_{22} \times A_2 \times \ell_{22} \times 8.87 \times 10^{-3} \\ &= 8976 \times 0.0009621 \times 80.52 \times 8.87 \times 10^{-3} \\ &= 6.17 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

ขั้นที่สาม

$$\begin{aligned}
 W_{23} &= N_{23} \times A_2 \times l_{23} \times 8.87 \times 10^{-3} \\
 &= 5920 \times 0.000962 \times 88.82 \times 8.87 \times 10^{-3} \\
 &= 4.487 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักรวม } W_2 &= 10.56 + 6.17 + 4.487 \\
 &= 21.22 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงสูงกรณีไม่ใช้การค้ำยันบันได

$$\begin{aligned}
 P_2 &= 2.37 J_2^2 \times W_2 \times 1.1 \times 10^{-4} \\
 &= 2.37 (103.94)^2 \times 21.22 \times 1.1 \times 10^{-4} \\
 &= 59.76 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดแรงสูงที่ 75°C

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \frac{P_2}{I_2^2} \\
 &= \frac{59.76}{(0.1)^2} \\
 &= 5976 \quad \Omega
 \end{aligned}$$

ความต้านทานรวมใน เเทอมของค้ำแรงสูง

$$\begin{aligned}
 R_t &= \frac{(P_1 + P_2)}{I_2^2} \\
 &= \frac{130.31}{(0.1)^2} \\
 &= 13031 \quad \Omega
 \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง

$$P_1 + P_2 = 130.31 \text{ W}$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมความต้านทาน

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{I_2 R_t}{U_2} \times 100 \% \\ &= \frac{(0.1)(13031)}{100 \times 10^3} \times 100 \\ &= 1.30 \% \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์ ϵ_x

จากรูปที่ 3.2, 3.3 ค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านแรงสูง คำนวณได้จากสมการ [12]

$$\text{จาก } X_2 = \omega \mu_0 \cdot b \ell_i \int_0^{t_m} \left(\frac{H}{I_2}\right)^2 \cdot dx$$

โดย $\omega = 2\pi f$

$\mu_0 =$ เอมี่มีบิลิตีของอากาศ

$b =$ ความกว้างของขดลวดแรงสูงชั้นที่หนึ่ง

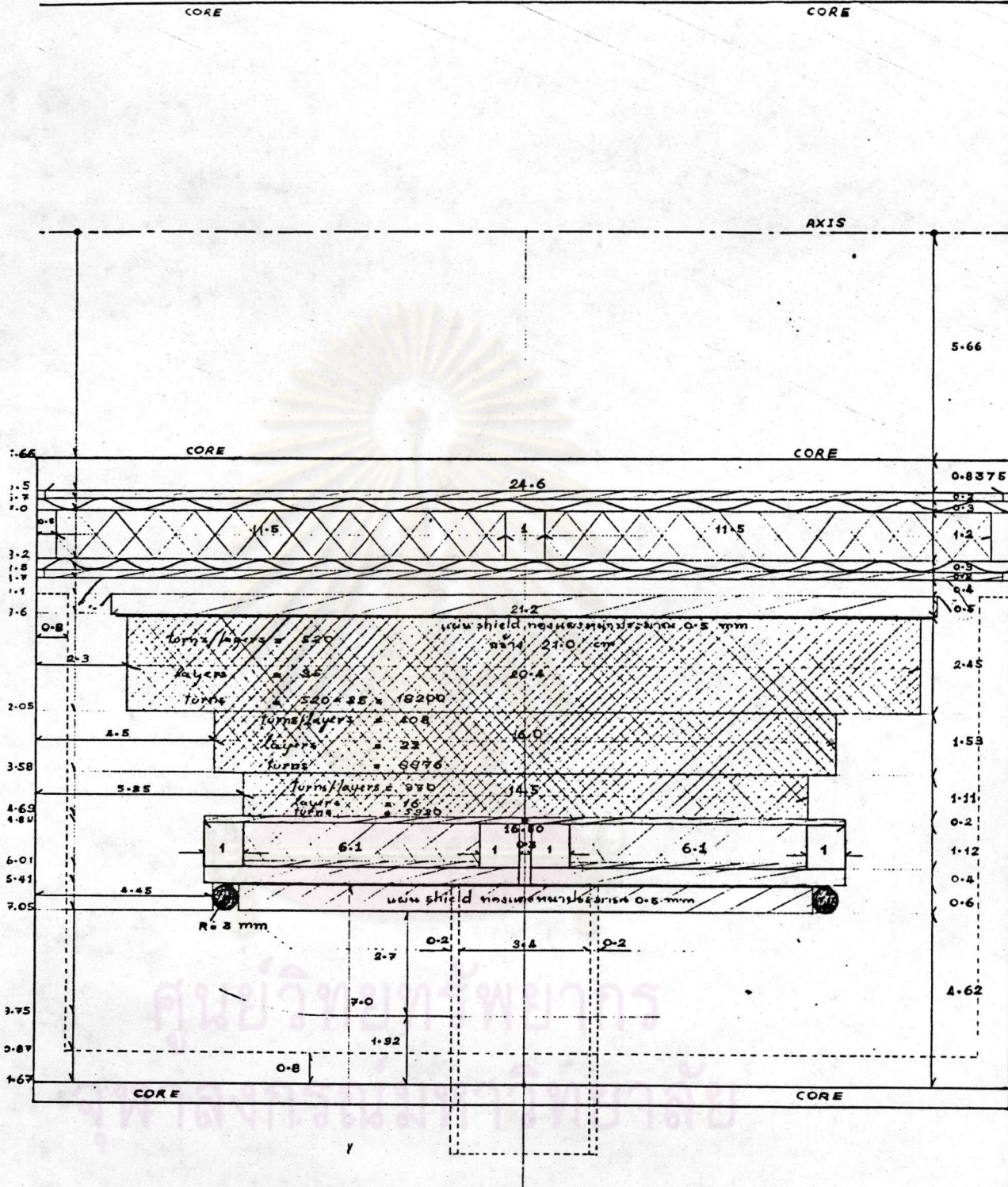
$\ell_i =$ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดใดๆ

