

BAB IV

DATA DAN ANALISA

4.1. Data-Data Transformator

Dalam proses penelitian sebuah transformator sangat di perlukan sekali data-data dari sebuah transformator itu sendiri, baik data sisi elektrik maupun data sisi mekanik yang dapat di jadikan sebagai bahan referensi dan acuan dalam menganalisa rugi-rugi daya sebuah transformator. Untuk membandingkan rugi-rugi daya pada transformator dengan *winding* tembaga (Cu-Cu) dengan *winding* aluminium (Al-Al) dapat melihat data transformator dibawah ini dimana data transformator yang dijadikan referensi ini merupakan data transformator yang sudah sesuai dengan standar SPLN D3.003-1;2007. Data transformator *winding* tembaga (Cu-Cu) ditampilkan pada tabel 4.1 sedangkan untuk transformator *winding* (Al-Al) aluminium ditampilkan pada tabel 4.2.

Data di peroleh berdasarkan data pabrik, data desain dan berdasarkan perhitungan secara manual pada transformator berdasarkan kapasitas dan spesifikasi yang sama yaitu 400 kVA, Dyn-5, 50 Hz, 20 kV-400 V. Data pabrik yang di ambil merupakan data transformator tipe *winding* Cu-Cu dan tipe *winding* Al-Al yang digunakan sebagai data referensi seperti yang di tunjukkan pada (tabel 4.1 dan tabel 4.2). Sedangkan data desain dan perhitungan secara manual mengacu ke data utama transformator tipe *winding* Cu-C tipe *winding* Cu-Cu dan tipe *winding* Al-Al. Dari kedua data tersebut terdapat beberapa perbedaan pada bagian elektrik dan bagian mekanik.

Tabel 4.1. Data *Nameplate* Transformator Kapasitas 400 kVA *Winding* Cu-Cu

Data Transformator <i>Winding</i> Cu-Cu	Nilai
Rating Daya	400 kVA
Frekuensi	50 Hz
Tegangan primer	20000 Volt
Tegangan sekunder	400 Volt

Data Transformator <i>Winding</i> Cu-Cu	Nilai
Arus primer	11,54 Ampere
Arus sekunder	577,35 Ampere
Tegangan sadapan primer	21 – 20,5 – 20 – 19,5 – 19 kV
Tegangan Impedans	4.0 %
Kelompok hubungan	Dyn5
Standar transformator	SPLN D3.002-1:2007
Jenis minyak	Mineral
Volume minyak	313 Liter
Berat total	1860 Kg
Panjang Tanki	1050
Lebar Tangki	510

Tabel 4.2. Data *Nameplate* Transformator Kapasitas 400 kVA *Winding* Al-Al

Data Transformator <i>Winding</i> Al-Al	Nilai
Rating Daya	400 kVA
Frekuensi	50 Hz
Tegangan primer	20000 Volt
Tegangan sekunder	400 Volt
Arus primer	11,54 Ampere
Arus sekunder	577,35 Ampere
Tegangan sadapan primer	21 – 20,5 – 20 – 19,5 – 19 kV
Tegangan Impedans	4.0 %
Kelompok hubungan	Dyn5
Standar transformator	SPLN D3.002-1:2007
Jenis minyak	Mineral
Volume minyak	510 Liter
Berat total	1990 Kg
Panjang Tanki	1170
Lebar Tangki	560

4.2. Bagian Elektrik

Transformator dengan tipe *winding* Cu-Cu (tembaga) secara signifikan memiliki perbedaan pada bagian elektrik dengan data transformator tipe *winding* Al-Al (aluminium). Berdasarkan data desain perhitungan transformator *winding* Cu-Cu dan data desain perhitungan transformator yang menggunakan *winding* Al-Al maka dapat di peroleh data seperti tabel di bawah ini (*tabel 4.3*).

Tabel 4.3. Data Perbedaan Bagian Elektrik Berdasarkan Perhitungan Desain

Data	400 kVA <i>Winding</i> Cu-Cu	400 kVA <i>Winding</i> Al-Al
Rugi-rugi besi	581 Watt	607 Watt
Rugi-rugi kumparan primer	2381,7 Watt	2172,3 Watt
Rugi-rugi kumparan sekunder	1486,2 Watt	1585,7 Watt
Arus primer / Arus sekunder	6,67 A / 577,35 A	6,67 A / 577,35 A
Jumlah kumparan primer	1905	1992
Jumlah Kumparan Sekunder	22	23
Tegangan per lilitan	10,49 V	10,04 V
Kerapatan arus kumparan primer	4,07 A/mm ²	2,17 A/mm ²
Kerapatan arus kumparan sekunder	2,83 A/mm ²	1,05 A/mm ²
Kerapatan fluks inti besi (Bm)	1,36 Tesla	1,33 Tesla
Ukuran kumparan primer	Tipe pvf Diameter : 1,9 mm	Tipe pvf Diameter : 2,6 mm
Ukuran kumparan sekunder	Tipe Sheet 0,9 x 330 mm	Tipe Sheet 1,2 x 455 mm
% Resistansi (R)	0,96 %	0,94 %
% Reaktansi (X)	4,10 %	4,28 %
% Impedansi (Z)	3,98 %	3,78 %

4.2.1. Arus Kumbaran

Arus yang mengalir pada kumbaran transformator di hitung berdasarkan arus fasa pada masing-masing kumbaran primer dan kumbaran sekunder.

4.2.1.1. Arus Kumbaran Trafo *Winding* Cu-Cu

Berdasarkan data (*tabel 3.1*), dan persamaan (2.7 & 2.8) maka arus fasa kumbaran primer pada hubungan delta yaitu :

$$I_L = \frac{400 \text{ kVA}}{20 \text{ kV} \times \sqrt{3}} = 11,54 \text{ A}$$

Untuk nilai arus primer adalah sebagai berikut :

$$I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{11,54}{\sqrt{3}} = 6,67 \text{ A}$$

Berdasarkan data (*tabel 3.1*), dan persamaan (2.11 & 2.12) maka arus fasa kumbaran sekunder pada hubungan bintang yaitu :

$$I_s = \frac{400 \text{ kVA}}{0,4 \text{ kV} \times \sqrt{3}} = 577,35 \text{ A}$$

4.2.1.2. Arus Kumbaran Trafo *Winding* Al-Al

Berdasarkan data (*tabel 3.2*), dan persamaan (2.7 & 2.8) maka arus fasa kumbaran primer pada hubungan delta yaitu :

$$I_L = \frac{400 \text{ kVA}}{20 \text{ kV} \times \sqrt{3}} = 11,54 \text{ A}$$

