

บทที่ 3

การออกแบบ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการออกแบบและสร้างในโครงการเป็นหม้อแปลงขนาด 1600 kVA แรงดันที่กำหนด 12/24 kV - 416/240 V 3 เฟส 50 Hz สำหรับใช้ภายในอาคาร ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ ฉนวนของขดลวดแรงสูงใช้คลาส A และการต่อขดลวดใช้กลุ่มเวกเตอร์ Dyn1 และมีค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรต่ำ คือ 6 %

เนื่องจากหม้อแปลงฉนวนก๊าซ SF₆ ใช้ก๊าซเป็นตัวระบายความร้อน ซึ่งระบายความร้อนได้เพียงครั้งหนึ่งของน้ำมันหม้อแปลง เกณฑ์ในการออกแบบหม้อแปลงนี้จึงพิจารณาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงให้มีค่าต่ำสุด คำนึงถึงราคาของแกนเหล็กและทองแดงที่เหมาะสม เลือกวัสดุที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่มีอยู่ภายในโรงงานเพื่อความคล่องตัวในการผลิต

3.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลง

เงื่อนไขในการออกแบบส่วนประกอบจะกำหนดจาก ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ ค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ และรูปแบบการจัดเรียงขดลวดเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ต้องการ

เมื่อกำหนดแกนเหล็กและขดลวดแล้ว ก็สามารถคำนวณน้ำหนัก ราคา กำลังสูญเสียของเหล็กและทองแดงที่ใช้ จากค่ากำลังสูญเสียนำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดตลอดจนนำมาออกแบบตัวถัง และจำนวนครีบของหม้อแปลงโดยการประมาณพื้นที่การระบายความร้อนก่อน เพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงไม่เกินมาตรฐานกำหนด ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ต้องใช้พิจารณาในการเลือกจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ เพื่อใช้ในการออกแบบหม้อแปลงต่อไป

3.1.1 แกนเหล็ก

แกนเหล็กจะทำด้วยเหล็กซิลิกอน ที่มีจำหน่ายในเชิงการค้ามีหลายชนิด ในที่นี้หม้อแปลงที่ออกแบบต้องการให้มีกำลังสูญเสียไร้โหลดต่ำที่สุด จึงเลือกเหล็กซิลิกอน ZDKH หนา 0.23 mm และมีค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กโดยพิจารณาจากจุดที่ใกล้มีตัวของแกนเหล็ก ดังรูปที่ ค-2

เลือกค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กคือ 1.7 Tesla ซึ่งมีค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กค่อนำหนักประมาณ 0.85 W/kg ดังรูปที่ ค-1 ในภาคผนวก ค. [16]

3.1.2 ขดลวด

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดกำหนดด้วยค่าความหนาแน่นกระแส เนื่องจากหม้อแปลงที่ทำกรออกแบบนี้ได้เลือกคลาสของฉนวนเป็นฉนวนคลาส A จึงจำเป็นต้องให้มีค่ากำลังสูญเสียในขดลวดต่ำ ดังนั้นจึงลดค่าความหนาแน่นกระแสให้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.6 - 1.7 A/mm² [1] จากนั้นจึงคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและขนาดของลวดทองแดงที่ใช้ทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ เมื่อได้แล้วนำมาจัดวางรูปแบบของขดลวดต่อชั้น แล้วจึงกำหนดการฉนวนของขดลวด ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด จากการคำนวณจะได้จำนวนขดลวดแรงต่ำที่เหมาะสมเป็น 14 รอบ

3.2 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

เมื่อทราบจำนวนรอบขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลง สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้จากสมการ (2.3) แกนเหล็กของหม้อแปลงที่ออกแบบนี้มีร่องระบายความร้อนในแกนเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้แกนเหล็กบางจุดร้อนเกินไป กำหนดให้มีค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กต่ำกว่าที่ได้กล่าวมาแล้วคือมีค่า 1.64 Tesla ซึ่งได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กโดยแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (2.3) จะได้

$$A_c = \frac{E_{rms}}{\sqrt{2} \pi f N B_{max}} = \frac{240}{\sqrt{2} \pi \times 50 \times 14 \times 1.64} = 47055 \text{ mm}^2$$

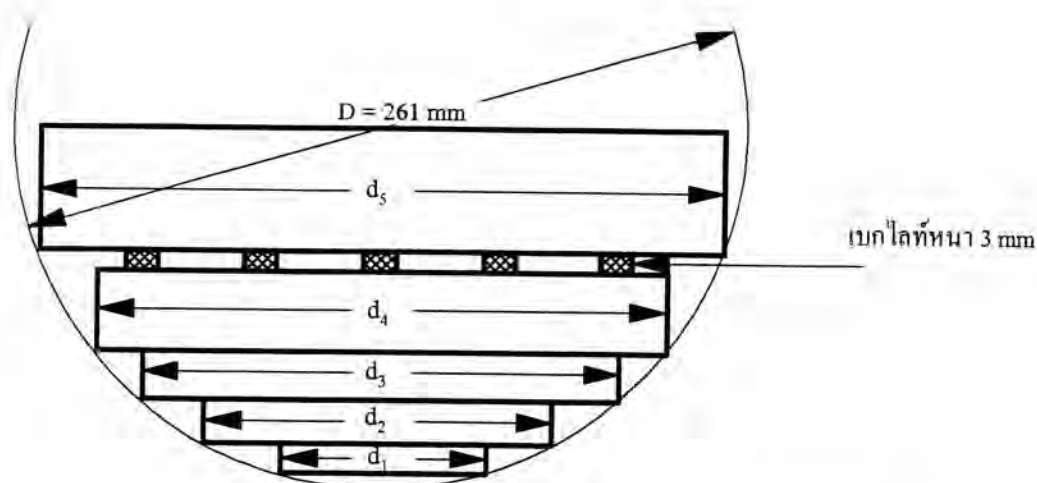
พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะทำเป็นรูปเหลี่ยมอัดในวงกลม โดยแบ่งแกนเหล็กเป็น 5 ชั้น พร้อมร่องระบายความร้อนตามแนวยาวดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้มีพื้นที่ระบายความร้อนของแกนเหล็กมีค่าไม่เกิน 212.7 W/mm² [1] รายละเอียดของมิติแกนเหล็กแสดงในภาค ผนวก ง. ได้ค่าแฟกเตอร์แกนเหล็กคือ 90.8% และค่าแฟกเตอร์เนื้อเหล็กซิลิกอนคือ 97% จากสมการ (2.32) จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กเท่ากับ

$$D = \sqrt{\frac{4 A_c}{\pi K_{ls} K_{cs}}} = \sqrt{\frac{4 \times 47055}{\pi \times 0.97 \times 0.908}} = 261 \text{ mm}$$

จากเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก จึงหามิติของ d_1 , d_2 , d_3 , d_4 และ d_5 ได้ดังรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

$$d_1 = 0.314D = 82 \text{ mm}, \quad d_2 = 0.534D = 139 \text{ mm}, \quad d_3 = 0.707D = 185 \text{ mm}$$

$$d_4 = 0.846D = 221 \text{ mm} \text{ และ } d_5 = 0.950D = 248 \text{ mm}$$



รูปที่ 3.1 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและร่องระบายความร้อน