$t_m =$ ความหนา รวมถึงแต่เริ่มขดลวดแรงต่ำจนหมดขดลวดแรงสูง

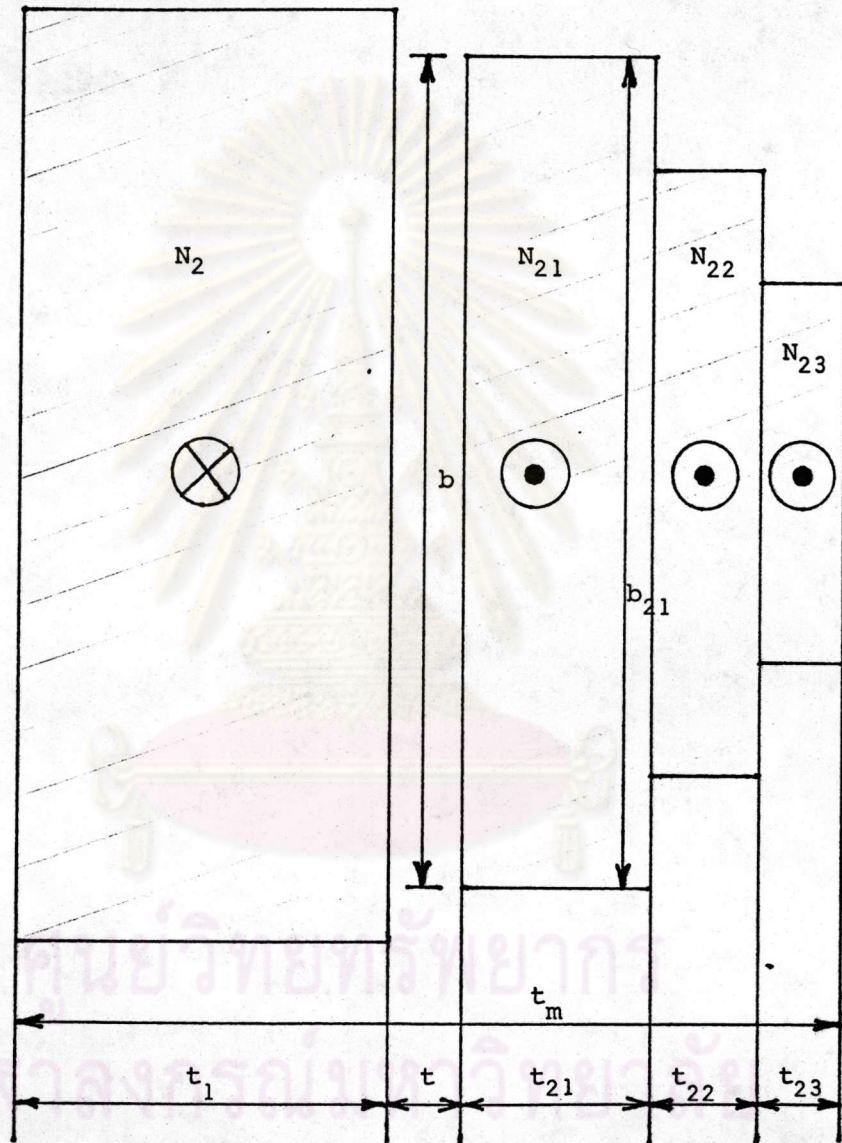
$H^* =$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

$x =$ ระยะใดๆ ในทิศทางความหนาของขดลวด

* ความเข้มสนามแม่เหล็ก H เป็นฟังก์ชันของ NI/b ที่ระยะ x ใดๆ



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางของขดลวด



รูปที่ 3.3 การจัดวางขดลวดในเทอมแรงดันสูง

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } X_2 &= \omega \mu_0 b \left[\frac{N_2^2 \times t_1 \times l_1}{b^2 \times 3} + \frac{N_2^2 \times t \times l_g}{b^2} + \frac{t_{21}}{3 \times N_{21} \times b^2} \times \right. \\
 &\quad \left. \left\{ N_2^3 - (N_{22} - N_{23})^3 \right\} \times l_{21} + \frac{t_{22}}{3 \times N_{22}} \frac{1}{b^2} \left\{ (N_{22} + N_{23})^3 - N_{23}^3 \right\} \right. \\
 &\quad \left. \times l_{22} + \frac{N_{23}^3}{b} \times \frac{t_{23}}{3} \times l_{23} \right]
 \end{aligned}$$

โดยความยาวรอบเฉลี่ยของช่องแกป (ช่องความหนา t) l_g

$$\begin{aligned}
 &= 2\pi \left(\frac{8.2 + 9.6}{2} \right) \\
 &= 55.92 \quad \text{cm} \\
 &= 0.56 \quad \text{m}
 \end{aligned}$$

แทนค่า	t	=	0.014	m	,	N_2	=	33096	รอบ
	t_1	=	0.012	m	,	N_{21}	=	18200	รอบ
	t_{21}	=	0.0245	m	,	N_{22}	=	8976	รอบ
	t_{22}	=	0.0153	m	,	N_{23}	=	5920	รอบ
	t_{23}	=	0.0111	m	,	ω	=	100π	rad/sec
	b	=	0.204	m	,	μ_0	=	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
	l_{21}	=	0.68	m	,	t_m	=	0.0769	m
	l_{22}	=	0.805	m					
	l_{23}	=	0.89	m					
	l_1	=	0.477	m					
	l_g	=	0.56	m					

$$\begin{aligned}
 \text{ได้ } X_2 &= 100\pi \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.204 \left[\frac{(33096)^2}{(0.204)^2 \times 3} \times 0.012 \times 0.477 \right. \\
 &+ \frac{(33096)^2 \times 0.014 \times 0.56}{(0.204)^2} + \frac{(0.0245)}{3 \times (18200) \times (0.204)^2} \times \\
 &\left. \left\{ (33096)^3 - (8976 - 5920)^3 \right\} \times 0.68 + \frac{0.0153}{3 \times 8976 \times (0.204)^2} \times \right. \\
 &\left. \left\{ (8976 + 5920)^3 - 5920^3 \right\} \times 0.805 + \frac{5920^3}{(0.204)^2} \times \frac{0.011}{3} \times 0.89 \right]
 \end{aligned}$$

$$= 43126.04 \quad \Omega$$

$$\epsilon_x = \frac{X_2}{U_2} \times I_2 \times 100 \quad \%$$

$$= \frac{43126.04 \times 0.1 \times 100}{100 \times 10^3}$$

$$= 4.31 \quad \%$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ หรือแรงดันลัดวงจร

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{SC} &= \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_r^2} \\
 &= \sqrt{(4.31)^2 + (1.30)^2} \\
 &= 4.50 \quad \%
 \end{aligned}$$

กระแสลัดวงจรสำหรับขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned}
 I_{SC2} &= \frac{I_2 \times 100}{\epsilon_{SC}} \\
 &= \frac{0.1 \times 100}{4.5} \\
 &= 2.22 \quad A
 \end{aligned}$$

3.3.3 ขดลวดค้ำคอบ

จากข้อ 3.2 เส้นลวดของขดลวดค้ำคอบจะใช้เส้นลวดแบนขอบมนอาน้ำยา (PEW) ขนาดเดียวกันกับขดลวดแรงต่ำ คือ