Untuk nilai arus primer adalah sebagai berikut :

$$I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{11,54}{\sqrt{3}} = 6,67 \text{ A}$$

Berdasarkan data (*tabel 3.2*), dan persamaan (2.11 & 2.12) maka arus fasa kumbaran sekunder pada hubungan bintang yaitu :

$$I_s = \frac{400 \text{ kVA}}{0,4 \text{ kV} \times \sqrt{3}} = 577,35 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan arus kumbaran baik pada transformator *winding* tembaga maupun transformator *winding* aluminium nilainya adalah sama baik pada arus kumbaran primer dan arus kumbaran sekundernya. Hal ini disebabkan karena tegangan transformator di sisi *High Voltage* pada transformator *winding* tembaga

maupun transformator *winding* aluminium adalah sama yaitu sebesar 20000 V. Demikian juga di sisi *Low Voltage* pada transformator *winding* tembaga dan transformator *winding* aluminium bernilai sama yaitu sebesar 400 V. Sehingga nilai arus kumparannya menjadi sama besar antara transformator *winding* tembaga maupun transformator *winding* aluminium.

4.2.2. Tegangan Per Lilitan

4.2.2.1. Tegangan Per Lilitan Trafo *Winding* Cu-Cu

Pada desain transformator di ketahui total lilitan sisi sekunder (N2) sebanyak 22 lilitan. Berdasarkan data (*tabel 4.3*), dan persamaan (2.17) maka nilai tegangan per lilitan pada kumparan sekunder yaitu :

$$V_t = \frac{V_s / \sqrt{3}}{N_2} = \frac{400 / \sqrt{3}}{22} = 10,49 \text{ Volt/turn}$$

Berdasarkan data (*tabel 4.3*), dan persamaan (2.16) maka jumlah lilitan kumparan primer (N1) pada tegangan rating 20 kV yaitu :

$$N_1 = \frac{V_p}{V_t} = \frac{20000 \text{ Volt}}{10,49 \text{ volt/turn}} = 1905,26 \text{ lilitan} \approx 1905 \text{ lilitan.}$$

Sedangkan jumlah lilitan kumparan primer (N1) pada tegangan tertinggi 21 kV yaitu :

$$N_1 = \frac{21000 \text{ Volt}}{10,49 \text{ volt/turn}} = 2000,53 \text{ lilitan} \approx 2001 \text{ lilitan.}$$

4.2.2.2. Tegangan Per Lilitan Trafo *Winding* Al-Al

Pada desain transformator di ketahui total lilitan sisi sekunder (N2) sebanyak 23 lilitan. Berdasarkan data (*tabel 4.3*), dan persamaan (2.17) maka nilai tegangan per lilitan pada kumparan sekunder yaitu :

$$V_t = \frac{V_s / \sqrt{3}}{N_2} = \frac{400 / \sqrt{3}}{23} = 10,04 \text{ Volt/turn}$$

Berdasarkan data (*tabel 4.3*), dan persamaan (2.16) maka jumlah lilitan kumparan primer (N1) pada tegangan rating 20 kV yaitu :

$$N_1 = \frac{V_p}{V_t} = \frac{20000 \text{ Volt}}{10,04 \text{ volt/turn}} = 1992,03 \text{ lilitan} \approx 1992 \text{ lilitan.}$$

Sedangkan jumlah lilitan kumparan primer (N_1) pada tegangan tertinggi 21 kV yaitu :

$$N_1 = \frac{21000 \text{ Volt}}{10,04 \text{ volt/turn}} = 2091,46 \text{ lilitan} \approx 2091 \text{ lilitan.}$$

Di lihat dari perhitungan nilai tegangan per lilitan transformator *winding* tembaga memiliki tegangan per lilitan lebih tinggi dari transformator *winding* aluminium. Hal ini disebabkan karena desain lilitan sekunder pada transformator *winding* tembaga lebih sedikit dibandingkan lilitan sekunder transformator *winding* aluminium.

4.2.3. Kerapatan Arus Kumparan

4.2.3.1. Kerapatan Arus Kumparan Primer *Winding* Cu-Cu

Berdasarkan persamaan (2.18), dan pemilihan ukuran kumparan primer dengan tipe pvf = diameter 1.9 mm, maka kerapatan arus sisi primer yaitu :

$$J_p = \frac{I_p \text{ fasa}}{A_1} = \frac{11,54 \text{ A}}{2,83 \text{ mm}^2} = 4,07 \text{ A/mm}^2$$

Untuk A_1 jenis kawat pvf dapat dicari dengan rumus :

$$A_1 = \frac{3,14 \times D^2}{4} = \frac{3,14 \times 1,9^2}{4} = 2,83 \text{ mm}^2$$

Selanjutnya, berdasarkan persamaan (2.19), dan pemilihan ukuran kumparan jenis sheet = 0,9 x 330 mm, maka kerapatan arus sisi sekunder :

$$J_s = \frac{I_s \text{ fasa}}{A_2} = \frac{577,35 \text{ A}}{297 \text{ mm}^2} = 1,94 \text{ A/mm}^2$$

Untuk A_2 jenis kawat sheet dapat dicari dengan rumus :

$$\begin{aligned} A_2 &= \text{Dimensi tebal} \times \text{tinggi bahan kumparan} \\ &= 0,9 \times 330 \\ &= 297 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

4.2.3.2. Kerapatan Arus Kumbaran Primer *Winding* Al-Al

Berdasarkan persamaan (2.18), dan pemilihan ukuran kumbaran primer tipe pvf = diameter 2.6 mm, maka kerapatan arus sisi primer yaitu :

$$J_p = \frac{I_p \text{ fasa}}{A_1} = \frac{11,54 \text{ A}}{5,3 \text{ mm}^2} = 2,17 \text{ A/mm}^2$$

Untuk A1 jenis kawat pvf dapat dicari dengan rumus :

$$A_1 = \frac{3,14 \times D^2}{4} = \frac{3,14 \times 2,6^2}{4} = 5,3 \text{ mm}^2$$

Selanjutnya, berdasarkan persamaan (2.19), dan pemilihan ukuran kumbaran jenis sheet = 1,2 x 455 mm, maka kerapatan arus sisi sekunder :

$$J_s = \frac{I_s \text{ fasa}}{A_2} = \frac{577,35 \text{ A}}{546 \text{ mm}^2} = 1,05 \text{ A/mm}^2$$