ขนาดของเหล็กขลิบก่อนที่มีจำหน่ายในเชิงการค้ามีขนาดความกว้างจำกัด โดยเริ่มตั้งแต่ขนาด 50 mm ถึง 330 mm ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกขนาดความกว้างของเหล็กขลิบก่อนที่มีจำหน่ายให้ได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กตามต้องการ ขนาดความกว้างและความหนาที่ใช้ในแต่ละชั้นมีดังนี้

$d_1 = 90 \text{ mm}$	หนา	12.4 mm
$d_2 = 140 \text{ mm}$	หนา	15.6 mm
$d_3 = 180 \text{ mm}$	หนา	17.0 mm
$d_4 = 210 \text{ mm}$	หนา	40.0 - 3.0 mm (เบกไลต์หนา 3 mm)
$d_5 = 250 \text{ mm}$	หนา	37.5 mm

เนื่องจากว่าเหล็กขนาดกว้าง 80 mm และ 220 mm ไม่มีในโรงงานจึงต้องเปลี่ยนเป็นขนาด 90 mm และ 210 mm แทนตามลำดับ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเมื่อไม่รวมพื้นที่ร่องระบายความร้อนดังรูปที่ 3.1 จะได้

$$A = 2 \times [(90 \times 12.4) + (140 \times 15.6) + (180 \times 17.0) + (210 \times 40.0) + (250 \times 37.5) - (210 \times 3)]$$

$$= 47010 \text{ mm}^2$$

เมื่อคิดแฟกเตอร์เนื้อเหล็กสำหรับเหล็กขลิบก่อน 97% จะได้พื้นที่แกนเหล็กใช้งานจริงเท่ากับ

$$A_c = 47010 \times 0.97 = 45600 \text{ mm}^2$$

และสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจากสมการ (2.3)

$$B_{\max} = \frac{E_{\text{rms}}}{\sqrt{2\pi f N A_c}} = \frac{240}{\sqrt{2\pi \times 50 \times 14 \times 45600 \times 10^{-6}}} = 1.692 \text{ Tesla}$$

ซึ่งค่าความหนาแน่นไม่เกิน 1.700 Tesla ตามที่กำหนดไว้

3.3 มิติขดลวดแรงต่ำ

หม้อแปลงขนาด 1600 kVA แรงดันที่กำหนด 416/240 V กระแสที่กำหนดของด้านแรงต่ำในขดลวดต่อแบบ Y เท่ากับ

$$I_{LV} = \frac{1600 \times 10^3}{3 \times 240} = 2222.22 \text{ A}$$

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ค่าความหนาแน่นกระแสที่กำหนดมีค่าประมาณ 1.6 - 1.7 A/mm² ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของทองแดงด้านแรงต่ำจะอยู่ในช่วง 1307 - 1389 mm² จึงเลือกขดลวดทองแดงแบนเปลือกขนาด 4.0×11.0 mm² จำนวน 30 เส้นขนานกันได้พื้นที่เท่ากับ 1320 mm² ค่าความหนาแน่นกระแสของขดลวดแรงต่ำ คือ

$$J_{LV} = \frac{2222.22}{1320} = 1.684 \text{ A/mm}^2$$

การใช้ลวดเปลือกพันเป็นขดลวดแรงต่ำ เพื่อให้การระบายความร้อนดีขึ้น โดยเว้นระยะฉนวนระหว่างรอบเท่ากับ 4.5 mm และมีการเพิ่มร่องระบายความร้อนภายในรอบ 3 mm ลักษณะภาคตัดขวางของขดลวดแรงต่ำจะเป็นดังรูปที่ 3.2 โดยระยะฉนวนและร่องระบายความร้อนใช้เบกไลท์กัน

จากจำนวนรอบที่ใช้ในการพัน 14 รอบ สามารถคำนวณความสูงของขดลวดแรงต่ำได้ โดยต้องเผื่อระยะเพิ่มเนื่องจากการสลับตำแหน่งของขดลวดทองแดงประมาณ 1.5 รอบ และการพันขดลวดแบบ spiral อีกประมาณ 50 mm ดังนั้นความสูงและความหนาของขดลวดแรงต่ำคือ

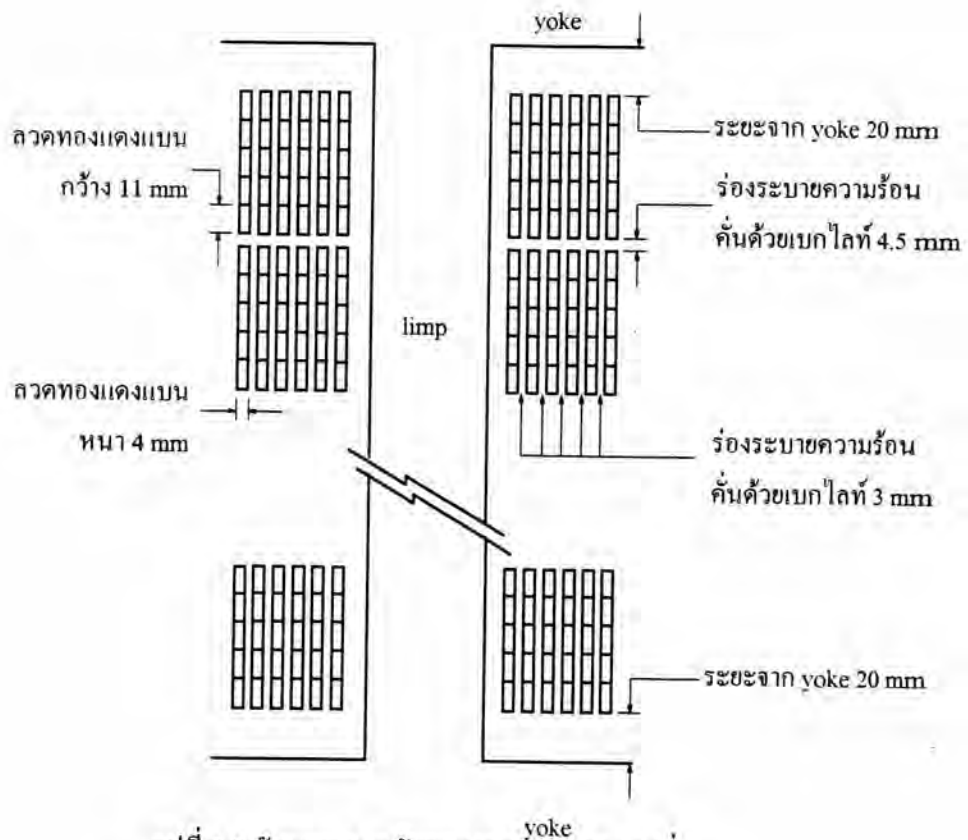
$$h_{LV} = 55 \times (14 + 1.5) + (13 \times 4.5) + 50 = 961 \text{ mm}$$

$$w_{LV} = (4 \times 6) + (3 \times 5) = 39 \text{ mm}$$

ฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแกนเหล็กใช้โพทีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด 75 μm พันซ้อนกัน 10 ชั้น เพื่อให้มีความแข็งแรงทางกลพอในขณะที่สวมขดลวดแรงต่ำ ระหว่างโพทีเอสเตอร์ฟิล์มกับขดลวดแรงต่ำจะมีร่องระบายความร้อน โดยใช้เบกไลท์หนา 10 mm เป็นตัวคั่น ดังนั้นจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงในและนอกของขดลวดแรงต่ำประมาณ

$$D_{i_LV} = 261 + 2 \times (10 + 10 \times 0.075) = 283 \text{ mm}$$

$$D_{o_LV} = 283 + 2 \times 39 = 361 \text{ mm}$$



รูปที่ 3.2 ลักษณะภาคตัดขวางของชุดลวดแรงต่ำ

3.4 ชุดลวดแรงสูง

จากขนาดของหม้อแปลง 1600 kVA แรงดันที่กำหนด 24 kV สามารถคำนวณกระแสที่ กำหนดในชุดลวดแรงสูงต่อแบบ Δ คือ