ลวดเปลือย	2×6	mm^2
ลวดอาน้ำยา	2.05×6.05	mm^2
พื้นที่ภาคตัดขวางลวด	11.64	mm^2

จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดค้ำคอบ $N_3 = 72$ รอบ โดยแบ่งเป็นสองขดลวดๆ ละ 36 รอบ และพันขดลวดค้ำคอบ เป็นแบบขดลวดชั้นทรงกระบอกอีกเช่นกัน แต่ละขดมี 4 ชั้นๆ ละ 9 รอบ

$$\text{ความกว้างของขดลวดค้ำคอบแต่ละขด} = (9 + 1) \times 0.605 = 6.05 \text{ cm}$$

$$\text{ใช้ } 6.1 \text{ cm}$$

ขดลวดทั้งสองกันด้วยฉนวน เมลิกเนกซ์ และร่องสำหรับทางออกของขดลวดแรงสูง รวมทั้งสายออกของขดลวดค้ำคอบทั้งสองเอง ดังในรูปที่ 3.2

$$\text{แรงดันต่อรอบ} = \frac{220}{72} = 3.056 \text{ V}$$

$$\text{แรงดันสูงสุดระหว่างชั้น} = 3.065 \times 2 \times 9 = 55 \text{ V}$$

ใช้ เมลิกเนกซ์หนา 0.075 mm 4 ชั้น เป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดค้ำคอบ

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของขดลวดค้ำคอบแต่ละขด } t_3 &= (4 \times 2.05) + (4 \times 0.075) \times 4 \\ &= 9.4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{ใช้ } t_3 = 1.12 \text{ cm}$$

กรณีใช้หม้อแปลงแบบค่อขึ้นบันได

กระแสไหลค่อเดิมที่

กระแสค่อแรงค่อ $I_1 = 45.45 \text{ A}$

กระแสค่อแรงสูง $I_2 = 0.05 \text{ A}$

กระแสค่อค่อควว $I_3 = 22.7 \text{ A}$

ดังนั้นความหนาแน่นกระแสสำหรับขลวค่อควว

$$J_3 = \frac{I_3}{A_3} = \frac{22.7}{0.1164} = 195.23 \text{ A/cm}^2$$

ความยาวรอบ เจลี่ยของขลวค่อควว

$$l_3 = 2\pi \frac{(14.89 + 16.01)}{2} = 97.075 \text{ cm}$$

น้ำหนักทองแดงของขลวค่อควว

$$W_3 = N_3 \times A_3 \times l_3 \times 8.87 \times 10^{-3}$$

$$= 72 \times 0.1164 \times 97.075 \times 8.87 \times 10^{-3}$$

$$= 7.216 \text{ kg}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้ในขลวค่อควว

$$P_3 = 2.37 \times J_3^2 \times W_3 \times 1.1 \times 10^{-4}$$

$$= 2.37 \times (195.23)^2 \times 7.2 \times 1.1 \times 10^{-4}$$

$$= 71.70 \text{ W}$$

ความต้านทานของขดลวดต่อความที่ 75°C

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{W}{I^2} \\ &= \frac{71.70}{(22.7)^2} \\ &= 0.139 \quad \Omega \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงต่ำ

$$P_1 = 70.55 \quad \text{W}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} P_2 &= 59.76 \left(\frac{103.94/2}{103.94} \right)^2 \\ &= 14.94 \quad \text{W} \end{aligned}$$

การสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในขดลวดแรงต่ำ, ขดลวดแรงสูง และขดลวดต่อความ

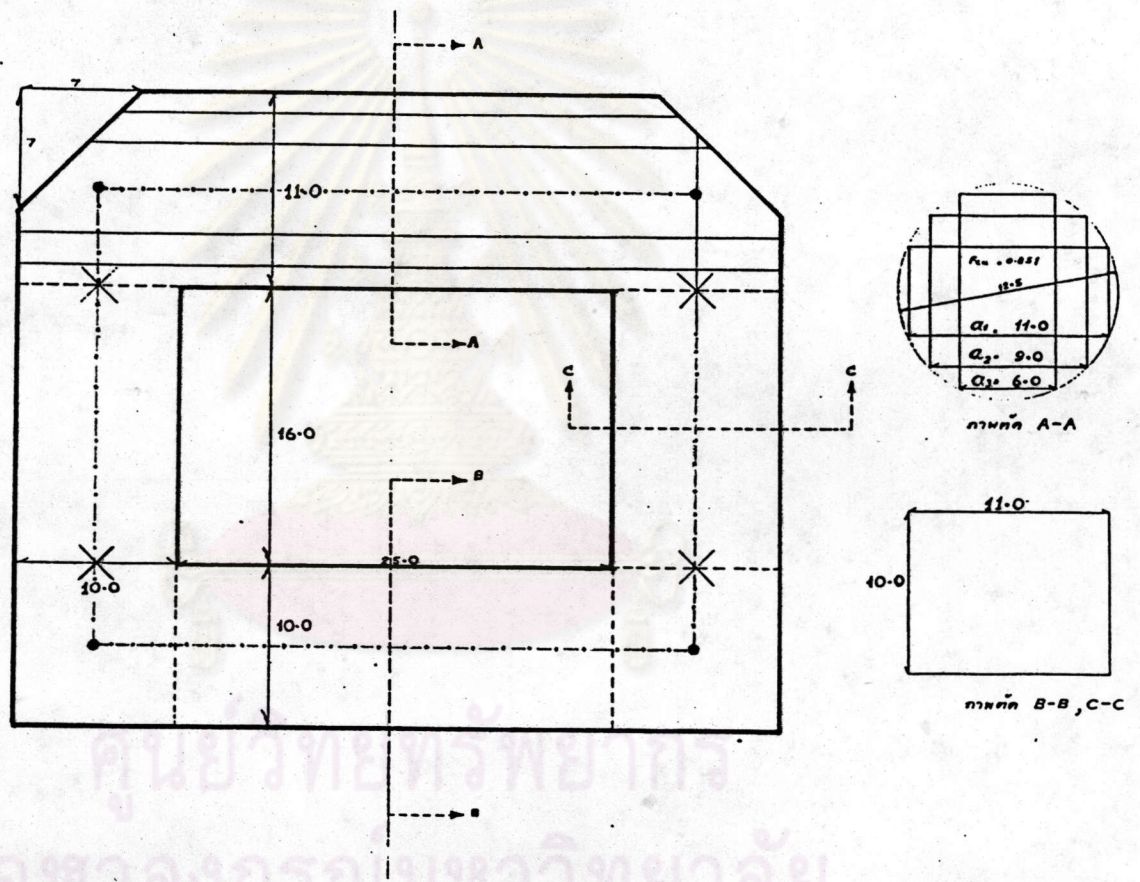
$$\begin{aligned} P_1 + P_2 + P_3 &= 10.55 + 14.94 + 71.70 \\ &= 157.19 \quad \text{W} \end{aligned}$$

