บทที่ 4

การออกแบบ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทำการออกแบบและสร้างในที่นี้เป็นหม้อแปลง 3 เฟส 50 Hz ขนาด 500 kVA แรงดันที่กำหนด 12,000 V/400 V ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน เป็นแบบใช้ภายในอาคาร ระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ คลาสของอุณหภูมิที่ใช้คือ คลาส E สัญลักษณ์ของกลุ่มเวกเตอร์คือ Dy 11 มีรายละเอียดในการออกแบบดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบแกนเหล็ก

ในการออกแบบหม้อแปลงที่กำหนดขนาดมาให้นั้นสามารถที่จะออกแบบได้หลายวิธีเช่น ออกแบบให้ต้นทุนน้อยที่สุดโดยไม่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือในทางกลับกันอาจจะออกแบบให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด การออกแบบหม้อแปลงโดยให้ประหยัดที่สุดสามารถกระทำได้ถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะจะถูกจำกัดด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงและถูกจำกัดด้วยค่าความหนาแน่นของฟลักซ์อิ่มตัวในแกนเหล็ก หม้อแปลงที่ผลิตโดยทั่วไปจะมีราคาของแกนเหล็กเท่า ๆ กับราคาของทองแดง

ในด้านประสิทธิภาพของหม้อแปลงนั้นสามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดที่กำหนดได้โดยการออกแบบให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง[6] แต่หม้อแปลงที่ออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีแนวโน้มว่าวันหนึ่ง ๆ จะใช้งานที่โหลดน้อยกว่าที่กำหนดเป็นเวลานานมากกว่าการใช้ที่โหลดที่กำหนดการออกแบบจึงมักจะให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยเท่าที่จะเป็นไปได้ ฉะนั้นภาคตัดขวางของแกนเหล็กจะหาได้จากการเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์ B ซึ่งกำหนดด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กหาได้จากกราฟของผู้ผลิตเหล็กซิลิคอน ดังในหัวข้อ 3.1 การเลือกความหนาแน่นฟลักซ์ในแกนเหล็กจะให้มีค่าน้อยกว่าจุดอิ่มตัว ถ้าสูงกว่านี้จะใกล้จุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก ทำให้พลังงานสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้น ในการออกแบบนี้เลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์จากกราฟในรูป 3.1 ให้ค่า B = 1.6 Tesla จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 0.95 W/kg

เมื่อประกอบหม้อแปลงเสร็จเรียบร้อย ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้คิดเพิ่มอีกประมาณ 15 เปอร์เซนต์ เนื่องจากการบิดการตัด และการฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างแผ่นซิลิคอนเป็นต้น ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัมโดยประมาณ คือ

$$p'_c = 0.95 \times 1.15 = 1.09 \quad W/kg$$

การเลือกขนาดภาคตัดขวางของลวดทองแดงกำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแสที่จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดงและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสเตรย์ดังอธิบายในบทที่ 2 และเผื่ออีกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์รวมแล้วให้มีค่าน้อยกว่าที่กำหนด ฉะนั้นก่อนอื่นต้องประมาณค่าความหนาแน่นกระแสคิดเฉลี่ยทั้งขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ ในที่นี้คิดประมาณตอนแรกให้ $J = 2\ A/mm^2$ โดยที่ค่านี้ต่ำกว่าค่าที่ใช้กันในหม้อแปลงแบบน้ำมันที่ผลิตทางการค้า ทั้งนี้เพื่อต้องการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดงอาจคำนวณได้จากสมการ [7]

$$p'_t = 2.37\ J^2 K_t \quad W/kg$$

โดยที่ J คือ ความหนาแน่นกระแส $= 2\ A/mm^2$

K_t คือ แฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

จะได้ $p'_t = 2.37 \times (2)^2 \times 1.2 = 11.38 \quad W/kg$

ถ้าให้ W_c คือ น้ำหนักของแกนเหล็กทั้งหมดที่ใช้

และ W_t คือ น้ำหนักของทองแดงทั้งหมดที่ใช้

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง คือ

$$\frac{P_c}{P_t} = \frac{p'_c \times W_c}{p'_t \times W_t}$$

อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง $\frac{P_c}{P_t}$ จะเลือกตามเกณฑ์ของหม้อแปลงแบบน้ำมันที่ผลิตในเชิงการค้าที่มีขนาดเดียวกันซึ่งมีค่าประมาณ 0.2

ฉะนั้นจะได้ $\frac{W_c}{W_t} = \frac{0.2 \times 11.38}{1.09} = 2.09$

จากค่าอัตราส่วนของน้ำหนักแกนเหล็กต่อน้ำหนักของทองแดงนี้ จะใช้เป็นค่าในการประมาณพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กต่อไป

การหาพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กเมื่อทราบขนาดของหม้อแปลง โดยทั่วไปสำหรับหม้อแปลงเฟสเดียวจะหาได้จาก [6]

$$kVA = EI \times 10^{-3}$$

เมื่อ E คือ แรงดันเหนี่ยวนำ

$$E = 4.44\ fNBA_c \times 10^{-8} \cdot V$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวด

f คือ ความถี่

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์, หน่วย T

A_c คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก, หน่วย mm^2

และ $I = J \cdot A_t$

โดยที่ J คือความหนาแน่นของกระแส, หน่วย A/mm^2

A_t คือพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดทองแดง, หน่วย mm^2

ดังนั้น $$kVA = 4.44\ fNBA_cJA_t \times 10^{-11} \qquad (4.1)$$

น้ำหนักของแกนเหล็ก $W_c = A_cL_c \times 7.65 \times 10^{-6}$ kg

น้ำหนักทองแดง $W_t = 2NA_tL_t \times 8.9 \times 10^{-6}$ kg

L_c คือ ความยาวเฉลี่ยทั้งหมดของแกนเหล็ก

L_t คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดทองแดง 1 รอบ

ความหนาแน่นของแกนเหล็ก คือ 7.65×10^{-6} kg/mm^3

ความหนาแน่นของทองแดง คือ 8.9×10^{-6} kg/mm^3

ถ้าให้ L_c และ L_t มีค่าคงที่สำหรับหม้อแปลงชนิดหนึ่ง ๆ จะได้

$$\frac{W_c}{W_t} = \frac{C_1 A_c}{NA_t}$$

$$NA_t = \frac{W_t}{W_c} C_1 A_c$$

แทนค่าดังกล่าวในสมการ (4.1) จะได้พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก

$$A_c = C\sqrt{\frac{kAV \times W_c/W_t \times 10^9}{B \times N \times f}} \quad mm^2 \qquad (4.2)$$

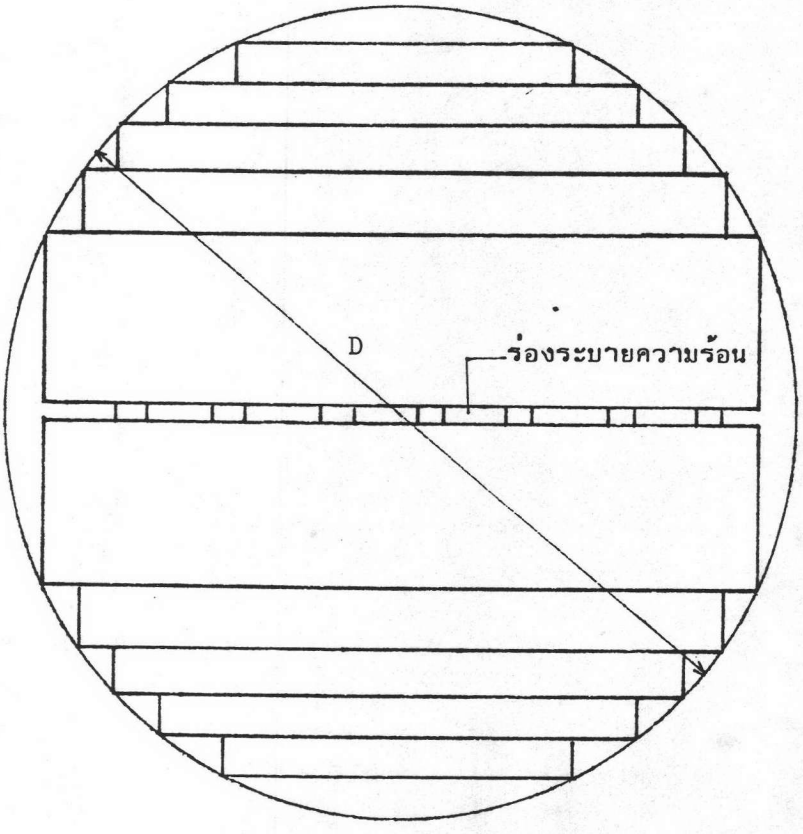
ค่าคงที่ C นี้จะมีค่าแตกต่างตามชนิดของโครงสร้าง [6] อย่างเช่น หม้อแปลงที่มีแกนเหล็กแบบคอร์ 3 เฟส C จะมีค่า 0.3 ถึง 0.5 ในที่นี้เลือกใช้ค่าประมาณ 0.4