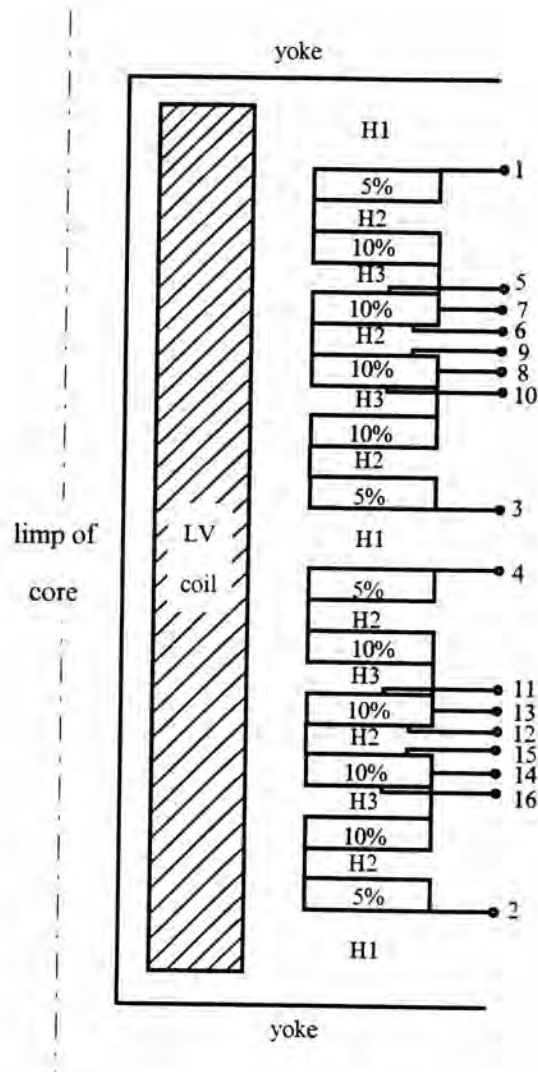
$$I_{HV} = \frac{1600}{3 \times 24} = 22.22 \text{ A}$$

ลวดแรงสูงที่นำมาใช้เป็นลวดอาบนำยา PVF ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 mm เมื่อเคลือบ นำยาจะมีขนาด 3.05 mm โดยใช้ 2 เส้นขนานกันมีพื้นที่ประมาณ 13.21 mm^2 ได้ค่าความหนาแน่น กระแสของลวดแรงสูง คือ

$$J_{HV} = \frac{22.22}{13.21} = 1.682 \text{ A/mm}^2$$

การแบ่งจำนวนชุดลวด พิจารณาจากรูปที่ 2.6x ที่ค่า $\alpha = 5$ ค่าแรงดันประมาณ 20% แรกของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะตกคร่อมประมาณ 5% แรกของชุดลวด หม้อแปลงที่ออกแบบนี้มี 2 ระบบแรงดันคือ 12/24 kV ตามมาตรฐาน [15] ระบบแรงดัน 24 kV ต้องทดสอบด้วย

BIL 125 kV และที่ระบบ 12 kV ทดสอบ BIL 75 kV แต่ในการออกแบบนี้พิจารณาจากระบบ 24 kV เป็นเกณฑ์ ดังนั้นจึงแบ่งขดลวดออกเป็น 12 ตอนประกอบด้วยตอน 5%, 4 ตอน ตอนละ 70 รอบ และ 10%, 8 ตอน ตอนละ 140 รอบ และแบ่งออกเป็น 2 ชุด (เนื่องจากมี 2 ระบบ) ชุดละ 6 ตอนประกอบด้วย 5%, 2 ตอนและ 10%, 4 ตอนดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแบ่งตอนขดลวดแรงสูง

จากรูปที่ 3.3 การแบ่งระยะระหว่างตอนของขดลวด พิจารณาจากภาคผนวก ข. ค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดรูปร่างต่างๆ สำหรับก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ มีค่าประมาณ 7 kV/mm แต่เนื่องจากอิเล็กโตรดไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการออกแบบนี้จึงเลือกค่า

ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าในก๊าซ SF₆ ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของค่าทดลอง คือ 3.5 kV/mm ระยะระหว่างขดลวดในแต่ละตอนจึงคำนวณได้ดังนี้

- ระยะ H1 เป็นระยะระหว่างขดลวดแรงดัน 2 ระบบ เมื่อทดสอบเป็นระบบ 12 kV โดยจุด 2 และ 3 จะต่อลงกราวด์ ถ้าพิจารณา ระบบ 24 kV เป็นเกณฑ์แรงดันทดสอบ BIL 125 kV จะป้อนเข้าที่จุด 1 และ 4 ดังนั้นการคำนวณระยะ H1 โดยเพิ่มอีก 50% จะได้

$$H1 = \frac{125 \times 1.5}{3.5} = 53.6 \text{ mm}$$

และจัดให้เป็นตัวเลขลงตัวเพื่อสะดวกในการจัดหาเบกไลต์ระยะ H1 จึงเท่ากับ 60 mm

- ระยะ H2 เป็นระยะระหว่างขดลวดที่คาดว่าจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จึงได้กล่าวมาในข้างต้นว่าประมาณ 20% ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะตกคร่อมช่วงแรกสูงคิดเป็นแรงดันเท่ากับ $0.2 \times 125 = 25 \text{ kV}$ จากการกำหนดระยะ H1 เท่ากับ 60 mm ดังนั้นระยะ H2 จะได้

$$H2 = 0.2 \times 60 = 12 \text{ mm}$$

และเลือกขนาดเบกไลต์ 15 mm ระยะ B จึงเท่ากับ 15 mm

- ระยะ H3 เป็นระยะระหว่างตอน 10% ซึ่งถ้าสมมติแรงดันเกินอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่ากระจายสม่ำเสมอ ($\alpha = 0$) จะมีแรงดันตกคร่อมระหว่างขดสูงสุดเท่ากับ $20\% \times 125 = 25 \text{ kV}$ ดังนั้นระยะ H3 โดยเพิ่มอีก 25% จะได้