3.3.4 แกนแม่เหล็ก

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดความกว้างของแผ่น เหล็กซิลิคอนที่มีขายในเชิงการค้า ซึ่งปกติแล้ว แต่ละแผ่นจะมีความหนา 0.3 mm แล้วนำมาวางซ้อนเรียงกันจนได้รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ

เมื่อออกแบบขดลวดเรียบร้อยแล้ว ดังภาคตัดขวางของขดลวดในรูปที่ 3.2 รวมทั้งการคำนวณระยะการฉนวนของขดลวดกับแกนแม่เหล็ก ดังในภาคผนวก ก. และจากเงื่อนไขของหม้อแปลงทดสอบรูปร่างของแกนแม่เหล็กจะเป็น ดังในรูปที่ 3.4 โดยพื้นที่ภาคตัดขวางบริเวณโยกบนที่ใส่

ขดลวดจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม 3 ชั้น ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของเหล็กชิลิคอน a_1, a_2, a_3 จากการคำนวณในรูปที่ 3.1 บ้าง แต่จะรักษาขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางไว้ให้ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้มากที่สุด และพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนแม่เหล็กบริเวณอื่นจะเป็นแบบสี่เหลี่ยม โดยมีขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนแม่เหล็กบริเวณโย้กบน



หน่วยเป็น เซนติเมตร

รูปที่ 3.4 รูปร่างและขนาดของแกนแม่เหล็ก

ดังนั้น จากรูปที่ 3.4 ซึ่งใช้ค่าแฟกเตอร์เนื้อแผ่นเหล็ก $K_{Fe} = 0.97$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ภาคตัดขวาง A-A ; } A_{Fe} &= 2 \times [11.0 \times 3.0 + 9.0 \times 1.4 + 6.0 \times 1.1] \times 0.97 \\ &= 104.4 \times 0.97 \quad \text{cm}^2 \\ &= 0.01012 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ภาคตัดขวาง B-B, C-C ; } A_{Fe} &= 11.0 \times 10.0 \times 0.97 \\ &= 106.7 \quad \text{cm}^2 \\ &= 0.01067 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ในข้อ 3.2 คือ 0.01011 m²

ความยาวเฉลี่ยของแกนแม่เหล็ก (ตามเส้นประในรูปที่ 3.4)

$$\begin{aligned} l_{Fe} &= 2 \times (25.0 + 10.0) + 2 \times (16.0 + 5.5 + 5.0) \\ &= 123 \quad \text{cm} \\ &= 1.23 \quad \text{m} \end{aligned}$$

จากกราฟแรงกระตุ้นเส้นแรงแม่เหล็ก ดีซี ของเหล็กซิลิคอนชนิด Z7H ในรูปที่ 4.2 [28]

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กตลอดวงจรของแกนแม่เหล็กใกล้เคียงกัน ฉะนั้นจะใช้

$$\begin{aligned} B_c &= 1.35 \text{ Wb/m}^2 \quad \text{โดยตลอดความยาวของวงจรแกนแม่เหล็กจะได้แอมแปร์-เทิร์นต่อเมตร} \\ \text{ที่ } B_c &= 1.35 \text{ Wb/m}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{NI'}{l} = 14 \quad \text{Ampere-turns/m}$$

ดังนั้น แอมแปร์-เทิร์น สำหรับครบรอบวงจรแกนแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} NI' &= \left(\frac{NI'}{l}\right) \times l_{Fe} \\ &= 14 \times 1.23 = 17.22 \quad \text{Ampere-turns} \end{aligned}$$

แอมแปร์-เทิร์นคกรวม 4 รอยค่อตรงมุม รอยค่อทั้ง 4 ของแกนแม่เหล็กที่ $B_c = 1.35$
 Wb/m^2 มีค่าประมาณ 115 เท่าของแอมแปร์-เทิร์น/เซนติเมตร ในแกนแม่เหล็ก [16]
 ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{แอมแปร์-เทิร์น สำหรับ 4 รอยค่อ} &= 0.14 \times 115 \\ &= 16.1 \quad \text{Ampere-turns} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แอมแปร์-เทิร์น ทั้งหมด} \quad NI &= 17.22 + 16.1 \\ &= 33.32 \quad \text{Ampere-turns} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก} \quad I_M &= \frac{NI}{\sqrt{2} \times N_2} \\ &= \frac{33.32}{\sqrt{2} \times 33096} \\ &= 0.712 \times 10^{-3} \text{ A} \\ &= 0.712 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\text{น้ำหนักของแกนแม่เหล็ก คัดจากความหนาแน่น} \quad 7.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} W_{\text{Fe}} &= \frac{A_{\text{Fe}}}{0.97} \times l_{\text{Fe}} \times 7.65 \times 10^3 \\ &= \frac{0.01012}{0.97} \times 1.23 \times 7.65 \times 10^3 \\ &= 98.169 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{การสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในแกนแม่เหล็ก} \quad P_{\text{Fe}} &= P'_{\text{Fe}} \times W_{\text{Fe}} \\ &= 0.739 \times 98.167 \\ &= 72.545 \text{ W} \end{aligned}$$

กระแสการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนแม่เหล็ก $I_R = \frac{P_{Fe}}{U_2}$