แทนค่าต่าง ๆ ที่ทราบลงในสมการ (4.2) จะได้

$$A_c = 0.4\sqrt{\frac{500 \times 2.09 \times 10}{1.6 \times 2 \times 50}} \quad mm^2$$

$$= 32,326 \quad mm^2$$

แกนเหล็กที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดนี้จะทำเป็นรูปเหลี่ยมอัดในวงกลมโดยในที่นี้จะแบ่งเป็น 5 ขั้น และเพื่อช่วยในการระบายความร้อนไม่ให้มีจุดใดจุดหนึ่งในแกนเหล็กร้อนเกินไป จะมีร่องระบายอากาศตามแนวยาวดังแสดงในรูป 4.1 การคำนวณหามิติภาคตัดขวางของแกนเหล็ก แสดงในภาคผนวก ก. ซึ่งจะได้ค่าแฟกเตอร์พื้นที่แกนเหล็กคือ 90.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าแฟกเตอร์เนื้อเหล็กแผ่น K_1 สำหรับเกรดเหล็กซิลิคอนที่ใช้นี้เท่ากับ 0.97 [8]



รูป 4.1 พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กมีช่องระบายความร้อนตรงกลาง

จากสมการ $D = \sqrt{\frac{A_c / K_1}{\frac{\pi}{4} \times K_{cs}}}$ ในภาคผนวก ก.

จากค่า A_c , K_1 และ K_{cs} ที่หาได้ดังกล่าวข้างต้นจึงคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมรอบแกนเหล็กได้ คือ

$$D = \sqrt{\frac{32326 / 0.97}{(\frac{\pi}{4}) \times 0.908}} = 216 \text{ mm}$$

เมื่อได้เส้นผ่านศูนย์กลางรอบแกนเหล็ก D จึงหามิติภาคตัดขวาง d_1, d_2, d_3, d_4 และ d_5 ตามรูป 4.1 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. และได้ค่าดังต่อไปนี้

d_1 = 0.314D = 68 mm

d_2 = 0.534D = 119 mm

d_3 = 0.707D = 193 mm

d_4 = 0.846D = 183 mm

d_5 = 0.950D = 205 mm

ในทางปฏิบัติ เหล็กแผ่นซิลิคอนที่มีจำหน่ายในเชิงการค้าจะมีขนาดต่าง ๆ ของความกว้างที่จำกัดแน่นอนคือ 60, 70, 90, 100, 125, 150, 170, 190 และ 210 mm. ฉะนั้นเพื่อเป็นการประหยัดและรักษาคุณภาพของแผ่นเหล็กที่จะนำมาประกอบเป็นแกนเหล็ก จึงจำเป็นต้องเลือกขนาดความกว้างของแผ่นเหล็กที่หาได้โดยให้ได้พื้นที่ภาคตัดขวางใกล้เคียงที่ต้องการมากที่สุด ขนาดต่าง ๆ ที่เลือกมีดังต่อไปนี้

d_1 = 90 mm

d_2 = 125 mm , $d_2 - d_1$ = 35 mm

d_3 = 150 mm , $d_3 - d_2$ = 25 mm

d_4 = 170 mm , $d_4 - d_3$ = 20 mm

d_5 = 190 mm , $d_5 - d_4$ = 20 mm

เนื่องจากมีการเผื่อช่องระบายความร้อนตามแนวผ่าครึ่งแกนเหล็ก ซึ่งมีความกว้างของช่องระบายเท่ากับ 5 mm ดังรูป 4.1 ฉะนั้นจะได้พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็ก

A_c = (190x85)+(170x35)+(150x25)+(125x20)+(90x20)

= 30,150 mm^2

คิดลามิเนชันแฟกเตอร์ = 0.97 ดังนั้นพื้นที่ภาคตัดขวางของเนื้อเหล็กจริงคือ

A_c = 30,150 x 0.97 = 29,246 mm^2

เมื่อได้พื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์B ที่กำหนดแล้วจึงหาฟลักซ์ทั้งหมดได้คือ

$\phi_t = BA_c$

= 1.6 x 10 x 29,246 = 4,679,360 lines

จากนั้นจะหาจำนวนรอบของขดลวดแรงสูงได้จากความสัมพันธ์

$$N_h = \frac{E_h \times 10^8}{4.44\ f\phi_t}$$

$$= \frac{12\text{x}10^3\text{x}10^8}{4.44\text{x}50\text{x}4,679,360} = 1155 \text{ turns}$$

ในการออกแบบต้องการให้ความหนาแน่นของกระแสมีค่าต่ำ จึงต้องเลือกใช้ตัวนำที่มีภาคตัดขวางใหญ่ ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมากจะทำให้ต้องใช้หน้าต่างแกนเหล็กขนาดใหญ่ตามไปด้วย โดยการลองคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด พื้นที่ภาคตัดขวางของลวดตัวนำและช่องหน้าต่างแกนเหล็กที่เหมาะสม พบว่าจำนวนรอบของขดลวดแรงสูงเท่ากับ 1100 รอบ ดังนั้นจากค่า N_h นี้จะได้ฟลักซ์รวมเป็น

$$\phi_t = \frac{12\text{x}10^3\text{x}10^8}{4.44\text{x}50\text{x}1000} = 4,914,000 \text{ lines}$$

และได้ความหนาแน่นฟลักซ์ $B = \frac{4,914,000}{29,246\text{x}10^2} = 1.68 \text{ T}$

จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$N_\ell = \frac{E_\ell}{E_h} \times N_h$$

$$= \frac{240}{12\text{x}10^3} \times 1100 = 22$$

ดังนั้นแรงดันต่อรอบด้านแรงสูงจะเป็น

$$\frac{E_h}{N_h} = \frac{12\text{x}10^3}{1100} = 10.91 \text{ V}$$

กระแสในขดลวดแรงสูงคำนวณได้จาก

$$I_h = \frac{kVA \times 10^3}{3 \times E_h}$$

$$= \frac{500 \times 10^3}{3\text{x}12\text{x}10^3} = 13.89 \text{ A}$$

$$I_\ell = \frac{kVA \times 10^3}{3 \times E_\ell}$$

$$= \frac{500 \times 10^3}{3 \times 240} = 694 \text{ A}$$

จากความหนาแน่นกระแส J ที่เลือกตอนต้น 2 A/mm^2 สามารถคำนวณพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวนำแรงสูงและตัวนำแรงต่ำได้ดังนี้

$$A_h = \frac{I_h}{J}$$

$$= \frac{13.89}{2} = 6.95 \text{ mm}^2$$

$$A_\ell = \frac{I_\ell}{J}$$

$$= \frac{694}{2} = 347 \text{ mm}^2$$

เมื่อทราบขนาดของพื้นที่ภาคตัดขวางและจำนวนรอบของตัวนำทั้งสอง ทำให้ประมาณขนาดหน้าต่างของแกนเหล็กแบบคอร์ชนิด 3 เฟส ได้ดังนี้

$$h_w w_w = \frac{2(A_h t_h + A_\ell t_\ell)}{m} = \frac{4 A_h t_h}{m} \text{ mm}^2$$

โดยที่ h_w คือ ความสูงของหน้าต่างแกนเหล็ก

w_w คือ ความกว้างของหน้าต่างแกนเหล็ก

m คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาคตัดขวางขดลวดทั้งหมดต่อหน้าต่างของแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง

จากผลงานในอดีต [6] พบว่าหม้อแปลงขนาด 500 kVA 12 kV แบบน้ำมัน m = 0.4 ในที่นี้หม้อแปลงเป็นแบบที่ใช้ก๊าซอัดความดันเป็นฉนวน เพื่อให้ได้ h_w และ w_w ที่เหมาะสม และให้ได้อัตราส่วนของน้ำหนักเหล็กต่อน้ำหนักของทองแดงตามต้องการ จึงต้องปรับค่า $h_w w_w$ หลายครั้งพบว่าค่า m ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.22 ฉะนั้นเมื่อแทนค่า m ลงในสมการ $h_w w_w$ ข้างต้นจะได้พื้นที่ของหน้าต่างแกนเหล็กคือ

$$h_w w_w = \frac{4(6.95 \times 1100)}{0.22} = 139{,}000 \text{ mm}^2$$

จากค่า $h_w w_w$ ที่ได้ก็ทำการหาค่าความสูง h_w และความกว้าง w_w ของหน้าต่างแกนเหล็ก โดยทั่วไปอัตราส่วนความสูง h_w ต่อความกว้าง w_w จะมีค่า 2.0 ถึง 4.0 [6] ค่านี้อยู่ที่ผู้ออกแบบจะเลือกในตอนแรกอาจเลือกค่ากลาง ๆ เช่น 3.0 ก่อน เมื่อคำนวณได้ขนาดของหน้าต่างแกนเหล็กแล้วก็หาขนาดลวดทองแดงพร้อมการเว้นระยะห่างจากแกนเหล็กบนและล่างที่พอเหมาะกับขนาดแรงดัน แล้วตรวจสอบดูว่าขนาดหน้าต่างแกนเหล็กพอเหมาะกับขนาดลวดหรือไม่ ถ้าหากไม่พอเหมาะก็ต้องคำนวณหา h_w และ w_w ใหม่ที่เหมาะสม เมื่อลองเลือกค่าอัตราส่วนของ h_w ต่อ w_w หลาย ๆ ครั้งพบว่าค่าอัตราส่วนที่เหมาะจะมีค่าเท่ากับ 2.7