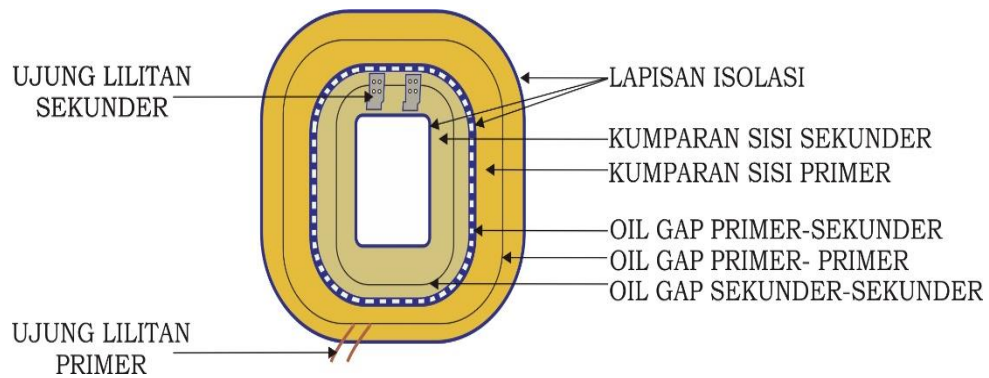
Untuk A2 jenis kawat sheet dapat dicari dengan rumus :

$$\begin{aligned} A_2 &= \text{Dimensi tebal} \times \text{tinggi bahan kumbaran} \\ &= 1,2 \times 455 \\ &= 546 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dari perhitungan kerapatan arus kumbaran transformator *winding* tembaga memiliki kerapatan arus kumbaran lebih tinggi dari transformator *winding* aluminium. Hal ini disebabkan karena perbedaan ukuran lilitan yang digunakan, semakin besar ukuran lilitan yang digunakan maka akan semakin kecil kerapatan arus kumbarannya.

4.2.4. Dimensi Kumbaran

Kumbaran transformator ada dua bagian, yaitu kumbaran primer kumbaran sekunder. Secara umum susunan pada kumbaran transformator dapat di lihat seperti (gambar 4.1) berikut ini :



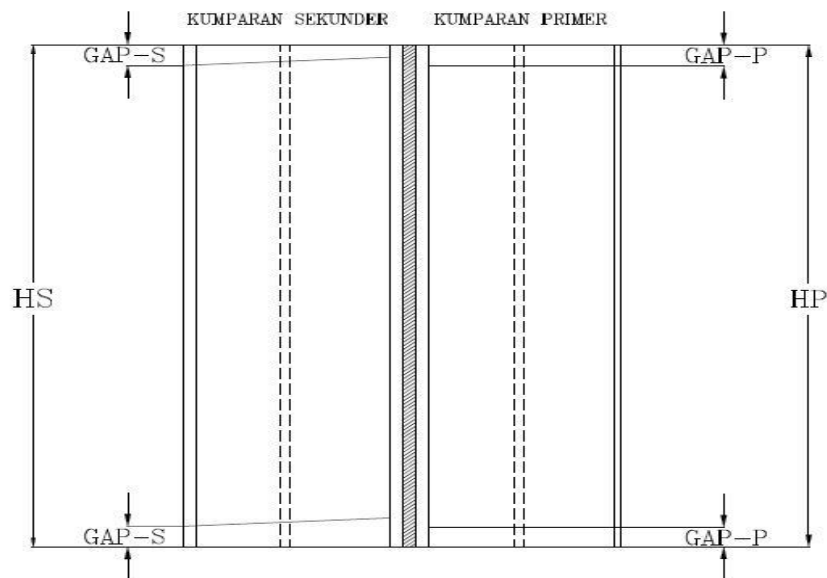
Gambar 4.1. Penampang susunan kumparan transformator

Dari (gambar 4.1) dan sesuai data desain pabrik di ketahui nilai ukuran sebagai berikut ini:

Tabel 4.4. Data Desain Kumparan

Data Desain Kumparan	400 kVA Winding Cu-Cu	400 kVA Winding Al-Al
Panjang dudukan kumparan (BL)	255 mm	260 mm
Lebar dudukan kumparan (BW)	185 mm	185 mm
Lapisan kertas isolasi sekunder-earth	1,5 mm	1,5 mm
Oli gap sekunder-sekunder	5 mm	5 mm
Oli gap primer-sekunder	3 mm	5 mm
Lapisan kertas isolasi primer-sekunder	(0,18 x 20) mm	(0,18 x 20) mm
Oli gap primer-primer	5 mm	5 mm
Lapisan kertas isolasi primer-earth	0,5 mm	0,5 mm
Tinggi Kumparan (H)	350 mm	495 mm
Keliling kumparan sekunder (T2)	834,37051 mm	871,34108 mm
Keliling kumparan primer (T1)	1105,56850 mm	1198,72646 mm

Susunan pada tinggi kumparan pada sebuah transformator dapat di bagi menjadi dua bagian, yaitu antara sisi kumparan primer dan sekunder. Untuk membedakan antara kumparan primer dan sekunder, maka kumparan pada transformator dapat di lihat dari pandangan samping atau dari atas kumparan.



Gambar 4.2. Detail Tinggi Kumparan Primer dan Sekunder dari Samping

Keterangan gambar :

- HS = Tinggi kumparan sekunder (mm)
- HP = Tinggi kumparan primer (mm)
- GAP-S = Celah kumparan sekunder atas dan bawah (mm)
- GAP-P = Celah kumparan primer atas dan bawah (mm)

4.2.5. Rugi-Rugi Lilitan

4.2.5.1. Rugi – Rugi Lilitan Pada *Winding* Tembaga (Wcu)

Berdasarkan data dan perhitungan diketahui :

- ❖ $I_p = 6,67$ A, sesuai perhitungan arus fasa sub-bagian (4.2.1.1)
- ❖ $I_s = 577,35$ A, sesuai perhitungan arus fasa sub-bagian (4.2.1.1)
- ❖ $N_1 = 1905$ lilitan, sesuai perhitungan sub-bagian (4.2.2.1)
- ❖ $N_2 = 22$ lilitan, sesuai data sub-bagian (4.2.2.1)
- ❖ $T_1 = 1105,568502$ mm²

- ❖ $T_2 = 834,37051 \text{ mm}^2$
- ❖ $A_1 = 2.83 \text{ mm}^2$, sesuai dengan perhitungan sub-bagian (4.2.3.1)
- ❖ $A_2 = 297 \text{ mm}^2$, sesuai dengan perhitungan sub-bagian (4.2.3.1)
- ❖ Tahanan jenis tembaga = $0.0021 \times 10^{-3} \mu\Omega\text{m}$, sesuai (tabel 2.1)
- ❖ Berat jenis tembaga = $8.89 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$, sesuai (tabel 2.1)
- ❖ $KW_{cu-1} = 1,0885$ (nilai konstanta rugi-rugi kumparan primer yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)
- ❖ $KR-1 = 1,052$ (nilai konstanta resistan yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)
- ❖ $KW_{cu-2} = 1,0885$ (nilai konstanta rugi-rugi kumparan sekunder yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)
- ❖ $KR-2 = 1,052$ (nilai konstanta resistan yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)