$$H3 = \frac{25 \times 1.25}{3.5} = 8.9 \text{ mm}$$

ให้ระยะ C เท่ากับ 10 mm

การพันลวดแรงสูงของตอน 5% และ 10% โดยให้จำนวนชั้นของลวดเท่ากัน ถ้าให้จำนวนชั้นของลวดมากเกินไปจะทำให้ความสูงรวมของลวดแรงสูงต่ำเกินไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีค่าสูงและยังทำให้ลวดแรงต่ำและแรงสูงไม่สมดุลในด้านฟลักซ์แม่เหล็ก จึงจำเป็นต้องหาจำนวนชั้นที่เหมาะสม และต้องทำให้ระยะห่างจาก yoke ถึงลวดแรงสูงอย่างน้อยเท่ากับระยะ H1 จำนวนชั้นที่เหมาะสมในการออกแบบนี้คือ 13 ชั้น โดยจะคั่นด้วยเบกไลต์หนา 3 mm และโพลียเอสเตอร์ฟิล์มหนา 75 μm ทุกๆ 3 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะได้จำนวนรอบต่อชั้นของลวดทั้ง 2 ตอนดังนี้

$$\text{ตอน 5\%, 70 รอบ} = \frac{70}{13} = 6 \text{ รอบ}$$

$$\text{ตอน 10\%, 140 รอบ} = \frac{140}{13} = 11 \text{ รอบ}$$

จะได้ความสูงและความหนาของลวดแรงสูงประมาณ

ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด 75 μm ซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ 10 kV แต่เนื่องจากหม้อแปลงระบบ 24 kV จะทดสอบ BIL 125 kV เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายระหว่างขดลวดทั้งสองชุด จึงออกแบบให้สามารถทนแรงดันได้ 250 kV ซึ่งต้องพันทั้งหมด 25 ชั้น และมีการคั่นด้วยเบกไลท์ด้านละ 10 mm ทั้งด้านแรงสูงและแรงต่ำ ดังรูปที่ 3.5 จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางวงในและนอกของขดลวดแรงสูง

$$D_{i_HV} = 361 + 2 \times (20 + 25 \times 0.075) = 405 \text{ mm}$$

$$D_{o_HV} = 405 + (2 \times 50) = 505 \text{ mm}$$

3.5 มิติของแกนเหล็ก

การกำหนดมิติของแกนเหล็กมีผลต่อกำลังสูญเสียไว้โหลด

3.5.1 ขนาดแกนเหล็กและกำลังสูญเสีย

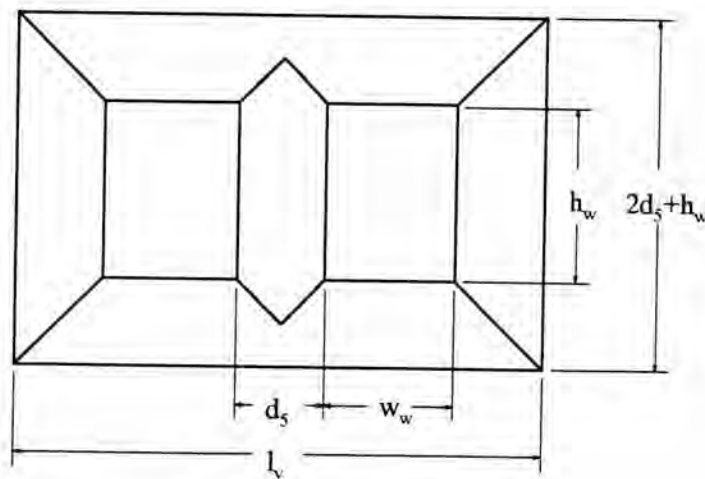
ขนาดของแกนเหล็กจะกำหนดด้วยความสูงของขดลวด และระยะระหว่างเฟสของขดลวดแรงสูง โดยระยะต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

h_w คือ ความสูงของขดลวดที่สูงที่สุดรวมกับช่องว่างระหว่างขดลวดถึง yoke อีกด้านละ 20 mm ดังนั้น $h_w = 961 + (2 \times 20) = 1001 \approx 1000 \text{ mm}$

w_w คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดแรงสูงรวมระยะระหว่างเฟส ซึ่งระยะระหว่างเฟสเมื่อ 3 เท่า จะได้ $\frac{125 \times 3}{3.5} = 107 \approx 100 \text{ mm}$ ลบด้วยความกว้างของเหล็กซิลิกอนที่กว้างที่สุด ดังนั้น

$$w_w = 505 + 100 - 250 = 355 \text{ mm}$$

ดังนั้น $l_y = 3d_s + 2w_w = (3 \times 250) + (2 \times 355) = 1460 \text{ mm}$ ซึ่งค่าต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขนาดของแกนเหล็ก

จากขนาดของแกนเหล็กนำไปคำนวณน้ำหนักของแกนเหล็ก ซึ่งพื้นที่แกนเหล็ก A_c เท่ากับ 45600 mm^2 และความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ $7.65 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

$$\begin{aligned} W_c &= 7.65 \times 10^{-6} A_c (3h_u \times 2l_v) \\ &= 7.65 \times 10^{-6} \times 45600 (3 \times 1000 + 2 \times 1460) = 2065.1 \text{ kg} \end{aligned}$$

แกนเหล็กที่ออกแบบนี้มีค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $B_{\max} = 1.692 \text{ Tesla}$ จากรูปที่ ค-1 ในภาคผนวก ค. มีค่ากำลังสูญเสียต่อน้ำหนักประมาณ 0.85 W/kg และเผื่ออีก 15% เป็นค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากการเรียงเหล็ก และจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ไม่เป็นไปตามแนว orientation ของเหล็ก ดังนั้นกำลังสูญเสียของแกนเหล็กคือ

$$P_c = 1.15 \times 0.85 \times 2065.1 = 2019 \text{ W}$$

เนื่องจากแกนเหล็กมีการคั่นให้เกิดร่องระบายความร้อนดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นพื้นที่ผิวของแกนเหล็กที่สัมผัสกับก๊าซเท่ากับ

$$A_{sc} = 1.3910 + 0.9627 + 0.8635 + 3.7024 + 3.8115 = 10.7311 \text{ m}^2$$

และ
$$P_c / A_{sc} = \frac{2019}{10.7311} = 188.1 \text{ W/m}^2$$

ค่ากำลังสูญเสียของแกนเหล็กต่อพื้นที่ผิวที่ได้ มีค่าต่ำกว่า 212.7 W/m^2 [1]

3.5.2 กำลังสูญเสียขณะจ่ายโพลดและอิมพีแดนซ์ลัดวงจร

การหาค่ากำลังสูญเสียภายในขดลวด จะต้องทราบน้ำหนักโดยประมาณของขดลวดก่อน จากเส้นผ่านศูนย์กลางวงในและนอกของลวดแรงต่ำและแรงสูง จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดทั้งสองเท่ากับ

$$\begin{aligned} D_{m_{LV}} &= \frac{283 + 361}{2} = 322 \text{ mm} \\ D_{m_{HV}} &= \frac{405 + 505}{2} = 455 \text{ mm} \end{aligned}$$