นั่นคือ $\frac{h_w}{w_w} = 2.7$

ดังนั้น $h_w = 2.7 \times 139,000 = 613$ mm

เลือก $h_w = 610$ mm ดังนั้นจะได้

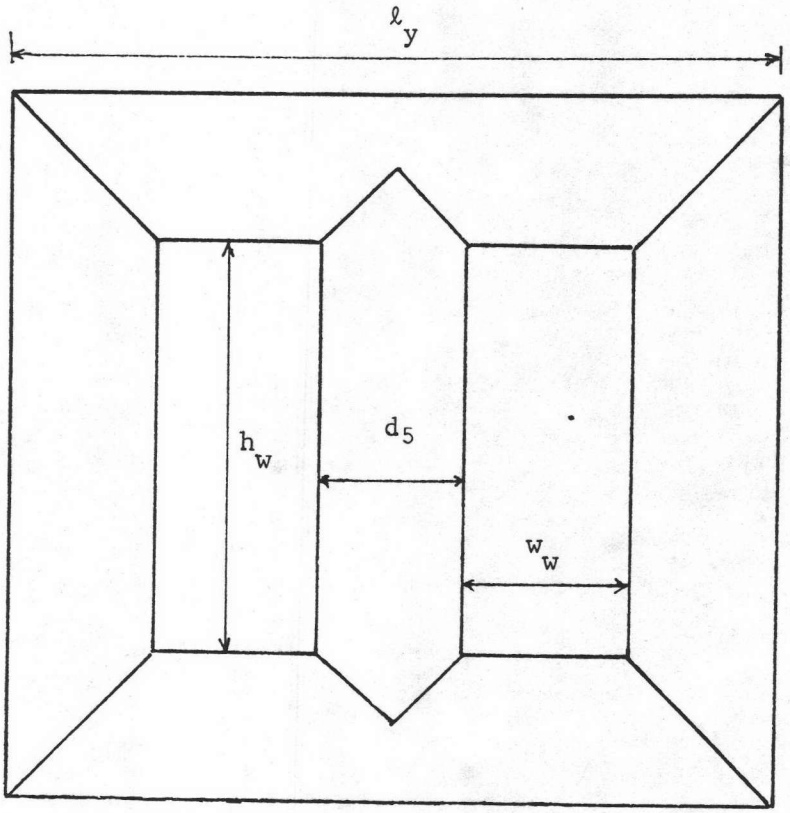
$w_w = \frac{610}{2.7} = 226$ mm

เลือก $w_w = 225$ mm

ส่วนโย้ก (YOKE) คิดความหนาแน่นฟลักซ์ B เท่ากับของขาแกนเหล็ก ดังนั้นพื้นที่ภาคตัดขวาง A_c จึงคิดเท่ากัน จากนั้นคำนวณความสูงของโย้กได้คือ

ความสูงของโย้ก $= \frac{A_c}{d_5}$

$= \frac{30,150}{190} = 159$ mm



รูป 4.2 โครงสร้างของแกนเหล็ก

จากโครงสร้างแกนเหล็กในรูป 4.2 จะได้

ความยาวของโย้ก $\ell_y = 2\,w_w + 3\,d_5$

$= (2x225) + (3x190)$

$= 1020$ mm.

ความหนาแน่นของเหล็กที่ใช้ $= 7.65 \times 10^{-6}$ kg/mm^3

ฉะนั้นน้ำหนักของแกนเหล็กทั้งหมดคือ

$$W_c = (2\,\ell_y A_c + 3\,h_w A_c) \times 7.65 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$= \{(2x1020x30,150)+(3x610x31,150)\}x7.65x10^{-6} \text{ kg}$$

$$= 893 \text{ kg}$$

จากกราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กรูป 3.1 ที่ B = 1.68 T จะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 1.05 W/kg คิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มอีก 15 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดโดยประมาณคือ

$$P_c = 1.05 \times 1.15 \times 893 = 1080 \text{ W.}$$

น้ำหนักแกนเหล็กนี้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้นรายละเอียดของขนาดแผ่นเหล็กซิลิคอน จำนวนแผ่นที่ใช้ แสดงในหัวข้อการประกอบแกนเหล็กในข้อ 5.1

4.2 การออกแบบขดลวดและฉนวน

หม้อแปลงที่ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนนี้ จะใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มเป็นวัสดุฉนวนสำหรับระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ ระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูง และฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ รวมทั้งขดลวดแรงต่ำกับแกนเหล็ก สำหรับโพลีเอสเตอร์ฟิล์มที่ใช้ในหม้อแปลงนี้มีความหนา 3 ขนาดคือ ขนาด 50, 75 และ 350 μm ความคงทนต่อแรงดันของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มทั้ง 3 ขนาดนี้ มีค่า 7, 10 และ 26 kV ตามลำดับ [9, 10] ในการฉนวนนี้จะเกิดชั้นฉนวนที่เป็นก๊าซ SF_6 กับชั้นของแข็งของโพลีเอสเตอร์ ซึ่งเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของก๊าซ SF_6 ประมาณ 1 ส่วนของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มเท่ากับ 3.35 ที่ $100^{\circ}C$, 50 Hz [10] เมื่อใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มเป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงจะมีชั้นบาง ๆ ของก๊าซ SF_6 อยู่ด้วย สาเหตุจากค่าเพอร์มิตติวิตีที่ต่างกัน ความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตีต่ำ และเป็นชั้นบาง ๆ จะมีค่าสูง แรงดันเกือบทั้งหมดระหว่างชั้นฉนวนนั้นจะตกคร่อมที่ชั้นฉนวนโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม [4] ดังนั้นในการคำนวณฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงจะคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มเป็นหลัก และเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นบาง ๆ ของก๊าซ SF_6 มีค่าสูงเกินไปในการออกแบบจึงลดแรงดันระหว่างชั้นของขดลวดลง โดยการแบ่งขดลวดออกเป็นตอน ๆ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.2 สำหรับการฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำจะมีชั้นของฉนวนโพลีเอสเตอร์ฟิล์มกับชั้นของก๊าซ SF_6 2 ชั้น ซึ่งใช้เป็นร่องระบายความร้อนอยู่ทั้งสองด้านของชั้นโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม การวางซ้อนของชั้นฉนวนนี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และเพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ความหนาของชั้นฉนวนโพลีเอสเตอร์ฟิล์มควรจะบางกว่าชั้นฉนวนก๊าซ SF_6 รายละเอียดการออกแบบขดลวดพร้อมฉนวนมีดังนี้

4.2.1 <u>ขดลวดแรงต่ำ</u>

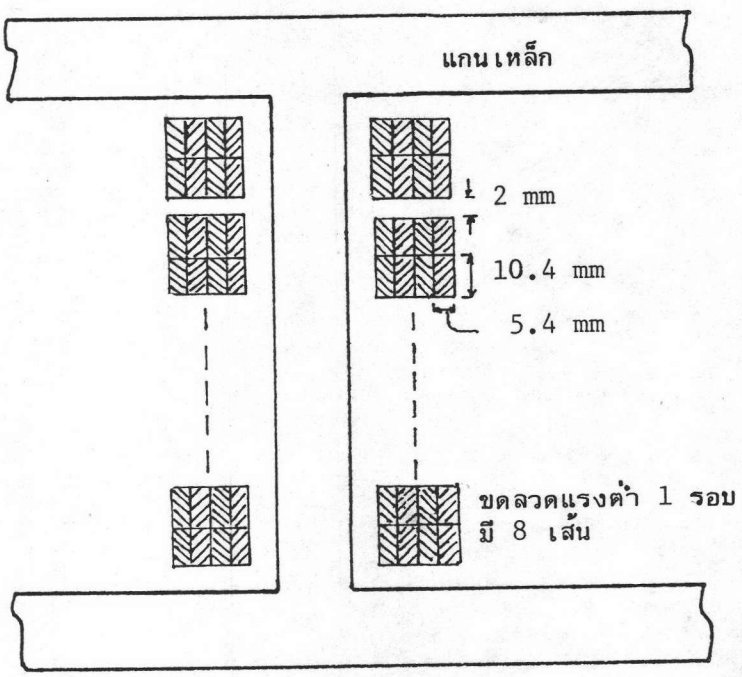
กระแสที่กำหนดสำหรับขดลวดแรงต่ำคือ 694 A จากค่าความหนาแน่นกระแสที่เลือกค่าไว้ตอนแรก ประมาณ 2.0 A/mm^2 นั้น เมื่อนำมาคิดพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดตัวนำทองแดงจะได้

$$A_\ell = \frac{694}{2.0} = 347 \ mm^2$$

จากขนาดประมาณของพื้นที่ภาคตัดขวางที่ต้องการสามารถเลือกขนาดทองแดงที่มีจำหน่ายในทางการค้าได้ คือ ใช้ทองแดงเปลือยพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5x10 mm^2 จำนวน 8 เส้น ขนานกัน จะได้พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวนำพันขดลวดเป็น 8x5x10 = 400 mm^2 ดังนั้นความหนาแน่นกระแสจริงของขดลวดแรงต่ำคือ

$$J_\ell = \frac{694}{400} = 1.735 \ A/mm^2$$

การหุ้มฉนวนตัวนำพันขดลวดแรงต่ำจะใช้ไพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาดความยาวหนา 50 μm พัน 4 ชั้น ดังนั้นขนาดของลวดทองแดงแต่ละเส้นเมื่อหุ้มฉนวนแล้วจะมีขนาด 5.4x10.4 mm^2 เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำแต่ละรอบจึงจัดให้มีร่องระบายความร้อนกว้าง 2 mm ลักษณะของขดลวดในภาคตัดขวางจะเป็นดังรูป 4.3



รูป 4.3 ลักษณะภาคตัดขวางของขดลวดแรงต่ำ

จากจำนวนรอบของขดลวดที่คำนวณไว้ คือ 22 รอบ ดังนั้นจะได้

ความสูงของขดลวดแรงต่ำ = (22x2x10.4) + (21x2.0)

= 500 mm

ถ้าคิดเผื่อความคลาดเคลื่อนในการพันอีกประมาณ 30 mm ความสูงของขดลวดอาจเพิ่มเป็น 530 mm ความสูงของหน้าต่างแกนเหล็ก 610 mm ดังนั้นจะมีช่องว่างหัวท้ายของขดลวดรวมกันประมาณ 80 mm

ความหนาของขดลวดแรงต่ำ = 4x5.4 = 21.6 ≃ 22 mm

ถ้าคิดเผื่อเมื่อพันแล้วอีก 2 mm ความหนาอาจเพิ่มเป็น 24 mm ฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแกนเหล็กจะใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาด 350 μm พัน 5 ชั้น จากข้อมูลในภาคผนวก คุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาดนี้ 1 แผ่น สามารถทนแรงดันได้ 26 kV ส่วนที่ต้องพันถึง 5 ชั้นเพราะต้องการให้มีความแข็งแรงทางกลเพียงพอ เมื่อสวมขดลวดแรงต่ำลงไประหว่างโพลีเอสเตอร์ฟิล์มกับขดลวดแรงต่ำจะมีร่องระบายความร้อนโดยใช้เบกไลต์ความหนา 5 mm เป็นตัวคั่น ดังนั้นเมื่อรวมความหนาของฉนวนกับร่องระบายความร้อน จะได้ความหนาช่วงนี้เท่ากับ (5x0.350) + 5.0 = 6.75 mm หรือประมาณ 7 mm ดังนั้นเมื่อคิดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมรอบแกนเหล็กเท่ากับ 210 mm กับความหนาของฉนวนกับร่องระบายความร้อนรอบแกนเหล็กจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางวงในของขดลวดประมาณ

210 + (2x7) = 224 mm

ความหนาของขดลวดตามรูป 4.3 ด้านละ 24 mm ฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกของขดลวดจะเป็น

224 + (2x24) = 272 mm

4.2.2 <u>ขดลวดแรงสูง</u>

กระแสที่กำหนดของขดลวดแรงสูงคือ 13.89 A จากค่าความหนาแน่นกระแสที่เลือกคือ 2.0 A/mm^2 ดังนั้นขนาดของพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดตัวนำด้านแรงสูงคือ

$$A_h = \frac{13.89}{2.0} = 6.945 \quad mm^2$$

ลวดตัวนำที่เลือกใช้เป็นแบบเคลือบน้ำยาโพลีอะไมด์ อิมีด (Polyamide-imide) เป็นชนิดที่ทนความร้อนได้สูง ขนาดขดลวดใหญ่สุดที่มีจำหน่ายคือ ขนาดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 mm เมื่อเคลือบน้ำยาแล้วจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกประมาณ 2.2 mm เลือกใช้ลวดขนาดนี้ 2 เส้นขนานกัน ดังนั้นขนาดของพื้นที่ภาคตัดขวางคือ

$$A_h = 2 \times \pi \times (\frac{2.0}{2})^2 = 6.28 \text{ mm}^2$$

ดังนั้นความหนาแน่นกระแสสำหรับขดลวดแรงสูงจึงเป็น

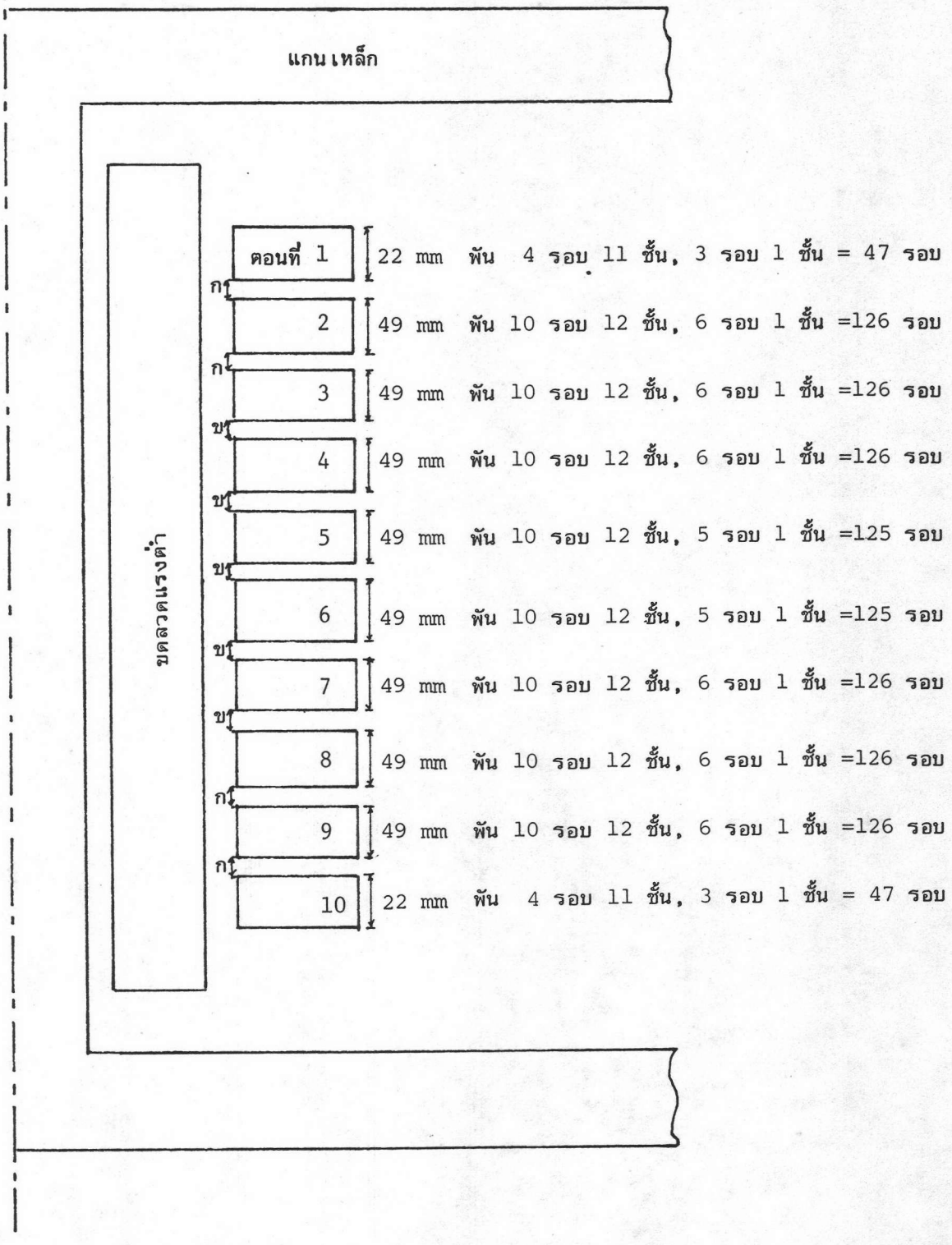
$$J_h = \frac{13.89}{6.28} = 2.21 \text{ A/mm}^2$$