Dengan melihat persamaan (2.24 dan 2.25), maka nilai rugi-rugi tembaga pada kumparan primer dan sekunder dapat diperoleh sebagai berikut :

➤ Rugi-rugi kumparan primer

$$\begin{aligned}
 W_{Cu-1} &= I_p^2 \left[\frac{\rho_{cu} \times N_1 \times T_1}{A_1} \right] \times KW_{cu-1} \times KR-1 \\
 &= (6,67)^2 \left[\frac{0.021 \times 0.001 \times 1905 \times 1105,568}{2.83} \right] \times 1,0885 \times 1,052 \\
 &= 793,9 \text{ Watt} \times 3 \text{ (karena transformator tiga fasa)} \\
 &= 2381,7 \text{ Watt} \approx 2382 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Berat kumparan primer dapat di peroleh :

$$\begin{aligned}
 &= 3 \times N1 (21 \text{ kV}) \times T1 \times A1 \times \text{Berat jenis tembaga} \times \text{KR-1} \\
 &= 3 \times 2001 \times 1105,56 \times 2,83 \times 8,89 \times 10^{-6} \times 1,052 \\
 &= 171,5 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

➤ Rugi-rugi kumparan sekunder

$$\begin{aligned}
 W_{Cu\ 2} &= I_s^2 \left[\frac{\rho_{cu} \times N2 \times T2}{A2} \right] \times K_{Wcu-2} \times \text{KR-2} \\
 &= (577,35)^2 \left[\frac{0,021 \times 0,001 \times 22 \times 834,37}{297} \right] \times 1,0885 \times 1,052 \\
 &= 495,40 \text{ Watt} \times 3 \text{ (karena transformator tiga fasa)} \\
 &= 1486,2 \text{ Watt} \approx 1486 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Berat kumparan sekunder dapat di peroleh :

$$\begin{aligned}
 &= 3 \times N2 \times T2 \times A2 \times \text{berat jenis tembaga} \times \text{KR-2} \\
 &= 3 \times 22 \times 834,37 \times 297 \times 8,89 \times 10^{-6} \times 1,052 \\
 &= 149 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Maka rugi-rugi lilitan total pada transformator *winding* tembaga (Cu-Cu) :

$$\begin{aligned}
 W_{CU\ TOTAL} &= W_{CU\ p} + W_{CU\ s} = 2381,7 + 1486,2 \\
 &= 3867,9 \text{ Watt} \approx 3868 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.2.5.2. Rugi – Rugi Lilitan Pada *Winding* Aluminium (W_{Al})

Berdasarkan data dan perhitungan diketahui :

- ❖ $I_p = 6,67 \text{ A}$, sesuai perhitungan arus fasa sub-bagian (4.2.1.2)
- ❖ $I_s = 577,35 \text{ A}$, sesuai perhitungan arus fasa sub-bagian (4.2.1.2)
- ❖ $N1 = 1992$ lilitan, sesuai perhitungan sub-bagian (4.2.2.2)
- ❖ $N2 = 23$ lilitan, sesuai data sub-bagian (4.2.2.2)
- ❖ $T1 = 1198,72 \text{ mm}^2$
- ❖ $T2 = 871,34 \text{ mm}^2$

- ❖ $A_1 = 5,3 \text{ mm}^2$, sesuai dengan perhitungan sub-bagian (4.2.3.2)
- ❖ $A_2 = 546 \text{ mm}^2$, sesuai dengan perhitungan sub-bagian (4.2.3.2)
- ❖ Tahanan jenis aluminium $= 0,0035 \times 10^{-3} \mu\Omega\text{m}$, sesuai (tabel 2.1)
- ❖ Berat jenis aluminium $= 2,7 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$, sesuai (tabel 2.1)
- ❖ $K_{Wal-1} = 1,0219$ (nilai konstanta rugi-rugi kumparan primer yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)
- ❖ $K_{R-1} = 1,0128$ (nilai konstanta resistansi yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)
- ❖ $K_{Wal-2} = 1,0219$ (nilai konstanta rugi-rugi kumparan sekunder yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)
- ❖ $K_{R-2} = 1,2078$ (nilai konstanta resistansi yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)

Dengan melihat persamaan (2.24 dan 2.25), maka nilai rugi-rugi aluminium pada kumparan primer dan sekunder dapat diperoleh sebagai berikut :

➤ Rugi-rugi kumparan primer

$$\begin{aligned}
 W_{AL-1} &= I_p^2 \left[\frac{\rho_{cu} \times N_1 \times T_1}{A_1} \right] \times K_{Wal-1} \times K_{R-1} \\
 &= (6,67)^2 \left[\frac{0,035 \times 0,001 \times 1992 \times 1198,72}{5,3} \right] \times 1,0219 \times 1,0128 \\
 &= 724,1 \text{ Watt} \times 3 \text{ (karena transformator tiga fasa)} \\
 &= 2172,3 \text{ Watt} \approx 2172 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Berat kumparan primer dapat di peroleh :

$$\begin{aligned}
 &= 3 \times N1 (21 \text{ kV }) \times T1 \times A1 \times \text{berat jenis aluminium} \times \text{KR-1} \\
 &= 3 \times 2091 \times 1198,72 \times 5,3 \times 2,7 \times 10^{-6} \times 1,0128 \\
 &= 110,5 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

➤ Rugi-rugi kumparan sekunder

$$\begin{aligned}
 W_{AL.2} &= I_s^2 \left[\frac{\rho_{cu} \times N2 \times T2}{A2} \right] \times K_{Wal-2} \times \text{KR-2} \\
 &= (577,35)^2 \left[\frac{0.035 \times 0.001 \times 23 \times 871,34}{546} \right] \times 1,0219 \times 1,207 \\
 &= 528,56 \text{ Watt} \times 3 \text{ (karena transformator tiga fasa)} \\
 &= 1585,7 \text{ Watt} \approx 1586 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Berat kumparan sekunder dapat di peroleh :

$$\begin{aligned}
 &= 3 \times N2 \times T2 \times A2 \times \text{berat jenis aluminium} \times \text{KR-2} \\
 &= 3 \times 23 \times 871,34 \times 546 \times 2,7 \times 10^{-6} \times 1,207 \\
 &= 90,8 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Maka rugi-rugi lilitan total pada winding aluminium :