ในการคำนวณน้ำหนักของลวดแรงต่ำ พิจารณาจากความสูงของทองแดงเนื่องจากการพันแบบ spiral และมีการไขว้สาย โดยไม่รวมความสูงที่เป็นช่องคั่นระหว่างรอบ ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำเท่ากับ

$$\frac{961 - (13 \times 45)}{55} = 16.41 \text{ รอบ}$$

จากค่าความหนาแน่นของทองแดงเท่ากับ $8.9 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ น้ำหนักของทองแดงด้านแรงสูงและ

แรงต่ำทั้ง 3 เฟสได้

$$W_{i_{LV}} = 3 \times 8.9 \times 10^{-6} \times 16.41 \times 322\pi \times 1320 = 585.1 \text{ kg}$$

$$W_{i_{HV}} = 3 \times 8.9 \times 10^{-6} \times 1400 \times 455\pi \times 13.21 = 705.8 \text{ kg}$$

จากสมการ (2.6) และ (2.7) กำลังสูญเสียของทองแดงที่ 75°C เท่ากับ

$$P_i = 2.37 J^2 W_i$$

และเพื่ออีกประมาณ 20% เป็นค่าของกำลังสูญเสียสเตรชและกระแสไหลวนของขดลวด จะได้

$$P_{i_{LV}} = 1.20 \times 2.37 \times 1.684^2 \times 585.1 = 4719 \text{ W}$$

$$P_{i_{HV}} = 1.20 \times 2.37 \times 1.682^2 \times 705.8 = 5679 \text{ W}$$

ดังนั้นกำลังสูญเสียขณะจ่ายโหลดรวมเท่ากับ $4719 + 5679 = 10398 \text{ W}$ จากสมการ (2.8) และค่าความต้านทานเมื่อเทียบกับด้านแรงสูงที่ต่อแบบ Δ เท่ากับ

$$R = \frac{10398}{3 \times 3 \times 22.22^2} = 2.34 \Omega \text{ phase}$$

ในการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์พิจารณาจากรูปที่ 2.5 เมื่อทราบค่าต่างๆ จากที่คำนวณไว้ข้างต้นคือ

$h_1 = 0.874 \text{ m}$	$h_2 = 0.961 \text{ m}$	ดังนั้น $h_m = 0.9175 \text{ m}$
$D_1 = 0.505 \text{ m}$	$D_2 = 0.283 \text{ m}$	ดังนั้น $D_m = 0.394 \text{ m}$
$a_1 = 0.05 \text{ m}$	$a_2 = 0.039 \text{ m}$	และ $\delta = 0.02 \text{ m}$

จากสมการ (2.10) เมื่อเทียบไปทางด้านแรงสูงที่ต่อแบบ Δ จะได้

$$X = \frac{\mu_0 \times 2\pi^2 \times 50 \times 0.394}{3 \times 0.9175} \left(0.02 + \frac{0.05 + 0.039}{3} \right) 1400^2 = 17.282 \Omega \text{ phase}$$

และจากสมการ (2.11) ค่าเบสอิมพีแดนซ์เมื่อคิดเทียบกับด้านแรงสูง

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{24^2}{1.6} = 360 \Omega$$

และ $R_{eq} = \frac{R}{Z_b} = \frac{2.34}{360} = 0.65\%$

$$X_{eq} = \frac{X}{Z_b} = \frac{17.282}{360} = 4.8006\%$$

และค่าอิมพีแดนซ์ตั้งวงจรหรือเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์จะหาได้จาก

$$Z_{eq} = \sqrt{(R_{eq})^2 + (X_{eq})^2} = \sqrt{(0.65)^2 + (4.8006)^2} = 4.8444\%$$

3.6 ลักษณะการทำงานของหม้อแปลง

ลักษณะการทำงานที่สำคัญของหม้อแปลง ได้แก่ ค่าแรงดันแรงเกิน ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

3.6.1 ค่าแรงดันแรงเกิน

ค่าแรงดันหรือเปอร์เซ็นต์แรงเกินของหม้อแปลง คำนวณได้จากสมการ (2.15) ที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ = 1 จะได้

$$VR = \sqrt{\left(1 + \frac{0.65}{100}\right)^2 + \left(\frac{4.8006}{100}\right)^2} - 1 = 0.7644\%$$

และที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ = 0.8 จะได้

$$VR = \sqrt{\left(1 + 0.8 \times \frac{0.65}{100} + 0.6 \times \frac{4.8006}{100}\right)^2 + \left(0.8 \times \frac{4.8006}{100} - 0.6 \times \frac{0.65}{100}\right)^2} - 1 = 3.458\%$$

จากค่าแรงดันแรงเกิน 3.458 % มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่การไฟฟ้ากำหนด

3.6.2 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

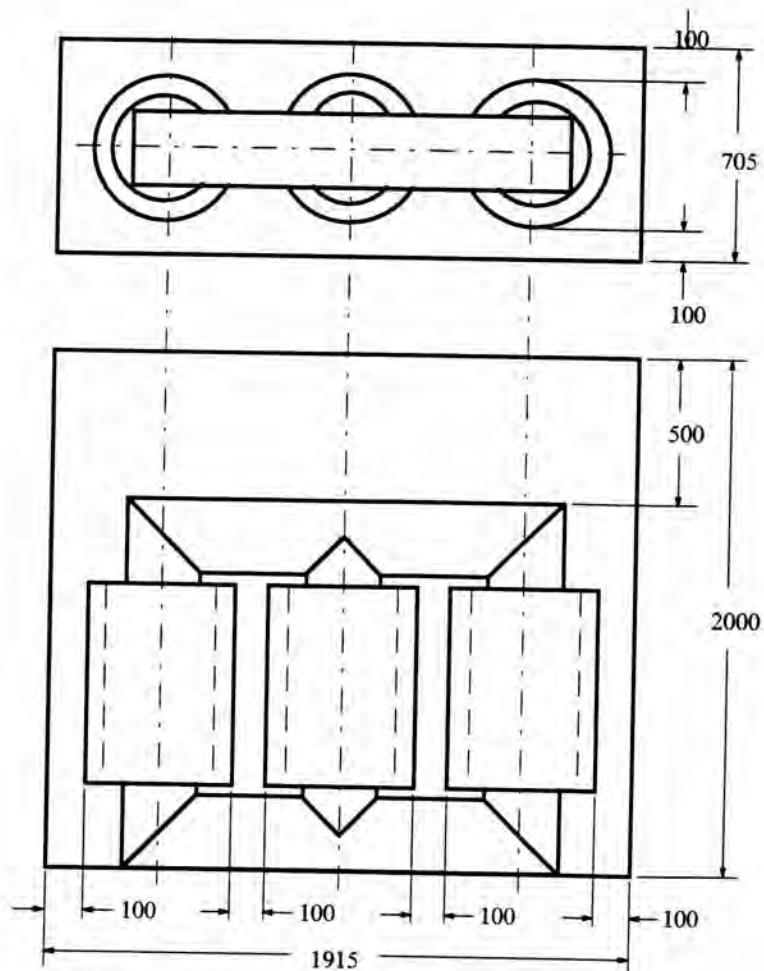
ประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าโหลดต่างๆ สามารถคำนวณจากสมการ (2.16) สำหรับค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3-1 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ = 1