จำนวนรอบของขดลวดแรงสูงต่อ 1 เฟส คือ 1100 รอบ หม้อแปลงนี้จะมีการปรับแรงดันได้ทั้งหมด 5 ขั้น แต่ละขั้นต่างกัน 2.5 % ของแรงดันที่กำหนด โดยจะทำเป็นแบบ -10 % ดังนั้น ณ จุดแยกแต่ละตำแหน่งจำนวนรอบของขดลวดแรงสูงจะเป็น 1100, 1073, 1045, 1017 และ 990 รอบ ตามลำดับ

การพันขดลวดจะพันเป็นทรงกระบอกสั้นหลาย ๆ ตอน จากนั้นจึงต่อสายระหว่างตอน จากจำนวนรอบที่ใช้แบ่งขดลวดได้เป็น 10 ตอน สำหรับ 1 เฟส แต่ละตอนจะมีจำนวนรอบในแต่ละชั้น และมีจำนวนกี่ชั้นนั้นรายละเอียดแสดงในรูป 4.4 ส่วนระยะห่างระหว่างแต่ละตอนจะมี 2 แบบ แบบ ก. จะเว้นระยะ 12 mm ส่วนแบบ ข. จะเว้นระยะ7 mm ระยะที่เว้นนี้จะใช้เบกไลต์วางคั่นเป็นช่อง เพื่อการระบายความร้อนและเป็นฉนวนกั้นด้วย ส่วนต้น ๆ ขดของขดลวดมีโอกาสได้รับแรงดันเกิน ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มระยะห่างและลดจำนวนรอบต่อชั้นให้น้อยลง

จุดแยกของหม้อแปลงจะแยกมาจากขดลวดกลาง 2 ตอน ที่มีตอนละ 125 รอบ ดังในรูป 4.4 โดยแยกมาตอนละ 2 จุดแยก

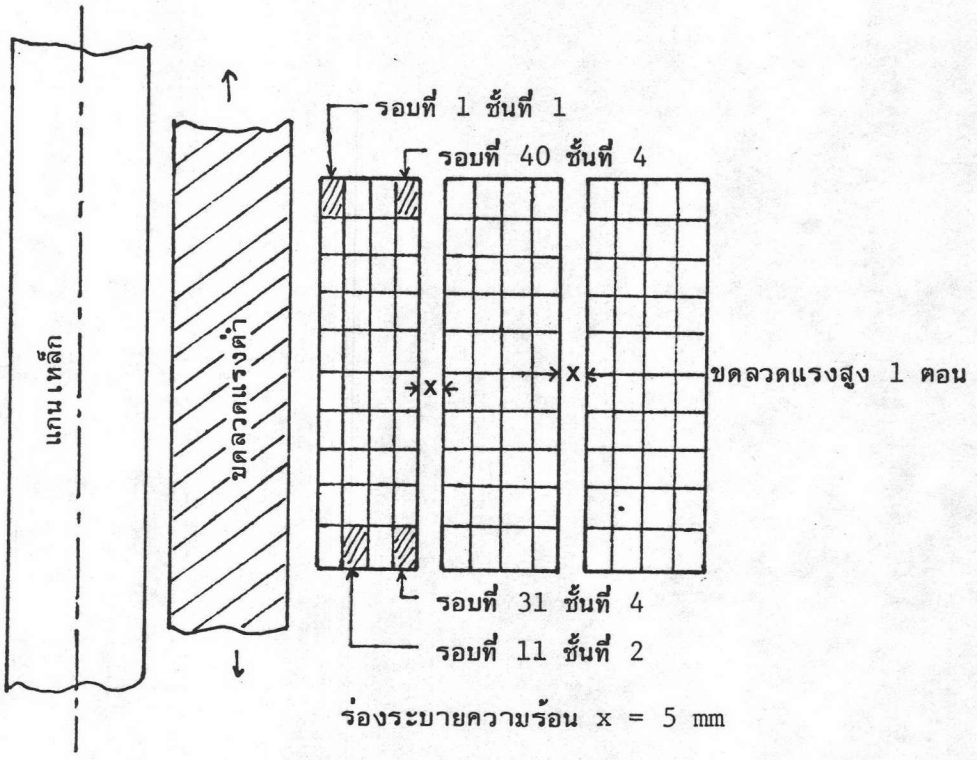
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดจะใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาดความหนา 75 μm 2 ชั้น และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการระบายความร้อน เมื่อพันขดลวดครบทุก 4 ชั้นจะวางเบกไลต์ความหนาหนา 5 mm เป็นตัวคั่นทำให้เกิดร่องกว้าง 5 mm ดังรูป 4.5



รูป 4.4 แสดงจำนวนรอบและจำนวนชั้นในการพันขดลวดแรงสูง

ระยะ ก. = 12 mm

ระยะ ข. = 7 mm



รูป 4.5 ชั้นของขดลวดและการใส่ร่องระบายความร้อน

จากมิติต่าง ๆ ข้างต้นจึงคำนวณความสูงและความหนาของขดลวดแรงสูงได้ดังนี้

ความสูงของขดลวด = (8x10x2x2.2)+(2x4x2x2.2)+48+35

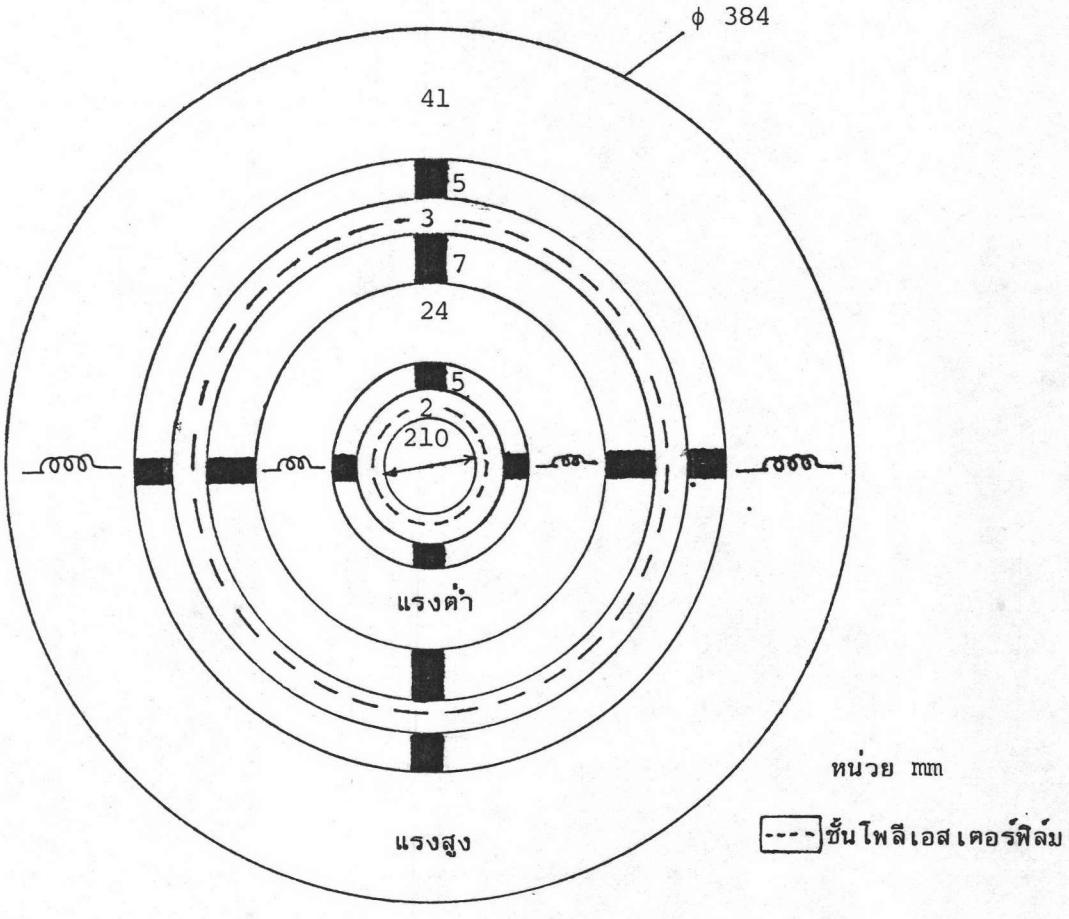
= 471 mm

เผื่อความสูงของขดลวดอีก 10% จะได้ความสูงประมาณ 518 mm

ความหนาของขดลวด = (13x2.2)+(12x2x.075)+(2x5)

= 41 mm

ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำจะใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มขนาดความหนา 350 μm พัน 8 ชั้น รวมความหนาทั้งหมด = 2.8 mm พร้อมทั้งมีร่องระบายความร้อน โดยด้านที่ติดกับขดลวดแรงต่ำจะมีร่องหนา 7 mm และด้านที่ติดกับขดลวดแรงสูงมีร่องหนา 5 mm รายละเอียดของขนาดความหนาขดลวดและร่องระบายความร้อนแสดงในรูป 4.6



รูป 4.6 แสดงความหนาในแต่ละส่วนของขดลวด

ดังนั้นเมื่อทราบระยะต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างเฟสของขดลวดได้ประมาณ 30 mm