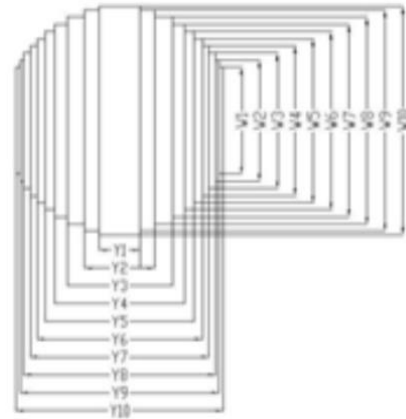
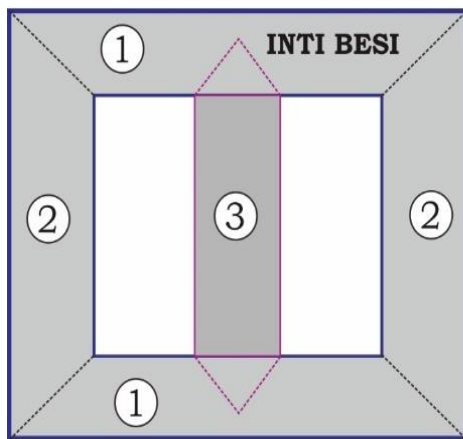
$$\begin{aligned}
 W_{AL p} + W_{AL s} &= 2172,3 + 1586,7 \\
 &= 3758 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.5. Data rugi-rugi kumparan

Data	400 kVA Winding Cu- Cu	400 kVA Winding Al-Al	Keterangan
Rugi kumparan primer	2382 watt	2172 watt	Berdasarkan Perhitungan Data Desain
Rugi kumparan sekunder	1486 watt	1586 watt	
Total rugi kumparan	3868 watt	3758 watt	
Total rugi kumparan	3924,57 watt	3882,09 watt	Berdasarkan hasil <i>Transformer test</i>

4.2.6. Dimensi Plat Inti Besi

Dimensi plat inti besi pada transformator tiga fasa dapat ditunjukkan seperti gambar di bawah ini :

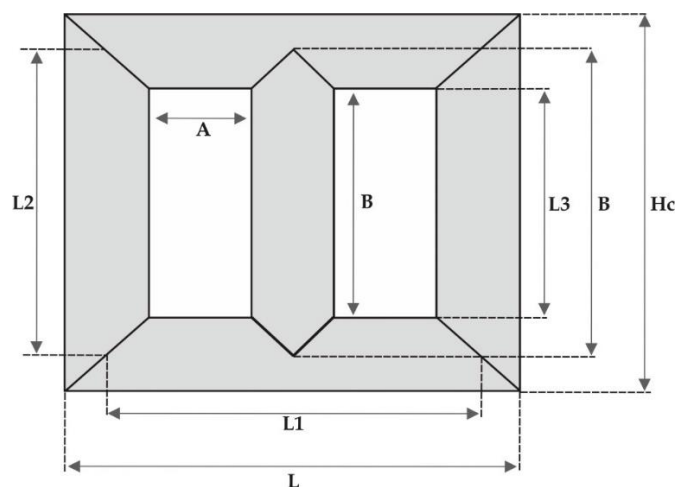


Gambar 4.3a. Dimensi Plat Inti Besi

Gambar 4.3b. Dimensi Tebal Inti Besi

Dari data (gambar 4.3) dan desain transformator, maka diperoleh data sebagai berikut:

- ❖ Inti besi nomor 1 = Inti besi atas dan bawah (Gambar 4.3a)
- ❖ Inti besi nomor 2 = Inti besi samping (Gambar 4.3a)
- ❖ Inti besi nomor 3 = Inti besi tengah (Gambar 4.3a)



Gambar 4.4. Dimensi Plat Inti Besi Detail

4.2.6.1 Dimensi Plat Inti Besi Trafo *Winding* Tembaga

❖ W = Lebar plat inti besi , Y = Tebal tumpukan plat inti besi

W		Y	
W1	180	Y1	89
W2	170	Y2	133
W3	160	Y3	155
W4	150	Y4	172
W5	140	Y5	185
W6	130	Y6	196
W7	120	Y7	206
W8	110	Y8	214
W9	100	Y9	221
W10	80	Y10	233

❖ B = Tinggi jendela inti besi

$$= H \text{ coil} + \text{Gap B}$$

$$= 350 + 15$$

$$= 365 \text{ mm}$$

❖ A = Lebar jendela inti besi

$$= (L2 + \text{Gap A}) - W1$$

$$= 319 + 13 - 180$$

$$= 152 \text{ mm}$$

❖ Hc = Tinggi total inti besi

$$= B + 2W1$$

$$= 365 + (2 \times 180)$$

$$= 365 + 360$$

$$= 725 \text{ mm}$$

❖ L = Panjang total inti besi

$$= 2A + 3W1$$

$$\begin{aligned}
 &= (2 \times 152) + (3 \times 180) \\
 &= 304 + 540 \\
 &= 844 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \diamond L1 &= \text{Panjang } center \text{ inti besi} \\
 &= L - W1 \\
 &= 844 - 180 \\
 &= 664 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \diamond L2 = L3 &= \text{Panjang } center \text{ inti besi} \\
 &= Hc - W1 \\
 &= 725 - 180 \\
 &= 545 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

4.2.6.1 Dimensi Plat Inti Besi Trafo *Winding* Aluminium

\diamond W = Lebar plat inti besi , Y = Tebal tumpukan plat inti besi

W		Y	
W1	180	Y1	94
W2	160	Y2	160
W3	140	Y3	190
W4	120	Y4	211
W5	100	Y5	226

$$\begin{aligned}
 \diamond B &= \text{Tinggi jendela inti besi} \\
 &= H \text{ coil} + \text{Gap B} \\
 &= 495 + 15 \\
 &= 510 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \diamond A &= \text{Lebar jendela inti besi} \\
 &= (L2 + \text{Gap A}) - W1
 \end{aligned}$$

$$= 359 + 11 - 180$$

$$= 190 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ Hc} &= \text{Tinggi total inti besi} \\ &= B + 2W1 \\ &= 510 + (2 \times 180) \\ &= 510 + 360 \\ &= 870 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ L} &= \text{Panjang total inti besi} \\ &= 2A + 3W1 \\ &= (2 \times 190) + (3 \times 180) \\ &= 380 + 540 \\ &= 920 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ L1} &= \text{Panjang } \textit{center} \text{ inti besi} \\ &= L - W1 \\ &= 920 - 180 \\ &= 740 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ L2} = \text{L3} &= \text{Panjang } \textit{center} \text{ inti besi} \\ &= \text{Hc} - W1 \\ &= 870 - 180 \\ &= 690 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dari data perhitungan dimensi plat inti besi kedua jenis transformator diketahui dimensi plat inti besi transformator *winding* aluminium (Al-Al) lebih besar dibandingkan dengan dimensi plat inti besi transformator *winding* tembaga (Cu-Cu). Hal ini dikarenakan desain kumparan transformator *winding* aluminium juga lebih besar dibandingkan dengan transformator *winding* tembaga. Apabila desain kumparan lebih besar maka desain plat inti besi juga lebih besar, hal ini

tentunya untuk menyesuaikan agar kumparan bisa masuk kedalam jendela inti besi / mengelilingi inti besi. Karena inti besi merupakan inti/bagian terdalam dari sebuah transformator maka semakin kecil tebal inti besi akan menyebabkan dimensi dan berat kumparan semakin kecil pula.