รายการ	ที่โหลดขนาด (%)				
	20	40	60	80	100
กำลังสูญเสียไร้โหลด (W)	2195	2195	2195	2195	2195
กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (W)	433	1733	3900	6932	10832
กำลังสูญเสียรวม (W)	2628	3928	6095	9127	13027
กำลังไฟฟ้าด้านออก (kW)	320	640	960	1280	1600
ประสิทธิภาพ (%)	99.19	99.39	99.37	99.29	99.19

3.7 ขนาดถังของหม้อแปลง

ขนาดถังของหม้อแปลงเมื่อใส่แกนเหล็กและขดลวดแล้ว จะต้องมึระยะฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับผนังของถังเพียงพอที่สามารถทนแรงดันเกิน ซึ่งกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ระยะฉนวนดังกล่าวมีค่า 100 mm โดยเผื่อไว้ 3 เท่า เช่นเดียวกับระยะระหว่างเฟสในข้อ 3.5.1 และระยะจากฝาถังถึง yoke บนประมาณ 500 mm เนื่องจากต้องมึระยะพอที่จะติดตั้งตัวเปลี่ยนจุดแยกแรงดันและตัวเปลี่ยนจุดแยกระบบ ดังนั้นระยะต่างๆ และขนาดของถังจะได้ดังรูปที่ 3.7



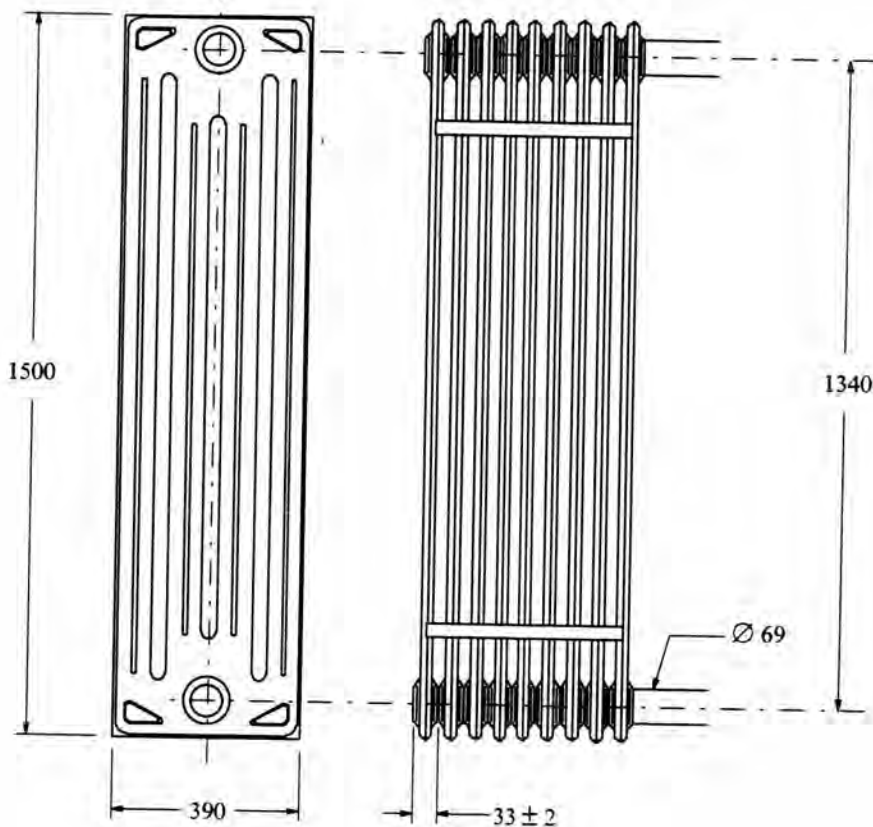
รูปที่ 3.7 แสดงระยะภายในและขนาดถังของหม้อแปลง

3.8 การระบายความร้อนและอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

การระบายความร้อนของหม้อแปลงที่ออกแบบนี้ เป็นการระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3 การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวของถังหม้อแปลงซึ่งขึ้นกับจำนวนครีบริบ โดยที่จะต้องไม่ให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงเกิน 65°C

พื้นที่ผิวและจำนวนครีบริบของถังหม้อแปลงนั้น ขึ้นกับพลังงานความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียของขดลวดและแกนเหล็ก เนื่องจากถังมีความสูงประมาณ 2000 mm เพื่อให้ใช้จำนวนครีบริบน้อยแต่มีพื้นที่ผิวของครีบริบมาก จึงเลือกความยาวครีบริบ 1500 mm กว้าง 390 mm โดยขนาดและระยะต่างๆ ของครีบริบแสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งมีพื้นที่ผิวดต่อครีบริบเท่ากับ

$$A_{s_fin} = 2 \times 15 \times 0.39 = 1.17 \text{ m}^2$$



รูปที่ 3.8 แสดงรายละเอียดต่างๆของครีบริบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อต่อระหว่างตัวถังและครีบบระบายความร้อน เป็นขนาดที่ ถูกกำหนดโดยโรงงานซึ่งมีขนาด 69 mm จากความยาวของถังประมาณ 1915 mm การติดครีบบ ระบายความร้อนจะติดเป็นชุด โดยแต่ละชุดมีจำนวนครีบท่อกันและห่างกันประมาณ 50 mm ดังนั้นจำนวนชุดของครีบท่อด้าน (โดยจะติดเฉพาะด้านยาวของถัง) เท่ากับ

$$\frac{1915}{390+50} = 4.35 \approx 4 \text{ ชุดต่อด้าน}$$

จากสมการ (2.28) และ (2.29) พบว่าความยาวของท่อระบายความร้อนมีผลต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของ ขดลวดและก๊าซภายในถัง จึงพยามเลือกความยาวของท่อให้สั้นที่สุดคือ 140 mm (โดยต้องมีระยะ พ้นเข็มขัดถังและสามารถทำงานได้สะดวก) จำนวนครีบท่อกันได้โดยการเริ่มสมมุติค่าก่อน แล้วทำ การคำนวณจนได้ค่าที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกินค่ากำหนดตามมาตรฐาน [15] ซึ่งได้ จำนวนครีบท่อกันทั้งหมดที่ใช้คือ 72 ครีบท่อกัน ซึ่งแบ่งเป็น 8 ชุด ชุดละ 9 ครีบท่อกัน

ในการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ อุณหภูมิเพิ่ม ได้แก่ ค่าเบตา (β) ระยะ H_R , H_C , H_O พื้นที่ของท่อระบายความร้อน สัมประสิทธิ์ ความเสียดทานการไหล และค่าสัมประสิทธิ์ k ก่อน ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.1 จากสมการ (2.22b) เมื่อสมมุติให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังขณะใช้งานเท่ากับ 60°C ดังนั้น

$$\beta = \frac{1}{(273+60)} = 0.003$$

ในการติดตั้งครีบบระบายความร้อน จะติดตั้งให้ขอบบนของครีบท่อกันเสมอกับฝาถังของ หม้อแปลง ดังนั้นระยะ H_R , H_C , H_O เมื่อเทียบตามรูป 2.11, 3.7 และ 3.8 คือ

$$H_R = 1340 \text{ mm} = 1.42 \text{ m}$$

$$H_C = 961 \text{ mm} \approx 0.96 \text{ m}$$

$$H_O = 310 \text{ mm} = 0.31 \text{ m}$$

ความหนาแน่นของก๊าซที่ความดัน 1.0 kg/cm^2 อุณหภูมิ 60°C คำนวณได้จากสมการก๊าซ $PV = nRT$ จากสมการของก๊าซความหนาแน่นของก๊าซจะแปรผกผันกับอุณหภูมิเมื่อความดันก๊าซ คงที่ $\gamma \propto \frac{1}{T}$ เมื่อความหนาแน่นของก๊าซที่ 20°C ความดันเดียวกันเท่ากับ 6.15 kg/m^3 ดังนั้นความ หนาแน่นของก๊าซ