เพื่อคำนวณน้ำหนักของขดลวดที่ต้องใช้ จะต้องทราบความยาวรอบโดยเฉลี่ยก่อนดังอธิบายในหัวข้อ 2.2.2.4

ความยาวรอบโดยเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำ , L_ℓ

= {210+(2x7)+24} ¶ = 780 mm

ความยาวรอบโดยเฉลี่ยของขดลวดแรงสูง , L_h

= {210+(2x7)+(2x24)+(2x15)+41} ¶ = 1078 mm

เมื่อทราบค่า L_ℓ, L_h, A_ℓ และ A_h แล้ว คำนวณน้ำหนักของทองแดงที่ใช้ในขดลวดทั้ง 2 ได้ คือ

	แรงต่ำ	แรงสูง	
พื้นที่ภาคตัดขวาง	400	6.28	mm^2
ความยาวรอบโดยเฉลี่ย	780	1078	mm
จำนวนรอบ	22	1100	turns
ความหนาแน่นทองแดง	8.9×10^{-6}		kg/mm^3
จำนวนเฟส	3		

ดังนั้น น้ำหนักขดลวดแรงต่ำ = $3x22x400x780x8.9x10^{-6}$ = 184 kg

น้ำหนักขดลวดแรงสูง = $3x1100x6.28x1078x8.9x10^{-6}$ = 199 kg

น้ำหนักทองแดงทั้งหมด = 184 + 199 = 383 kg

อัตราส่วน $\frac{\text{น้ำหนักแกนเหล็ก}}{\text{น้ำหนักทองแดง}} = \frac{893}{383} = 2.33$

จาก $J_\ell = 1.735\ A/mm^2$ และ $J_h = 2.21\ A/mm^2$ ดังนั้น

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดงโดยคิดเพิ่มอีก 20% มีค่าดังนี้

$P_\ell = 2.37x(1.735)^2x184x1.2 = 1575$ W ที่ 75^oC

$P_h = 2.37x(2.21)^2x199x1.2 = 2764$ W ที่ 75^oC

$P_t = 1575 + 2764 = 4339$ W

ดังนั้น $\frac{P_c}{P_t} = \frac{1080}{4339} = 0.25$

4.2.3 <u>การคำนวณค่าลักษณะสมบัติของหม้อแปลงที่ออกแบบ</u>

4.2.3.1 <u>เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์</u>

ความต้านทานประสิทธิผลต่อเฟสที่ 75^oC

$R_\ell = \frac{1575}{3x(694)^2} = 0.0011$ ohms/ph

$R_h = \frac{2764}{3x(13.89)^2} = 4.775$ ohms/ph

ความต้านทานทั้งหมดคิดในเทอมของขดลวดแรงสูง

$$R_t = \frac{4339}{3x(13.89)^2} = 7.497 \text{ ohms/ph}$$

เปอร์เซ็นต์ความต้านทานของหม้อแปลง

$$PC_r = \frac{13.89x7.497}{12x10^3} \times 100 = 0.867\ \%$$

รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงคำนวณจากสมการ (2.8) คือ

$$X_t = \frac{0.846\ fN_s^2}{hx10^8} \left(\frac{d_s+d_p}{3} + d\right) \frac{L_s+L_p}{2}$$

แทนค่าจะได้

$$X_t = \frac{0.846x50x(1100)^2}{530x10^8}\left(\frac{41+24}{3} + 15\right) \frac{780+1078}{2}$$

$$= 32.9 \text{ ohms/ph}$$

เปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงคำนวณจากสมการ (2.9) คือ

$$PC_x = \frac{X_t I_s}{E_s} \times 100$$

แทนค่าจะได้

$$PC_x = \frac{32.9x13.89}{12x10^3} \times 100 = 3.8\ \%$$

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงคำนวณจากสมการ (2.10) คือ

แทนค่าจะได้ $PC_z = \sqrt{(0.867)^2 + (3.8)^2} = 3.9\ \%$

ฉะนั้นกระแสลัดวงจรที่แรงดันค่าปกติคำนวณจากสมการ (2.11) คือ

$$I_{sc} = \frac{I_s \times 100}{PC_z}$$

แทนค่าจะได้ $I_{sc} = \frac{13.89 \times 100}{3.9} = 356.2 \text{ A}$

4.2.3.2 <u>ค่าปรับแรงดัน</u>

ค่าปรับแรงดันหรือเปอร์เซ็นต์เรกูเลชันของหม้อแปลง คำนวณได้จากสมการ (2.12) และ (2.13) ที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ = 1 จะได้เปอร์เซ็นต์เรกูเลชัน

$$= 0.867 + \frac{(3.8)^2}{200} = 0.939\ \%$$

และที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ = 0.8 จะได้เปอร์เซ็นต์เรกูเลชัน

$$= (0.8 \times 0.867) + (0.6 \times 3.8) + \frac{(0.8 \times 3.8 - 0.6 \times 0.867)^2}{200}$$

$$= 3.0\ \%$$

นับว่าอยู่ในเกณฑ์ดี ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงยอมให้มีค่าเปอร์เซ็นต์เรกูเลชันได้ถึง 5 %

4.2.3.3 <u>ประสิทธิภาพของหม้อแปลง</u>

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าโหลดต่าง ๆ สำหรับเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่โหลดต่าง ๆ สำหรับเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 ที่ 75°C

รายการ	ที่โหลดต่าง ๆ				
	$\frac{1}{5}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{4}{5}$	1
P_t watts	174	696	1565	2782	4345
P_c watts	1080	1080	1080	1080	1080
$P_t + P_c$ watts	1254	1776	2645	3862	5425
output watts	100,000	200,000	300,000	400,000	500,000
input watts	101,254	201,776	302,645	403,862	505,425
η %	98.76	99.12	99.13	99.04	98.93

4.3 การออกแบบตัวถังและการระบายความร้อน

การระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออกสู่ภายนอกเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงโดยเฉพาะอย่างยิ่งหม้อแปลงที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวน เพราะก๊าซระบายความร้อนได้ดีน้อยกว่าของเหลว ต้องให้พื้นที่ผิวของขดลวดและแกนเหล็กที่สัมผัสกับก๊าซมีมากพอเพื่อช่วยให้การระบายความร้อนได้เพียงพอตามเงื่อนไขหม้อแปลงชนิดใช้ก๊าซเป็นฉนวนยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ไม่เกิน 75 ^{o}C [11] จากขนาดของขดลวดและแกนเหล็กที่ได้ออกแบบแล้วจะคำนวณพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดโดยประมาณได้ดังนี้

ขาของแกนเหล็ก :	1.6	m^2
โย้กของแกนเหล็ก :	1.4	m^2
ขดลวดแรงต่ำ :	3.0	m^2
ขดลวดแรงสูง :	6.0	m^2

ฉะนั้นพื้นที่ผิวระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดรวมทั้งหมดเท่ากับ 12 m^2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดขณะมีโหลดเท่ากับ 5425 W

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อพื้นที่ผิวระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวด

$$= \frac{5425}{12} = 452 \quad W/m^2$$

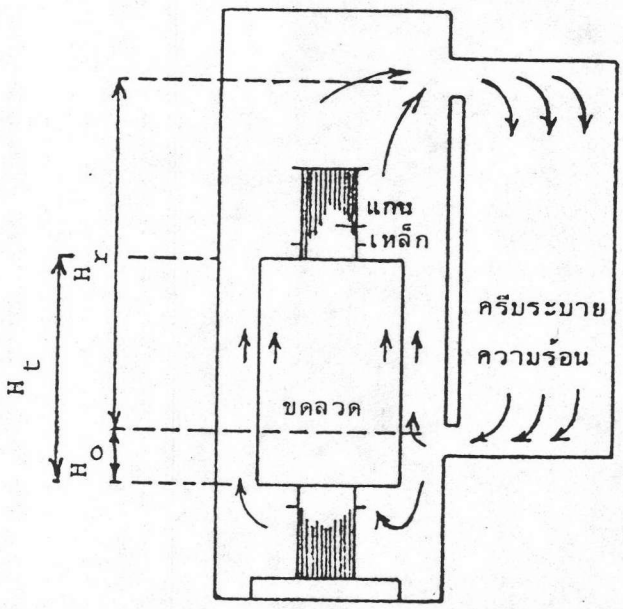
โดยทั่วไปหม้อแปลงแบบน้ำมันนั้น ค่านี้ประมาณ 800 W/m^2 [6] เนื่องจากการระบายความร้อนของก๊าซได้ดีเพียงครึ่งหนึ่งของแบบน้ำมันดังที่ได้กล่าวแล้วในข้อ 3.4.3 ดังนั้นสำหรับหม้อแปลงก๊าซ SF_6 จึงควรเพิ่มพื้นที่ผิวระบายความร้อนให้มากกว่าหม้อแปลงระบบน้ำมัน

การระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลงที่ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนในการออกแบบนี้ใช้วิธีให้ก๊าซหมุนเวียนโดยธรรมชาติ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแกนเหล็กและขดลวดจะถูกพาไปโดยก๊าซลอยขึ้นสู่ด้านบนของแกนเหล็กและขดลวด จากนั้นจะถ่ายเทไปยังอากาศรอบนอกตัวถังด้วยการที่ก๊าซไหลผ่านครีบระบายความร้อน ขนาดของตัวถังและครีบระบายความร้อนเป็นส่วนสำคัญในการช่วยระบายความร้อนจากภายในหม้อแปลงออกสู่ภายนอก กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดต่อพื้นที่ผิวของตัวถังและครีบระบายความร้อน สำหรับหม้อแปลงแบบน้ำมันมีค่า

ประมาณ 400 W/m^2 ส่วนหม้อแปลงแบบก๊าซอัดความดันเนื่องจากเหตุผลในด้านการระบายความร้อนดังได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 3 ค่านี้ควรจะประมาณ 200-250 W/m^2 จากกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดที่ทราบค่าสามารถประมาณพื้นที่ผิวของตัวถังและครีบระบายความร้อนได้ดังนี้ คือ

$$\text{พื้นที่ผิวของตัวถังและครีบ} = \frac{5425}{250} = 21.7 \ m^2$$

นอกจากนี้ตำแหน่งในการติดตั้งครีบระบายความร้อนยังมีส่วนช่วยในการระบายความร้อนอีกด้วย ดังแสดงในรูป 4.7



รูป 4.7 การระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติของหม้อแปลงแบบก๊าซ SF_6

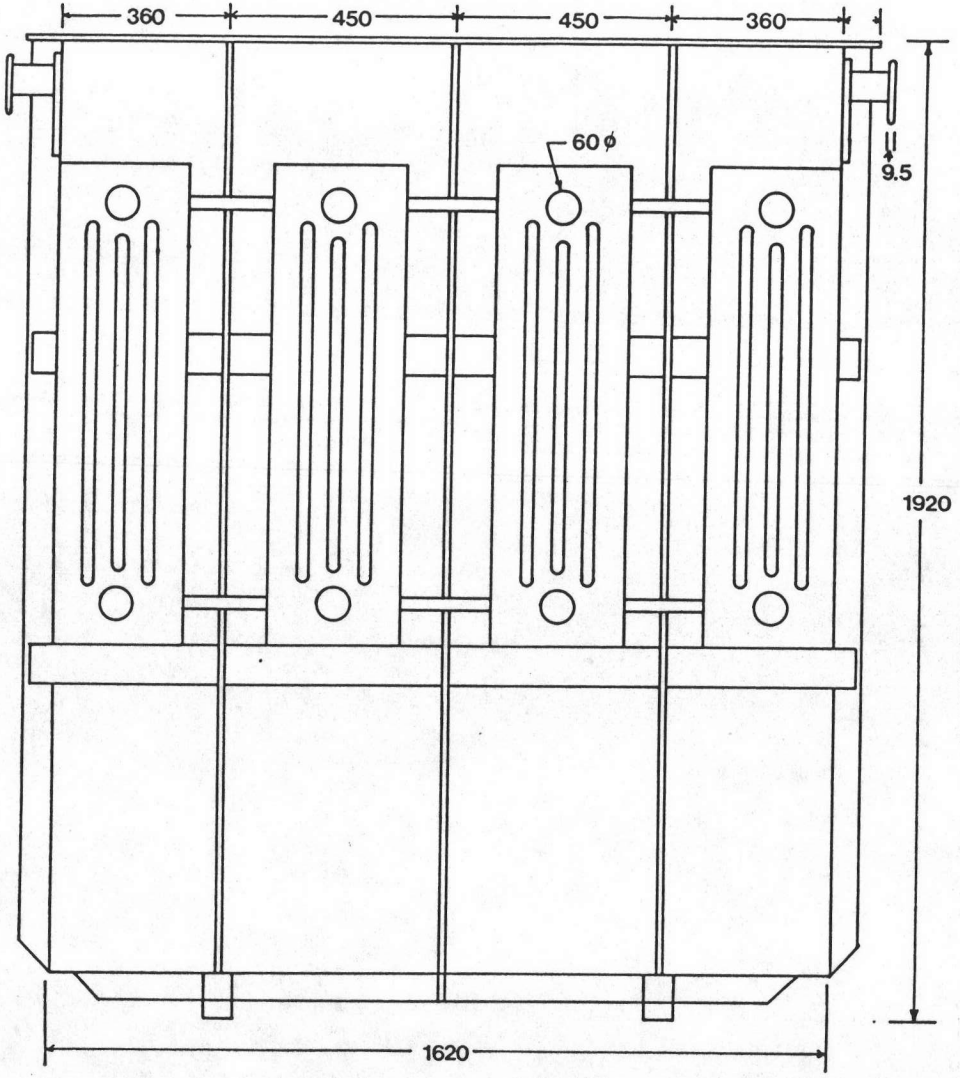
H_t คือ ความสูงของขดลวด

H_r คือ ความสูงของครีบระบายความร้อน

H_o คือ ความแตกต่างของความสูงระหว่างส่วนล่างของครีบกับส่วนล่างของขดลวด

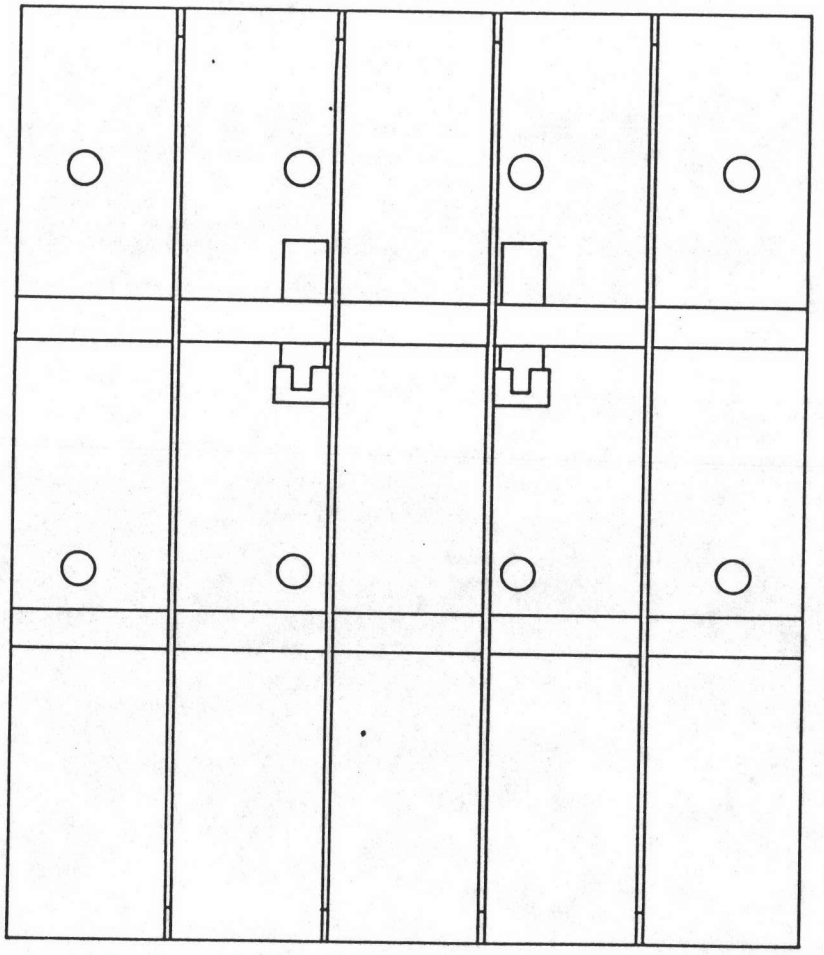
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับก๊าซ และระหว่างก๊าซกับครีบระบายความร้อนมีผลเนื่องจากค่า H_t, H_r และ H_o ด้วย ดังอธิบายด้วยสมการในภาคผนวก ข. ถ้าค่า $(H_r - H_t + 2H_o)$ มีค่ามาก จะมีผลให้อุณหภูมิแตกต่างทั้ง 2 ค่านั้นมีค่าต่ำ [12] ทำให้ผลรวมของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมีค่าลดลงด้วย ค่า H_t นั้นมีค่าแน่นอน ส่วนค่า H_r ซึ่งเป็น

ความสูงของครีบระบายความร้อนจะมีขนาดมาตรฐานจากโรงงานที่ผลิต ดังนั้นค่า H_o จึงเป็นค่าเดียวที่ปรับได้ ดังนั้นเพื่อให้ค่ารวม $(H_r - H_t + 2H_o)$ มีค่ามากจึงยกระดับส่วนล่างของครีบให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มระยะ H_o ความสูงของตัวถังหม้อแปลงจึงสูงขึ้น ขนาดของตัวถัง , ครีบระบายความร้อน แสดงในรูป 4.8