4.2.7. Kerapatan Fluks Inti Besi Transformator

Setelah diketahui dimensi dan susunan inti besi pada transformator tiga fasa maka dapat dilakukan untuk menghitung kerapatan fluks inti besi.

4.2.7.1. Kerapatan Fluks Inti Besi Trafo *Winding* Tembaga

Tabel 4.6. Lebar dan Tebal Plat Inti Besi (trafo *winding* Cu-Cu)

No.	W (lebar)	Y (tebal tumpukan)	T
Dalam satuan mm			
1	180	89	89
2	170	133	44
3	160	155	22
4	150	172	17
5	140	185	13
6	130	196	11
7	120	206	10
8	110	214	8
9	100	221	7
10	80	233	12
MFe		762,4 kg	

Rumus luas area:

$$\text{Luas area} = (W_1 \times T_1) + (W_2 \times T_2) + (W_3 \times T_3) + (W_4 \times T_4) + (W_5 \times T_5) + (W_6 \times T_6) + (W_7 \times T_7) + (W_8 \times T_8) + (W_9 \times T_9) + (W_{10} \times T_{10})$$

Maka luas area nya adalah :

$$\text{Luas area} = (W_1 \times T_1) + (W_2 \times T_2) + (W_3 \times T_3) + (W_4 \times T_4) + (W_5 \times T_5) + (W_6 \times T_6) + (W_7 \times T_7) + (W_8 \times T_8) + (W_9 \times T_9) + (W_{10} \times T_{10})$$

$$\begin{aligned}
 &= (180 \times 89) + (170 \times 44) + (160 \times 22) + (150 \times 17) + (140 \times 13) + (130 \\
 &\quad \times 11) + (120 \times 10) + (110 \times 8) + (100 \times 7) + (80 \times 12) \\
 &= 36560 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_i &= (\text{Luas Area} \times 0.95) / 10^6 \\
 &= (36560 \times 0.95) / 10^6 \\
 &= 0.034732 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (2.20), kerapatan fluks inti besi yaitu :

$$\begin{aligned}
 B_m &= \frac{V_t}{4.44 \times f \times A_i} \\
 &= \frac{10,49 \text{ Volt}}{4.44 \times 50 \times 0.034732 \text{ mm}^2} \\
 &= 1.36 \text{ Tesla}
 \end{aligned}$$

Dimana:

B_m = Kerapatan fluks inti besi (Tesla)

V_t = Tegangan per lilitan (Volt)

F = Frekuensi (50 Hz)

A_i = Luas inti besi murni (mm^2)

4.2.7.2. Kerapatan Fluks Inti Besi Trafo *Winding* Aluminium

Tabel 4.7. Lebar dan Tebal Plat Inti Besi (trafo *winding* Al-Al)

No.	W (lebar)	Y (tebal tumpukan)	T
Dalam satuan mm			
1	180	94	94
2	160	160	66
3	140	190	30
4	120	211	21
5	100	226	15
MF_e		923.9 kg	

Rumus luas area:

$$\text{Luas area} = (W_1 \times T_1) + (W_2 \times T_2) + (W_3 \times T_3) + (W_4 \times T_4) + (W_5 \times T_5)$$

Maka luas area nya adalah :

$$\begin{aligned} \text{Luas area} &= (W_1 \times T_1) + (W_2 \times T_2) + (W_3 \times T_3) + (W_4 \times T_4) + (W_5 \times T_5) \\ &= (180 \times 94) + (160 \times 66) + (140 \times 30) + (120 \times 21) + (100 \times 15) \\ &= 35700 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_i &= (\text{Luas Area} \times 0.95) / 10^6 \\ &= (35700 \times 0.95) / 10^6 \\ &= 0.033915 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (2.20), kerapatan fluks inti besi transformator *winding* aluminium yaitu :

$$\begin{aligned} B_m &= \frac{V_t}{4.44 \times f \times A_i} \\ &= \frac{10,04 \text{ Volt}}{4.44 \times 50 \times 0.033915 \text{ mm}^2} \\ &= 1.33 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan kerapatan fluks inti besi transformator dapat diketahui bahwa semakin besar nilai kerapatan inti besi maka penampang kumparan intinya semakin kecil untuk kapasitas transformator yang sama besar.

4.2.8. Rugi - Rugi Besi

Rugi-rugi besi adalah rugi yang terjadi pada bagian inti besi transformator. Untuk mengetahui nilai rugi-rugi besi selain dengan perhitungan dapat juga dilakukan dengan pengujian transformator tanpa beban.

Tabel 4.8. Data Rugi-Rugi Inti Besi

Data	400 kVA <i>Winding</i> Cu-Cu	400 kVA <i>Winding</i> Al-Al	Keterangan
Rugi inti besi	581 Watt	607 Watt	Hasil Perhitungan
	576 Watt	610 Watt	Hasil Pengujian

4.2.8.1. Rugi - Rugi Besi Trafo *Winding* Cu-Cu

Berdasarkan persamaan (2.21) rugi-rugi besi transformator yaitu :

$$\begin{aligned}
 WF_e &= MF_e \times W_b \times k \\
 &= 762,4 \text{ kg} \times 0,66 \text{ Watt/kg} \times k \\
 &= 503,18 \times 1,1546 \\
 &= 580,97 \text{ Watt} \approx 581 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Dimana,

Mf_e = Berat netto inti besi (Kg)

W_b = Rugi -rugi inti per satuan berat (Watt/Kg)

Tabel 4.9. Nilai W_B Terhadap Kerapatan Fluks Inti Besi

W_B (Watt/kg)	0,6	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7
B_m (Tesla)	1.3	1.31	1.32	1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39	1,4

k = 1,1546 (nilai konstanta rugi-rugi besi yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA *winding* tembaga oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)