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_1 T_1}{T_0} = \frac{6.15 \times (273+20)}{273+60} = 5.41 \text{ kg/m}^3$$

จากข้อมูลของหม้อแปลงขนาด 500 kVA 12 kV [1] สามารถคำนวณย้อนกลับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายการไหลได้ โดยใช้สมการ (2.24) และ (2.25) เท่ากับ

$$k = \omega^3 \times \frac{\gamma_o C_p P}{Q} = 340^3 \times \frac{5.41 \times 0.143 \times 2.35}{4339 \times \frac{36}{42}} = 19213 \text{ m}^6 / \text{hr}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

และให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายการไหลมีค่าเท่ากันในทุกท่อ ดังนั้น

$$f_i = \frac{9.81 \times 3600^2 \times 0.003 \times 0.00283^2 (0.82 - 0.53 + 2 \times 0.51)}{8 \times 19213} = 26.03 \times 10^{-6}$$

จากท่อระบายความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm พื้นที่หน้าตัดของท่อเท่ากับ

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.069^2}{4} = 0.00374 \text{ m}^2$$

จากระยะ H_R , H_C , H_O ที่คำนวณได้และสมการ (2.24) โดยหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายการไหลเป็นสองเท่าของค่าที่คำนวณได้ เนื่องจากไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนของความหนืดทางกลของก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิใช้งาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ k คือ

$$k = \frac{9.81 \times 3600^2 \times 0.003 \times (1.34 - 0.96 + 2 \times 0.31)}{8 \times \frac{2 \times 26.03 \times 10^{-6}}{0.00374^2}} = 12810 \text{ m}^6 / \text{hr}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

และจากสมการ (2.25) ที่ความดัน 2.35 kg/cm² และกำลังสูญเสียในขดลวดเท่ากับ 10398 W ปริมาณการไหลของก๊าซเท่ากับ

$$\omega = \left(k \times \frac{Q}{\gamma_o C_p P} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(12810 \times \frac{10398 \times \frac{36}{42}}{5.41 \times 0.143 \times 2.35} \right)^{\frac{1}{3}} = 397.5 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด คำนวณจากผลรวมของความแตกต่างระหว่างขดลวดกับก๊าซ ก๊าซกับครีบบระบายความร้อนและครีบบระบายความร้อนกับบรรยากาศ ดังสมการ (2.27) โดยในการคำนวณจะแยกพิจารณาเป็นสองส่วนคือขดลวดแรงต่ำและแรงสูง

อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างขดลวดกับก๊าซและก๊าซกับครีบบระบายความร้อน คำนวณตามสมการ (2.28) โดยในส่วนของ ΔT_1 ต้องคำนวณพื้นที่ผิวระบายความร้อนทั้งหมดของขดลวด จากมิติของขดลวดแรงต่ำและการจัดเรียงตามรูปที่ 3.2 โดยคิด 14 รอบ เนื่องจากอีก 2.41 (16.41-14) รอบ เป็นส่วนที่ไขว้สาย ดังนั้นพื้นที่ผิวของขดลวดแรงต่ำโดยประมาณจะได้

$$2 \times 6\pi \times 14 \times 10^{-6} \left(322 \times 55 + \frac{1}{4} \left(\left(322 + \frac{4}{2} \right)^2 - \left(322 - \frac{4}{2} \right)^2 \right) \right) = 9.687 \text{ m}^2$$

ดังนั้นความร้อนส่งผ่านต่อหน่วยพื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวดแรงต่ำเท่ากับ

$$q_{1LV} = \frac{4719 \times \frac{36}{42}}{9.687} = 418 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$$

จากมิติของขดลวดแรงสูงและการจัดวางขดลวดตามรูปที่ 3.3 ซึ่งแบ่งเป็น 12 ตอน รายละเอียดการจัดวางลวดในแต่ละตอนเป็นไปตามรูปที่ 3.4 ซึ่งลวดทุกเส้นสามารถสัมผัสกับก๊าซได้เพราะมีช่องว่างระหว่างลวด ดังนั้นพื้นที่ผิวของลวดแรงสูงโดยประมาณจะได้

$$2 \times 13\pi \times 10^{-6} \left(455 \times 3.05 \times 2(6 \times 4 + 11 \times 8) + 12 \times \frac{1}{4} \left(\left(455 + \frac{3.05}{2} \right)^2 - \left(455 - \frac{3.05}{2} \right)^2 \right) \right) = 26.07 \text{ m}^2$$

ดังนั้นความร้อนส่งผ่านต่อหน่วยพื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวดแรงสูงเท่ากับ

$$q_{1HV} = \frac{5679 \times \frac{36}{42}}{26.07} = 187 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$$

เนื่องจากการหาค่า ΔT_1 ตามสมการ (2.28) ต้องใช้ค่า Nusselt number จากสมการ (2.29) ด้วย ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของท่อ 8 ท่อ เท่ากับ (เมื่อ n คือจำนวนท่อ)

$$D_{eq} = \sqrt{nD^2} = \sqrt{8 \times 0.069^2} = 0.1952 \text{ m}$$

ที่ความดัน 2.35 kg/cm² ค่า Kinematics viscosity ของก๊าซ SF₆ เท่ากับ 1.115 × 10⁻⁶ m²/s [12] ดังนั้น Reynolds number เท่ากับ

$$Re = v \frac{d}{\mu} = \frac{4 \times 397.5}{\pi \times 8 \times 0.069^2 \times 3600} \times \frac{0.1952}{1.115 \times 10^{-6}} = 646192$$

จากสมการ (2.29) Nusselt number เท่ากับ โดยความยาวท่อต้องคิดทั้งบนและล่าง

$$Nu = 1.86 \left(Re \times Pr \times \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.86 \left(646192 \times 0.669 \times \frac{0.1952}{2 \times 0.14} \right)^{\frac{1}{3}} = 124.7$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างขดลวดกับก๊าซของลวดแรงต่ำและแรงสูง ดังสมการ (2.28) คือ

$$\Delta T_{1LV} = \frac{0.1952}{0.0117 \times 124.7} \times 418 = 55.92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

และ

$$\Delta T_{1HV} = \frac{0.1952}{0.0117 \times 124.7} \times 187 = 25.02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างก๊าซกับครีระบายความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.28) ด้วย เพียงแต่พิจารณาค่าความร้อนภายในทั้งหมดที่ส่งผ่านก๊าซมายังครีระบาย