ด้านหน้าของตัวถัง

ฝาถังหนา	9	เหล็กดามตรงหนา	9.5
ปีกถังหนา	5.6	เหล็กตัวถังหนา	4.7

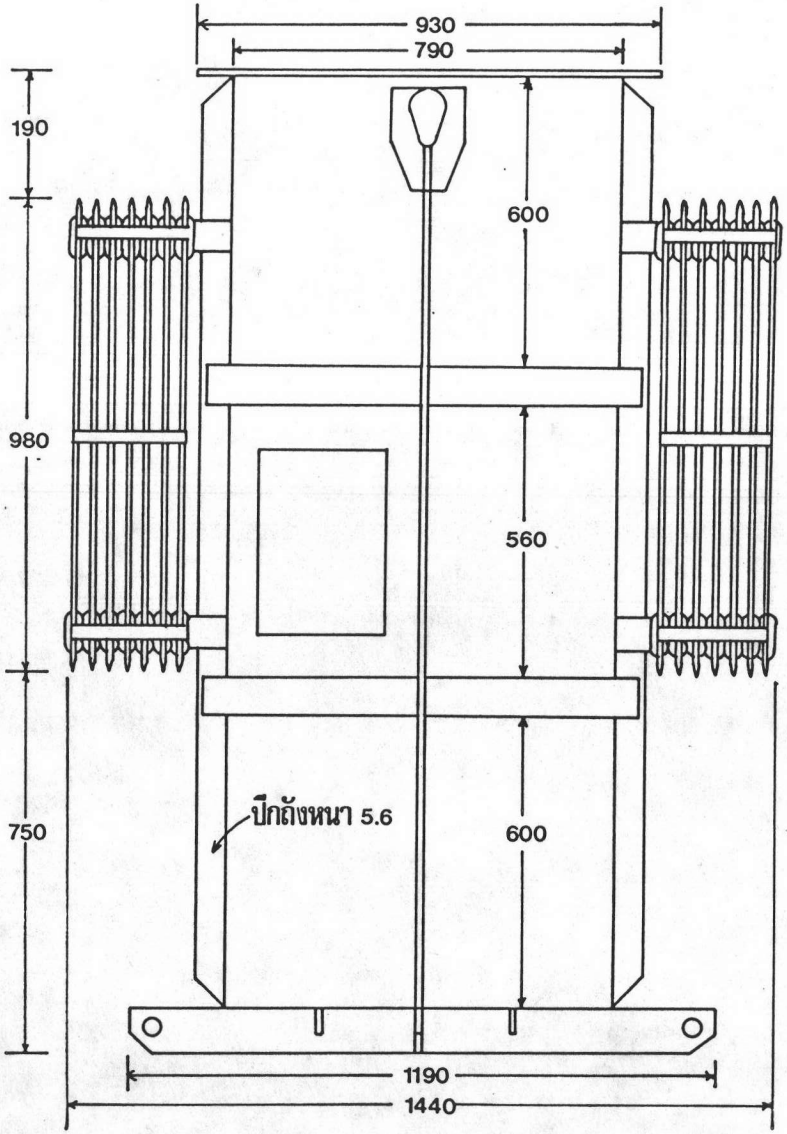


ด้านในของตัวถัง

หน่วย mm

สเกล 1 ต่อ 160

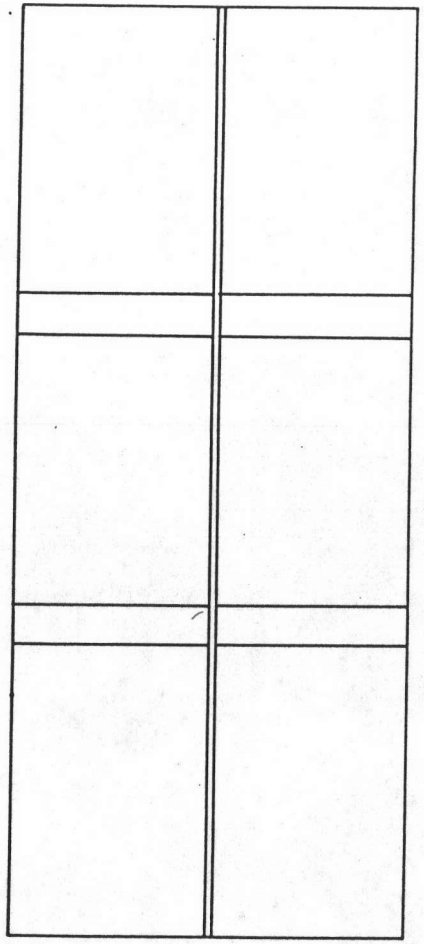
รูป 4.8ก. รายละเอียดของตัวถัง



ด้านข้างของตัวถัง

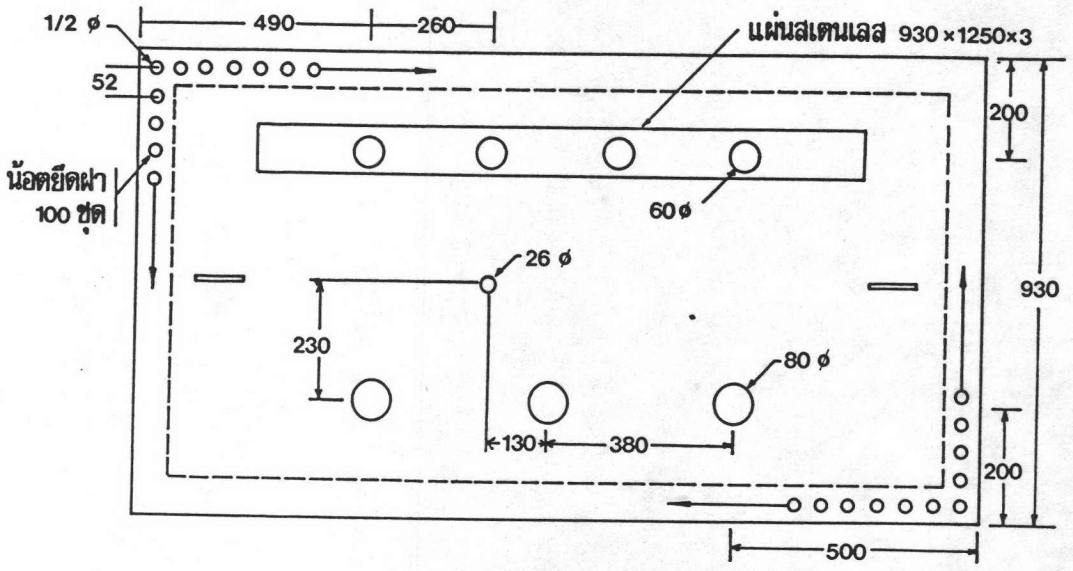
หน่วย mm

สเกล 1 ต่อ 160

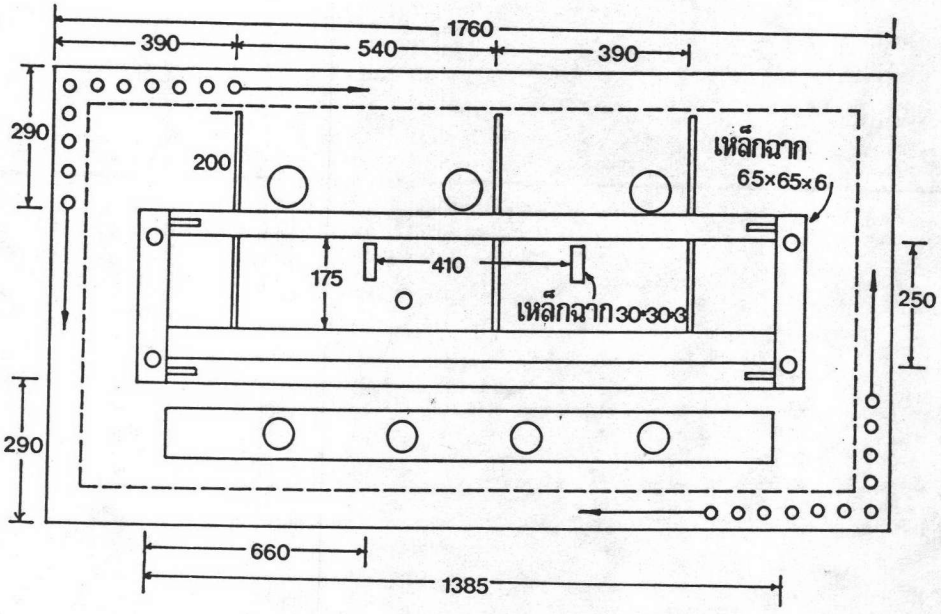


ด้านในของตัวถัง

รูป 4.8ข รายละเอียดของตัวถัง



ฝาถัง



ด้านในของฝา

หน่วย mm

สเกล 1 ต่อ 160

รูป 4.8ค. รายละเอียดฝาถัง