$$= \frac{72.545}{100 \times 10^3}$$

$$= 0.725 \times 10^{-3} \quad \text{A}$$

$$= 0.725 \quad \text{mA}$$

ดังนั้น กระแสกระตุ้น $I_O = \sqrt{I_M^2 + I_R^2}$

$$= \sqrt{0.712^2 + 0.725^2} \quad \text{mA}$$

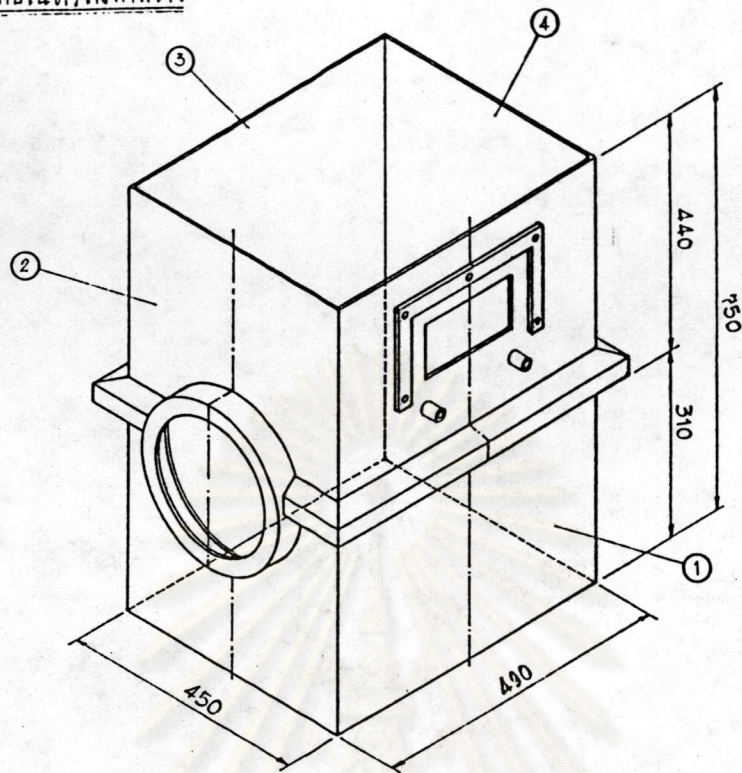
$$= 1.016 \quad \text{mA}$$

คิดเป็น 1.016 % ของกระแสที่กำหนด I_2

3.4 การออกแบบตัวถัง

ขนาดของตัวถังกำหนดด้วยขนาดของโครงสร้างภายในหม้อแปลง คือ ขดลวดและแกนแม่เหล็ก รวมทั้งพื้นที่ผิวระบายความร้อนของตัวถังต้องเพียงพอสำหรับจำกัดอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF₆ ตอนบนของตัวถังไม่เกิน 55°C โดยคำนวณหาจากค่าที่กำหนดของกำลังสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของตัวถังประมาณ 158 W/m² ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 2.6.3 ตัวถังต้องสามารถทนต่อการทำสุญญากาศและอัดความดันที่ 3 kg/cm².abs ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวถังแบบสี่เหลี่ยม เนื่องจากทำได้ง่ายกว่าถังกลมทรงกระบอก ใช้เหล็กหนา 4.5 mm ทำตัวถังด้านข้างและด้านล่าง เสริมความแข็งแรงด้านข้างโดยการค้ำด้วยเหล็กโดยรอบ ฝาปิดด้านบนใช้แผ่นเหล็กหนา 6 mm ด้านข้างติดตั้งกล่องขั้วต่อสาย มาตรการวัดความดันรวมทั้งเทอร์โมมิเตอร์และป้ายรายการ ตัวถังไม่มีครีบ เนื่องจากพื้นที่ถังเรียบก็เพียงพอสำหรับการระบายความร้อน ส่วนความสูงของตัวถังขึ้นกับความยาวของปลายปลอกจนวนนำสาย และความสูงของขดลวดในถัง โดยออกแบบให้เหมาะสมกับรูปร่างของตัวถัง และเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างภายในจากภายนอกได้ จึงติดตั้งช่องกระจกดูที่ด้านข้างตัวถัง ดังในรูปที่ 3.5

* ภาพในตำราจัดทำขึ้น



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

รูปที่ 3.5 รูปร่างและขนาดของตัวถัง

จากรูปที่ 3.5 พื้นที่ผิวโดยประมาณของตัวถัง (ไม่คิดฝาปิดบนและล่าง)

$$\begin{aligned}
 A_a &= 2(0.45 \times 0.75 + 0.49 \times 0.75) && \text{m}^2 \\
 &= 1.41 && \text{m}^2
 \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสีย รวมของหม้อแปลง

$$\begin{aligned}
 P_t &= P_1 + P_2 + P_{Fe} \\
 &= 59.76 + 70.55 + 72.545 \\
 &= 202.855 && \text{W}
 \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของตัวถัง

$$\begin{aligned}
 P'_a &= \frac{P_t}{A_a} \\
 &= \frac{202.855}{1.41} \quad \text{W/m}^2 \\
 &= 143.87 \quad \text{W/m}^2
 \end{aligned}$$

กรณีที่ใช้การต่อแบบชั้นบันไดจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดต่อความถี่ ฉะนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลง

$$\begin{aligned}
 P_t &= P_1 + P_2 + P_3 + P_{Fe} \\
 &= 70.55 + 14.94 + 71.70 + 72.545 \\
 &= 229.735 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของตัวถัง

$$\begin{aligned}
 P'_a &= \frac{P_t}{A_a} \\
 &= \frac{229.735}{1.41} \quad \text{W/m}^2 \\
 &= 162.9 \quad \text{W/m}^2
 \end{aligned}$$

3.5 การออกแบบปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์

ปลอกฉนวนนำสายขนาดแรงดันกระแสสลับ 100 kV ที่ออกแบบสร้างจะต้องเป็นแบบคอนเดนเซอร์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 2.8 โดยใช้ฟิล์มเบลีเน็กซ์เป็นฉนวนของไส้คอนเดนเซอร์ของปลอกฉนวนนำสาย และใช้อะลูมิเนียมเทปพันเป็นชั้นสลับกับชั้นฉนวนเบลีเน็กซ์แทนโลหะเปลวทรงกระบอก โดยจะใช้ก๊าซ SF_6 ที่ความดันเดียวกับในถังหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมในชั้นฉนวนเบลีเน็กซ์ และมีปลอกปอร์ชเลนมีคริบทึบไส้คอนเดนเซอร์ในส่วนที่อยู่ในอากาศ

ขนาดปลอกฉนวนนำสายกำหนดด้วยขนาดแรงดันใช้งานซึ่งประกอบด้วย

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
- ความยาวส่วนที่อยู่ในอากาศ
- ความยาวส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF₆

1) การออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกฉนวนนำสาย

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกฉนวนนำสายกำหนดด้วยความคงทนของฟิล์ม

เมลิเน็กซ์ต่อแรงดันไฟฟ้า ในการออกแบบใช้ฟิล์มเมลิเน็กซ์หนา 0.05 mm ซึ่งมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 218 kVp/mm [11] เป็นฉนวนของไส้คอนเดนเซอร์ แกนตัวนำใช้ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.856 cm หนา 1.5 mm เนื่องจากมีรูปหอคัตที่จะเป็นทางออกของสายนำแรงสูง และสายของขดลวดคือควมอีก 4 เส้น รวม 5 เส้น ซึ่งใช้สายทองแดงขนาด 10 mm² พร้อมปลอกฉนวนเมลิเน็กซ์ทั้ง 5 เส้น ส่วนโลหะเปลวทรงกระบอกรอบนอกสุดใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.00 cm และมี 15 ชั้น แต่ละชั้นหนาประมาณ 3.715 mm (ดูรูปที่ 3.6) ซึ่งตัวเลขเหล่านี้ได้มาจากการลองผิดลองถูก เพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้เกิดค่าความคงทนของฉนวนที่ใช้โดยเฉพาะความเครียดสนามไฟฟ้าในก๊าซ SF₆ จากสมการ(2.4) และรูปที่ 3.6

ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยของทุกชั้นตามแนวรัศมี

$$\bar{E}_r = \frac{U}{(r_o - r_i)}$$

เมื่อ U คือ แรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินของหม้อแปลง ซึ่งใช้ค่าแรงดันทดสอบเท่ากับ 110 kV

r_o คือ รัศมีของ เปลวโลหะทรงกระบอกรอบนอกสุด

r_i คือ รัศมีด้านนอกของท่อตัวนำทองเหลือง

แทนค่า	U	=	110 × √2	kVp
	r_o	=	7.0	cm
	r_i	=	1.428	cm

$$\begin{aligned} \text{ได้} \quad \bar{E}_r &= \frac{110 \times \sqrt{2}}{(7.0 - 1.428)} \\ &= 27.9 \quad \text{kVp/cm} \end{aligned}$$

ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยตามแนวรัศมีของฟิล์มเมลิเนกซ์

$$\begin{aligned} \bar{E}_{r_{\text{PET}}} &\approx \bar{E}_r \\ &= 27.9 \quad \text{kVp/cm} \end{aligned}$$

ซึ่งน้อยกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มเมลิเนกซ์มาก คือ 2180 kVp/cm

$$\bar{E}_{r_{\text{SF}_6}} = \frac{\epsilon_{r_{\text{PET}}}}{\epsilon_{r_{\text{SF}_6}}} \times \bar{E}_{r_{\text{PET}}}$$

(ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.)

เมื่อ $\epsilon_{r_{\text{PET}}}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฟิล์มเมลิเนกซ์
 $\epsilon_{r_{\text{SF}_6}}$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของก๊าซ SF_6

$$\text{แทนค่า} \quad \epsilon_{r_{\text{PET}}} = 3.3$$

$$\epsilon_{r_{\text{SF}_6}} = 1.0$$

$$\text{ได้} \quad \bar{E}_{r_{\text{SF}_6}} = \frac{3.3}{1.0} \times 27.9$$

$$= 92.07 \quad \text{kVp/cm}$$

ซึ่งน้อยกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันของก๊าซ SF_6 ที่ความดัน 2.35 kg/cm² abs สำหรับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ

$$2.35 \times E_c = 2.35 \times 87.8$$

$$= 206.33 \quad \text{kVp/cm}$$

2) การออกแบบความยาวส่วนที่อยู่ในอากาศ

เนื่องจากจะใช้ปลอกหุ้มบอร์ชเลนมีคริบ ดังในรูปที่ 3.7 สำหรับหุ้มไส้คอนเดนเซอร์
ดังนั้น ระยะช่องว่างอากาศ (Clearance) ต้อง $\geq 4 \text{ m/MV}$ [3] สำหรับแรงดันกระแส-
สลับ 100 kV จะมีระยะช่องว่างอากาศ $l_{\text{air}} \geq 40 \text{ cm}$ ใช้ l_{air} ประมาณ 45 cm
(ดูรูปที่ 3.7)

3) การออกแบบความยาวส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF₆

เนื่องจากจะใช้ฟิล์ม เมลิเนกซ์หนา 0.35 mm ทำเป็นคริบจำนวน 4 คริบ
จากข้อ 2 ระยะตามผิวฉนวนที่มีคริบในอากาศจะต้องมีค่า $\geq 4 \text{ m/MV}$ สำหรับแรงดันกระแสสลับ
ดังนั้นระยะตามผิวฉนวนที่มีคริบในก๊าซ SF₆

$$l_{\text{SF}_6} = \frac{4 \text{ m} \times U \times E_{\text{c air}}}{1 \text{ MV} \times P \times E_{\text{c}}} \quad \text{m}$$

เมื่อ U คือ แรงดันกระแสสลับที่กำหนด (MV)

P คือ ความดันก๊าซ (bar)

$E_{\text{c air}}$ คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศมีค่าเท่ากับ 24.4 kVp/cm [3]

E_{c} คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ มีค่าเท่ากับ 87.8 kVp/cm.bar

แทนค่า $U = 100 \text{ kV} = 0.1 \text{ MV}$

$P = 2.35 \text{ kg/cm}^2 = 2.35 \text{ bar}$

ได้ $l_{\text{SF}_6} = \frac{4 \text{ m} \times 0.1 \text{ MV} \times 24.4 \text{ kVp/cm}}{1 \text{ MV} \times 2.35 \text{ bar} \times 87.8 \text{ kVp/cm.bar}}$

$= 0.0473 \text{ m}$

$= 4.73 \text{ cm}$

ใช้ $l_{\text{SF}_6} = 12 \text{ cm}$

เพื่อפקเตอร์ความปลอดภัย (ดูรูปที่ 3.6)

การควบคุมสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนให้เท่าๆ กัน (โดยเฉพาะความยาวส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF_6 ซึ่งสั้นกว่าความยาวส่วนที่อยู่ในอากาศ) เพื่อป้องกันการวาวไฟตามผิวหรือเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวฉนวนต้องใส่ชั้นโลหะ เปลวทรงกระบอกที่มีความยาวและตำแหน่งที่เหมาะสม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 2.8 ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

การออกแบบความยาวและตำแหน่งชั้นโลหะ เปลวทรงกระบอก

จากระยะช่องว่างในอากาศ l_{air} และในก๊าซ SF_6 l_{SF_6} ที่คำนวณได้ จะได้ความยาวรวมประมาณ $45 + 12 = 57$ cm (ความยาวของแกนตัวนำประมาณ 66 cm เนื่องจากรวมความหนาของส่วน เหล็กกดคปลอกหุ้มปอร์ชเลนและขอบตัวถังด้วย)

อัตราส่วนความยาวส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF_6 ต่อความยาวทั้งหมด

$$\frac{l_{SF_6}}{l_{SF_6} + l_{air}} = \frac{12}{57}$$

$$= 0.2105$$

หรือ

$$\frac{l_{SF_6} + l_{air}}{l_{SF_6}} = \frac{4.75}{1}$$

ใช้

$$\frac{l_{SF_6} + l_{air}}{l_{SF_6}} = \frac{3.65}{1}$$

(เพื่อเพิ่มความยาวส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF_6 ของเปลวโลหะทรงกระบอก จะได้ลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนตรงขอบของโลหะเปลว)

ในการคำนวณความยาวของ เปลวโลหะทรงกระบอกทุกชั้น จะแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF_6 และส่วนที่อยู่ในอากาศ ซึ่งความยาวทั้งสองจะแยกกันโดยเส้นอ้างอิง ดังในรูปที่ 3.6