ความร้อนและพื้นที่ผิวของถัง โดยพื้นที่ผิวของถังใช้งานได้ประมาณ 70% เนื่องจากพื้นที่ผิวของถังมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้นจากจำนวนครีบทั้งหมด 72 ครีบ พื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ

$$A_{s_cooling} = (1.17 \times 72) + 1.4(2 \times 0.75 + 0.75 \times 1.915 + 1.915 \times 2) = 93.7 \text{ m}^2$$

ดังนั้นความร้อนส่งผ่านต่อหน่วยพื้นที่ผิวระบายความร้อนของครีบ

$$q_2 = \frac{(2019 + 4719 + 5679) \times \frac{36}{42}}{93.7} = 114 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$$

จากค่า Nusselt number ข้างต้น อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างก๊าซกับครีบระบายความร้อน คือ

$$\Delta T_2 = \frac{0.1952}{0.0117 \times 124.7} \times 114 = 15.25 \text{ }^\circ\text{C}$$

ค่าของอุณหภูมิของครีบระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิลบข้าง จำนวนจากความร้อนที่ส่งผ่านจากครีบระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งมีค่าเท่ากับ q_2 ดังนั้น

$$q_3 = q_2 = 114 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$$

และจากสมการ (2.30) ΔT_3 จะได้

$$\Delta T_3 = 0.51 \times q_3^{0.8} = 0.51 \times 114^{0.8} = 22.55 \text{ }^\circ\text{C}$$

ดังนั้นค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำและแรงสูง ซึ่งคำนวณจากสมการ (2.27) ได้ตามลำดับ คือ

$$\Delta T_{CLV} = \Delta T_{LV} + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 55.92 + 15.25 + 22.55 = 93.72 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{CHV} = \Delta T_{HV} + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 25.02 + 15.25 + 22.55 = 62.82 \text{ }^\circ\text{C}$$

จากอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 65°C ได้ เพราะใช้หลอดทองแดงแบนเปลือยพื้น ซึ่งสามารถระบายความร้อนได้ดีอยู่แล้วและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ขดลวด แต่อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงที่คำนวณได้มีค่าไม่เกิน 65°C ตามมาตรฐาน [15]

ถ้าในกรณีหม้อแปลงนำไปติดตั้งใช้งาน แล้วเกิดการรั่วซึมของก๊าซและเหลือความดันประมาณบรรยากาศ (1.00 kg/cm^2) ปริมาณการไหลของก๊าซเท่ากับ

$$\omega = \left(k \times \frac{Q}{\gamma_s C_p p} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(12810 \times \frac{10398 \times \frac{36}{42}}{5.41 \times 0.143 \times 1.00} \right)^{\frac{1}{3}} = 528 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ที่ความดัน 1.00 kg/cm^2 ค่า Kinematics viscosity ของก๊าซ SF_6 เท่ากับ $2.489 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [12]
 ดังนั้น Reynolds number เท่ากับ

$$\text{Re} = v \frac{d}{\mu} = \frac{4 \times 528}{\pi \times 8 \times 0.069^2 \times 3600} \times \frac{0.1952}{2.489 \times 10^{-6}} = 384510$$

จากสมการ (2.29) Nusselt number เท่ากับ

$$\text{Nu} = 1.86 \left(\text{Re} \times \text{Pr} \times \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.86 \left(384510 \times 0.669 \times \frac{0.1952}{2 \times 0.14} \right)^{\frac{1}{3}} = 104.9$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างขดลวดกับก๊าซของสวดแรงต่ำและแรงสูง ดังสมการ (2.28) คือ

$$\Delta T_{LV} = \frac{0.1952}{0.0117 \times 104.9} \times 418 = 66.48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

และ

$$\Delta T_{HV} = \frac{0.1952}{0.0117 \times 104.9} \times 187 = 29.74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างก๊าซกับครีระบายความร้อน

$$\Delta T_2 = \frac{0.1952}{0.0117 \times 104.9} \times 114 = 18.13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

และอุณหภูมิของครีระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิต่อข้าง มีค่าเท่าเดิมคือ

$$\Delta T_3 = 0.51 \times q_3^{0.8} = 0.51 \times 114^{0.8} = 2255 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จะได้ค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำและแรงสูงที่ความดัน 1 kg/cm^2 คือ

$$\Delta T_{CLV} = \Delta T_{LV} + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 66.48 + 18.13 + 2255 = 107.16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{CHV} = \Delta T_{HV} + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 29.74 + 18.13 + 2255 = 70.42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

พบว่าเมื่อความดันของก๊าซลดลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดทั้งสอง มีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนด [15] ดังนั้นในการใช้งานจะต้องมีการตรวจดูความดันและอุณหภูมิของก๊าซด้วย โดยความดันก๊าซต้องไม่ต่ำกว่า 1.75 kg/cm^2 (ได้จากการคำนวณโดยการลดความดันลงทีละ 0.05 kg/cm^2) ปริมาณการไหลของก๊าซเท่ากับ

$$\omega = \left(k \times \frac{Q}{\gamma_o C_p p} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(12810 \times \frac{10398 \times \frac{36}{42}}{5.41 \times 0.143 \times 1.75} \right)^{\frac{1}{3}} = 439 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ที่ความดัน 1.75 kg/cm^2 ค่า Kinematics viscosity ของก๊าซ SF_6 เท่ากับ $1.369 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [12]
 ดังนั้น Reynolds number เท่ากับ

$$Re = v \frac{d}{\mu} = \frac{4 \times 439}{\pi \times 8 \times 0.069^2 \times 3600} \times \frac{0.1952}{1.369 \times 10^{-6}} = 581246$$

จากสมการ (2.29) Nusselt number เท่ากับ

$$Nu = 1.86 \left(Re \times Pr \times \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.86 \left(581246 \times 0.669 \times \frac{0.1952}{2 \times 0.14} \right)^{\frac{1}{3}} = 120.4$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างขดลวดกับก๊าซของลวดแรงต่ำและแรงสูง ดังสมการ (2.28) คือ

$$\Delta T_{LV} = \frac{0.1952}{0.0117 \times 120.4} \times 418 = 57.92 \text{ } ^\circ C$$

และ
$$\Delta T_{HV} = \frac{0.1952}{0.0117 \times 120.4} \times 187 = 25.91 \text{ } ^\circ C$$

อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างก๊าซกับครีประบายความร้อน

$$\Delta T_2 = \frac{0.1952}{0.0117 \times 120.4} \times 114 = 15.80 \text{ } ^\circ C$$

และอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิมิรอบข้าง มีค่าเท่าเดิมคือ

$$\Delta T_3 = 0.51 \times q_3^{0.8} = 0.51 \times 114^{0.8} = 22.55 \text{ } ^\circ C$$

จะได้ค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำและแรงสูงที่ความดัน 1.75 kg/cm^2 คือ

$$\Delta T_{CLV} = \Delta T_{LV} + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 57.92 + 15.80 + 22.55 = 96.27 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta T_{CHV} = \Delta T_{HV} + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 25.91 + 15.80 + 22.55 = 64.26 \text{ } ^\circ C$$