4.2.8.2. Rugi - Rugi Besi Trafo *Winding* Al-Al

Berdasarkan persamaan (2.21) rugi-rugi besi transformator yaitu :

$$\begin{aligned}
 W_{Fe} &= M_{Fe} \times W_b \times k \\
 &= 923.9 \text{ kg} \times 0.63 \text{ Watt/kg} \times k \\
 &= 582,05 \times 1,0427 \\
 &= 606,91 \text{ Watt} \approx 607 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

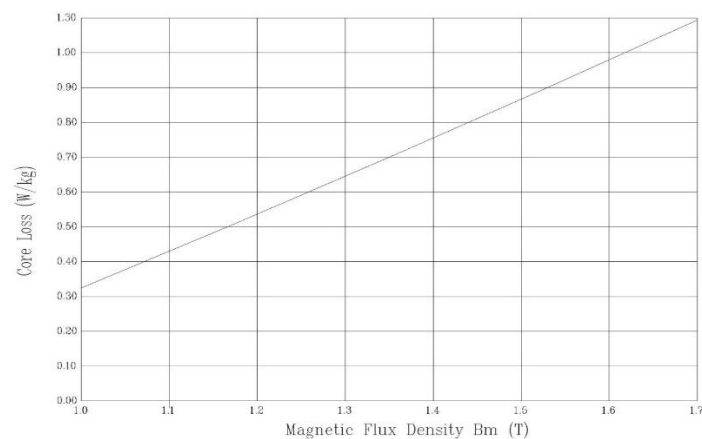
Dimana,

M_{fe} = Berat netto inti besi (Kg)

W_b = Rugi -rugi inti per satuan berat (Watt/Kg)

k = 1,1546 (nilai konstanta rugi-rugi besi yang diperoleh dari data desain pabrikan, didapatkan dari kalkulasi hasil percobaan test desain prototipe transformator kapasitas 400 kVA *winding* alumunium oleh PT.Trafoindo Prima Perkasa)

Dari hasil perhitungan rugi-rugi inti besi diketahui bahwa rugi inti besi pada transformator *winding* alumunium lebih besar dibanding dengan transformator *winding* tembaga, hal ini dipengaruhi oleh berat netto inti besi dan nilai W_b . Nilai W_b adalah Rugi -rugi inti per satuan berat (Watt/Kg) dimana berasal dari kerapatan fluks inti besi (B_m). Sedangkan berat netto inti besi adalah berat total dari inti besi yang terpasang pada transformator. Nilai W_B mempengaruhi nilai rugi-rugi besi. Nilai W_B di pengaruhi oleh nilai kerapatan fluks inti besi sesuai dengan karakteristik masing-masing jenis inti besi (lihat tabel 2.7).



Gambar 4.5. Grafik Nilai *Core Loss* dengan Nilai B_m

4.2.9. Total Rugi-Rugi Pada Transformator

Nilai total rugi-rugi transformator ini adalah gabungan antara rugi-rugi kumparan yang dijumlahkan dengan rugi inti besi. Berdasarkan perhitungan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.10. Rugi-rugi total transformator

<i>Losses</i>	400 kVA <i>Winding</i> Cu-Cu	400 kVA <i>Winding</i> Al-Al
Rugi – rugi inti besi	581 Watt	607 Watt
Rugi kumparan primer	2382 watt	2172 watt
Rugi kumparan sekunder	1486 watt	1586 watt
Total Rugi-rugi transformator	4449 Watt	4365 Watt

Dari tabel 4.10. diatas dapat diketahui bahwa nilai rugi-rugi daya pada transformator *winding* tembaga lebih besar di banding dengan transformator *winding* alumunium.

Perbandingan rugi inti besi (W_{fe}) pada transformator *winding* Cu-Cu dengan transformator *winding* Al-Al = $\frac{581}{607} \times 100 \% = 95,71\%$.

Jadi W_{fe} pada transformator *winding* Cu-Cu 4,29% lebih rendah dari W_{fe} *winding* Al-Al. Semakin rendah rugi-rugi besi maka semakin baik kualitas transformator karena bisa mencegah terjadinya *over heating* pada inti besi.

Selanjutnya perbandingan rugi-rugi kumparan (W_{cu}) pada transformator *winding* Al-Al dengan transformator *winding* Cu-Cu = $\frac{3758}{3868} \times 100 \% = 97,15\%$.

Jadi rugi-rugi kumparan (W_{cu}) pada transformator *winding* Cu-Cu 2,85% lebih tinggi dari rugi-rugi kumparan (W_{cu}) *winding* Al-Al. Hal ini di pengaruhi oleh nilai resistan yang berbeda, dimana nilai resistan tersebut berasal dari perhitungan meliputi tahanan jenis, jumlah lilitan (N), keliling rata-rata kumparan (T) dan luas penampang konduktor (A). Tahanan jenis aluminium sebesar 0.035 Ω -mm sedangkan tahanan jenis tembaga sebesar 0.021 Ω -mm. Dengan mengacu rumus $W_{cu} = I^2 R$, maka semakin besar nilai R dengan nilai I konstan maka nilai W_{cu}

akan semakin besar. Nilai R berbanding terbalik dengan luas penampang (A), semakin kecil nilai R, maka luas penampangnya akan semakin besar. Hal ini terbukti bahwasanya luas penampang konduktor pada transformator *winding* Al-Al lebih besar dibandingkan dengan transformator *winding* Cu-Cu.

Lalu untuk mengetahui bagus atau tidaknya nilai rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator, nilai rugi-rugi tersebut dapat dibandingkan dengan standar SPLN D3.002-1:2007. Pada standar SPLN D3.002-1:2007 disebutkan bahwa nilai rugi-rugi total tidak boleh lebih dari 5% spesifikasi transformator.

Maka transformator dengan kapasitas 400 kVA spesifikasi rugi-rugi dayanya tidak boleh melebihi 5% dari rugi-rugi daya total berdasarkan ketentuan spesifikasi SPLN D3.002-1:2007. Dimana untuk transformator dengan kapasitas 400 kVA spesifikasi rugi-rugi dayanya adalah sebagai berikut:

- ❖ Rugi berbeban : 3850 Watt
- ❖ Rugi tanpa beban : 595 Watt
- ❖ Rugi total : 4445 Watt
- ❖ Batas rugi-rugi pada transformator yang diijinkan adalah maksimum 5% dari spesifikasi yang ditentukan.

$$\begin{aligned} \text{Maka } (5\% \times 4445) + 4445 & : 222,25 + 4445 \\ & : 4667,25 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Melihat data yang perhitungan maupun pengujian transformator kapasitas 400 kVA baik untuk transformator *winding* tembaga dan transformator *winding* aluminium jika dibandingkan dengan standar SPLN D3.002-1:2007 maka kedua transformator tersebut sama baiknya karena masih masuk dalam range spesifikasi yang ditentukan.

4.2.10. Reaktansi, Resistansi dan Impedansi

4.2.10.1. Reaktansi, Resistansi dan Impedansi Trafo *Winding* Cu-Cu

Berdasarkan data :

- ❖ $f = 50$ Hz, $V_p = 20$ kV, sesuai data (*tabel 4.1*)
- ❖ $I_p = 6,67$ A, sesuai perhitungan arus fasa sub-bagian (*4.2.1.1*)
- ❖ $N_1 = 1905$ lilitan, sesuai perhitungan sub-bagian (*4.2.2.1*)
- ❖ $S = 32819,39$ mm², sesuai data desain pabrik
- ❖ $\alpha = 286,83$ mm², sesuai data desain pabrik

Berdasarkan persamaan (2.26), maka reaktansi yaitu :

$$X = \left[\frac{8 \times f \times I_p \times N_1^2 \times S}{\alpha \times V_p} \right] \times 10^{-6}$$

$$X = \left[\frac{8 \times 50 \times 6,67 \times 1905^2 \times 32819,39}{286,83 \times 20000} \right] \times 10^{-6}$$

$$X = 4,10 \%$$

➤ Resistansi

Berdasarkan data :

- ❖ $W_{cu} = 3868$ Watt, sesuai perhitungan sub-bagian (*4.2.5.1*)
- ❖ Daya trafo = 400 kVA, sesuai data (*tabel 4.1*)

Berdasarkan persamaan (2.29), maka resistansi yaitu :

$$R = \frac{W_{cu}}{P \times 10^3} = \frac{3868}{400000} \times 100 \% = 0,96 \%$$

➤ Impedansi

Dari nilai X dan R, dan berdasarkan persamaan (2.30), impedansi :

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{4,10^2 + 0,96^2} = 3,98 \%$$

4.2.10.2. Reaktansi, Resistansi dan Impedansi Transformator *Winding Al-Al*

Berdasarkan data :

- ❖ $f = 50$ Hz, $V_p = 20$ kV, sesuai data (*tabel 4.2*)
- ❖ $I_p = 577,35$ A, sesuai perhitungan arus fasa sub-bagian (*4.2.1.2*)
- ❖ $N_1 = 1992$ lilitan, sesuai perhitungan sub-bagian (*4.2.2.2*)
- ❖ $S = 42371,04$ mm², sesuai data desain pabrik
- ❖ $\alpha = 523,17$ mm², sesuai data desain pabrik

Berdasarkan persamaan (2.26), maka reaktansi yaitu :

$$X = \left[\frac{8 \times f \times I_p \times N_1^2 \times S}{\alpha \times V_p} \right] \times 10^{-6}$$

$$X = \left[\frac{8 \times 50 \times 577,35 \times 1992^2 \times 42371,04}{523,17 \times 20000} \right] \times 10^{-6}$$

$$X = 4,28 \%$$

➤ Resistansi

Berdasarkan data :

- ❖ $W_{cu} = 3758$ Watt, sesuai perhitungan sub-bagian (*4.2.5.2*)
- ❖ Daya trafo = 400 kVA, sesuai data (*tabel 4.2*)

Berdasarkan persamaan (2.29), maka resistansi yaitu :

$$R = \frac{W_{cu}}{P \times 10^3} = \frac{3758}{400000} \times 100 \% = 0,94 \%$$

➤ Impedansi

Dari nilai X dan R, dan berdasarkan persamaan (2.30), impedansi :

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{4,28^2 + 0,94^2} = 3,78 \%$$

4.2.11. Efisiensi Transformator

Nilai efisiensi transformator merupakan perbandingan antara daya output dengan daya input tranformator. Nilai efisiensi garansi pabrikan tranformator di hitung berdasarkan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi besi disesuaikan dengan standard SPLN D3.002-1:2007.

4.2.11.1. Effisiensi Transformator *Winding* Cu-Cu

Berdasarkan data desain :

- ❖ Daya trafo = 400 kVA, sesuai data (*tabel 4.1*)
- ❖ Rugi-rugi besi (*Pfe*) = 581 Watt, sesuai data sub-bagian (*4.2.8.1*)
- ❖ Rugi-rugi tembaga (*Pcu*) = 3868 Watt,sesuai data sub-bagian (*4.2.5.1*)

Berdasarkan persamaan (*2.31*), maka nilai efisiensi transformator *winding* tembaga (Cu-Cu) yaitu :

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_{\text{fe}}} \times 100 \% \\ &= \frac{400 \times 10^3}{400 \times 10^3 + 3868 + 581} \times 100 \% \\ &= 98.89 \%\end{aligned}$$

4.2.11.2. Effisiensi Transformator *Winding* Al-Al

Berdasarkan data desain :

- ❖ Daya trafo = 400 kVA, sesuai data (*tabel 4.2*)
- ❖ Rugi-rugi besi (*Pfe*) = 607 Watt, sesuai data sub-bagian (*4.2.8.2*)
- ❖ Rugi-rugi tembaga (*Pcu*) = 3758 Watt,sesuai data sub-bagian (*4.2.5.2*)

Berdasarkan persamaan (*2.31*), maka nilai efisiensi transformator *winding* tembaga (Cu-Cu) yaitu :

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_{\text{fe}}} \times 100 \% \\ &= \frac{400 \times 10^3}{400 \times 10^3 + 3758 + 607} \times 100 \% \\ &= 98.92 \%\end{aligned}$$

Tabel 4.11. Reaktansi, resistensi, impedansi dan efisiensi transformator

Nilai	Transformator Cu-Cu	Transformator Al-Al
Reaktansi (X)	4,10 %	4,28 %
Resistensi (R)	0,96 %	0,94 %
Impedansi (Z)	3,98 %	3,78 %
Efisiensi (η)	98,89 %	98,92 %
Rugi-rugi (P-loss)	1,11 %	1,08%

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan bahwa pada transformator *winding* tembaga (Cu-Cu) dan transformator *winding* aluminium (Al-Al) besar rugi-rugi daya nya masih berada dibawah batas maksimum 5%. pada transformator *winding* tembaga (Cu-Cu) sebesar 1,11% dan transformator *winding* aluminium (Al-Al) sebesar 1,08% sesuai data pada tabel 4.11.