ตัวอย่างการคำนวณ

จากรูปที่ 3.6 เลือก $l_{14} = 59$ cm

(เนื่องจากความยาวของแกนตัวนำประมาณ 66 cm) จากสมการ 2.1 จะได้

$$\frac{l_o}{\ln(r_o/r_1)} = \frac{l_1}{\ln(r_1/r_2)} = \frac{l_{14}}{\ln(r_{14}/r_{15})}$$

$$\frac{l_{14}}{\ln(r_{14}/r_{15})} = 255.838$$

ดังนั้น $l_o = 254.838 \times \ln \frac{r_o}{r_1}$

$$= 254.838 \times \ln \frac{7.00}{6.63}$$

$$= 13.91 \text{ cm}$$

จาก $\frac{l_{SF_6}}{l_{SF_6} + l_{air}} = \frac{1}{3.65}$

จะได้ความยาวของ เปลวโลหะทรงกระบอกส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF_6 รอบนอกสุด

$$l_{o SF_6} = \frac{(l_{o SF_6} + l_{o air})}{3.65}$$

$$= \frac{3.91}{3.65} = 3.81 \text{ cm}$$

และความยาวของ เปลวโลหะทรงกระบอกส่วนที่อยู่ในอากาศรอบนอกสุด

$$l_{o air} = 13.91 - 3.81$$

$$= 10.10 \text{ cm}$$

ความยาวและตำแหน่ง เปลวโลหะทรงกระบอกทุกชั้น แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3,1 ความยาวของ เปลวโลหะทรงกระบอกแต่ละชั้นของปลอกฉนวนนำสาย
แบบคอน เคน เซอร์ที่ออกแบบสร้าง

i	r_i (cm)	$l_{SF_6} + l_{air}$ (cm)	l_{air} (cm)	l_{SF_6} (cm)
14	1.80	59.0	42.835	16.164
13	2.17	47.83	34.725	13.104
12	2.54	40.26	29.23	11.03
11	2.91	34.75	25.23	9.52
10	3.285	30.58	22.20	8.378
9	3.65	27.30	19.82	7.48
8	4.03	24.64	17.89	6.75
7	4.40	22.45	16.30	6.15
6	4.77	20.69	15.02	5.668
5	5.14	19.11	13.87	5.235
4	5.514	17.77	12.90	4.87
3	5.88	16.59	12.04	4.545
2	6.26	15.62	11.34	4.279
1	6.63	14.64	10.63	4.01
0	7.00	13.91	10.10	3.81

จากสมการ(2.4) และรูปที่ 2.19 ข. ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปลายกระบอกโลหะเปลวใดๆ ตามแนวแกนตัวนำ

$$\bar{E}_z = \frac{U}{(r_o - r_i)} \times \frac{r^2}{r_o l_o^*}$$

เนื่องจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า \bar{E}_z ตรงปลายกระบอกโลหะเปลวของส่วนที่อยู่ในก๊าซ SF₆ จะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบจึงคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้า \bar{E}_z ตรงตำแหน่งนี้ค่าหนึ่งเพียงพอ (ที่ $r = r_o = 7.0$ cm)

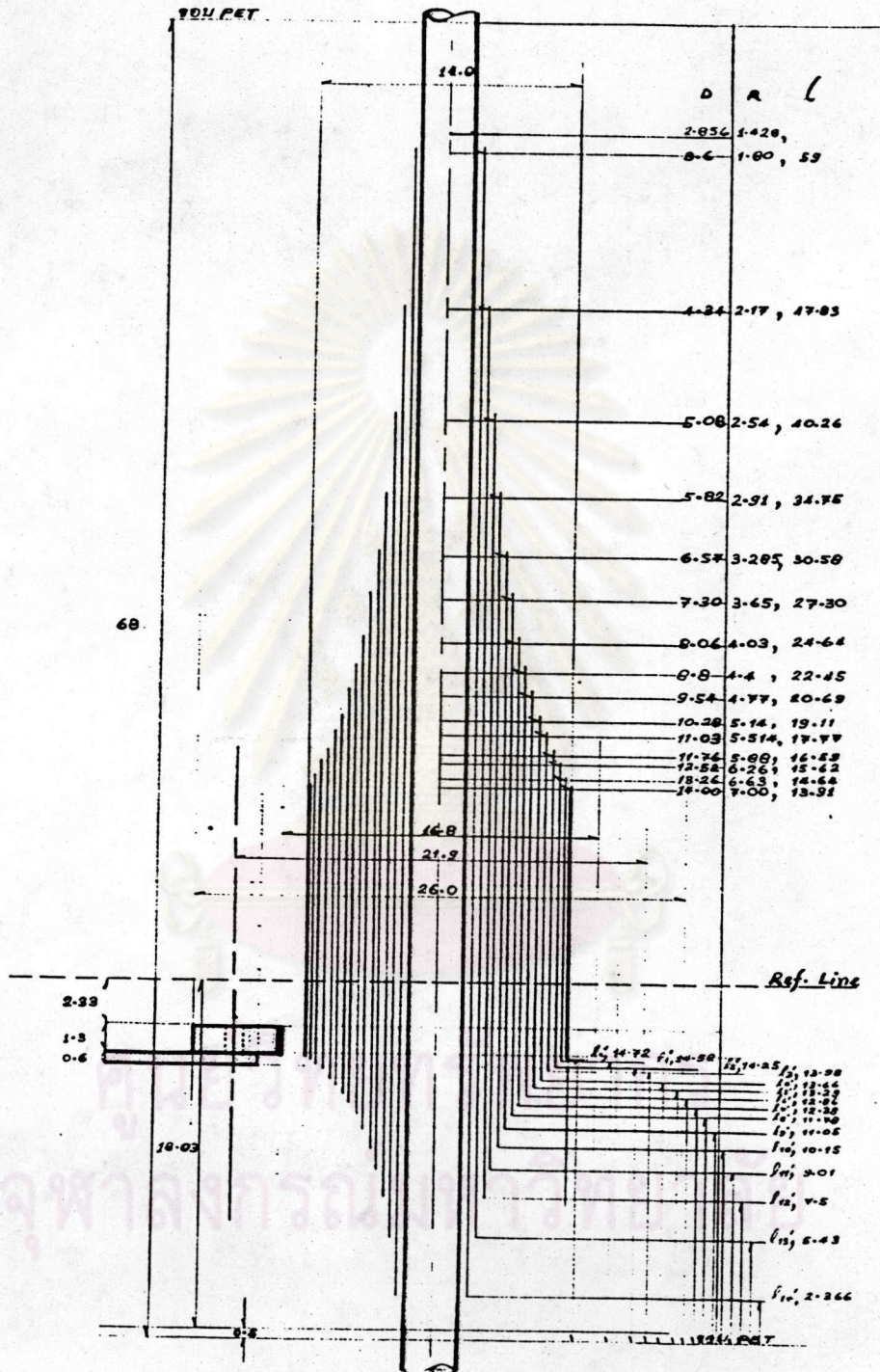
แทนค่า	U	=	110 × √2	kVp
	r _o	=	7.0	cm
	r	=	7.0	cm
	r _i	=	1.428	cm
	l _o	=	2 × l _o SF ₆	
		=	2 × 3.81	
		=	7.62	cm

ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกนสูงสุด

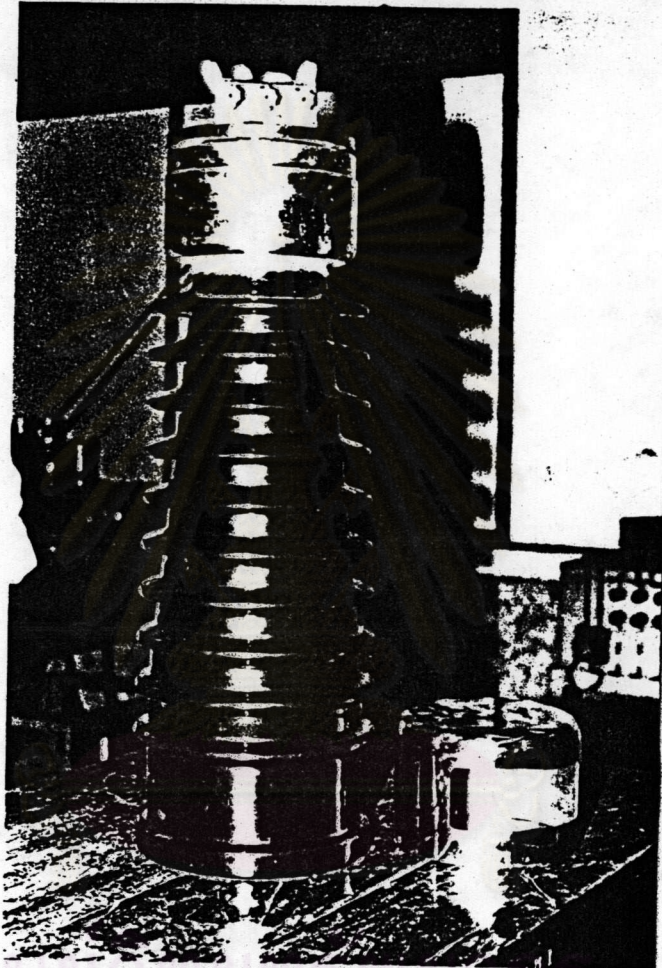
$$\begin{aligned} \bar{E}_{zm} &= \frac{110 \times \sqrt{2}}{(7.0 - 1.428)} \times \frac{(7.0)^2}{(7.0 \times 7.62)} \\ &= 25.65 \text{ kVp/cm} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดตามแนวแกนตัวนำในก๊าซ SF₆ \bar{E}_{zm} SF₆ และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดตามแกนตัวนำในฟิล์มเมลิเนกซ์ \bar{E}_{zm} PET = 25.65 kVp/cm ซึ่งน้อยกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนทั้งสอง คือ 206.33 kVp/cm และ 2180 kVp/cm สำหรับก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 2.35 bar และฟิล์มเมลิเนกซ์ตามลำดับ

* $2l_o$ SF₆ ใช้แทนค่า l_o ในสมการ (2.4) เพราะสมการนี้ได้มาจากการคำนวณสำหรับปลอกฉนวนนำสายแบบคอนเดนเซอร์ที่มีความยาวทั้ง 2 ข้างสมมาตรกัน



รูปที่ 3.6 ภาพตัดไม้คอนเคอร์ของปลอกถนวนนำสายที่ออกแบบสร้าง



ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายปลอกหุ้มปอร์ซเลนที่ออกแบบสร้าง

การออกแบบอิ เล็ก ไตรดแรงสูง

เพื่อป้องกันมิให้เกิดโคโรนาที่ปลายแรงสูงของปลอกฉนวนนำสายแบบคอน เคน เซอร์ที่ออกแบบสร้าง อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินไป เมื่อใส่ซิลด์เข้าไปจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงต่ำกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ของอากาศ ดังนั้น ถ้าใช้อิเล็ก-ไตรดทรงกลม รัศมีของอิ เล็ก ไตรดทรงกลมหาได้จาก [3]

$$r = \frac{U}{25}$$

เมื่อ U คือ แรงดันสูงสุดของปลายแรงสูง (kV_p)

r คือ รัศมีของทรงกลม (cm)

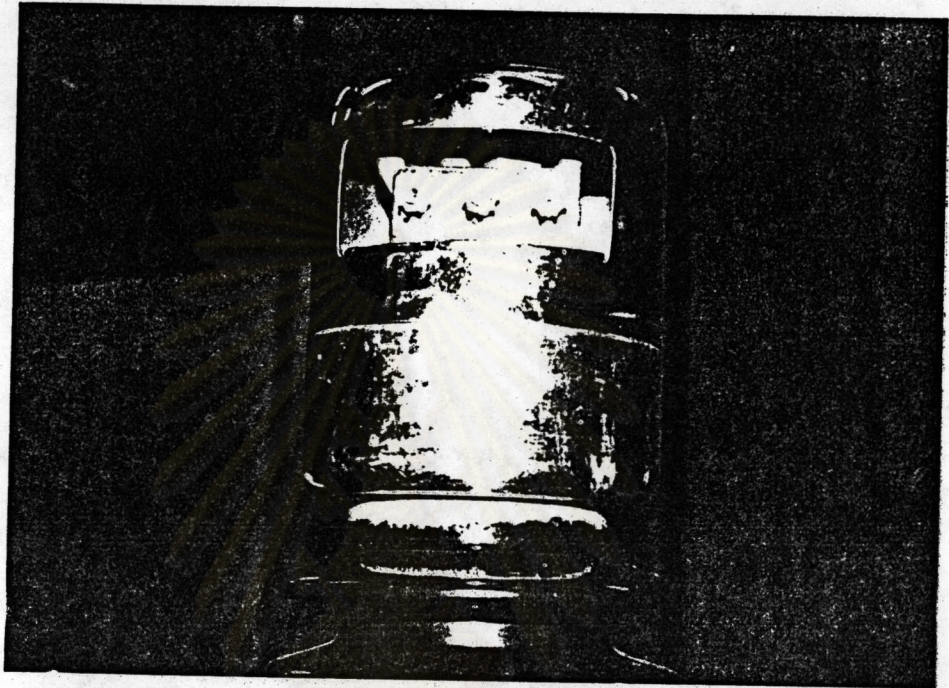
แทนค่า $U = 100 \times \sqrt{2}$

ได้ $r = \frac{100 \times \sqrt{2}}{25}$

$= 5.65$ cm

แต่เพื่อความง่ายจะใช้ทรงกระบอก โดยโค้งมนตรงขอบและมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอิ เล็ก ไตรดทรงกลมที่คำนวณได้ด้วยแฟกเตอร์ความปลอดภัย ดังในรูปที่ 3.8

ศูนย์วิจัยสหวิทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแรงสูง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย