

ANALISA PERBANDINGAN TIPE WINDING CU-CU DENGAN TIPE Al-Al PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 3 FASA KAPASITAS 630 kVA TEGANNGAN 20 kV-400 V VECTOR GROUP DYN-5

Badaruddin, Ahmad Charis

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Mercu Buana Jakarta
bsulle@gmail.com

Abstrak

Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Bidang elektronika, transformator di gunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban, untuk memisahkan satu rangkaian dengan rangkaian yang lain. Penggunaan dalam bidang tenaga adalah sebagai penurun tegangan mulai dari sistem pembangkit ke sistem distribusi sampai ke pelanggan (konsumen).

Maksud dari pembahasan ini adalah untuk membandingkan penggunaan antara bahan kumparan tipe (Cu-Cu) dengan bahan kumparan berbahan (Al-Al) jika di lihat dari sisi desain elektrik, desain mekanik dan sisi ekonomis pada transformator distribusi 3 fasa, kapasitas dengan 630 kV, tegangan 20 kV-400 V, vector group Dyn-5. Perbedaan dari sisi desain elektrik meliputi kerapatan arus kumparan, berat kumparan dan dimensi kumparan (panjang, lebar, tinggi). Dari sisi mekanik perbedaan meliputi dimensi tangki transformator (panjang, lebar, tinggi). Dilihat dari sisi ekonomis, harga transformator berbahan kumparan tipe winding (Cu-Cu) lebih mahal dari pada bahan (Al-Al).

Dengan membandingkan pada penggunaan bahan konduktor kumparan yang berbeda, di harapkan dapat mendesain sebuah transformator secara optimal dengan mempertimbangkan rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga tanpa mengurangi kualitas kinerja transformator.

Kata Kunci : Tipe winding, Dimensi, Effisiensi

Abstrac

The transformer is used widely, both in electricity and electronics. The field of electronics, the transformer is used as the coupling impedance between the source and load, to separate one set of premises series of others. The use in the field of power is as lowering the voltage from the generating system to the distribution system to the customer (consumer).

The purpose of this discussion is to compare the use of coil material type (Cu-Cu) with coils made of material (Al-Al) when viewed from the side of the electrical design, mechanical design and economical side of distribution transformer 3 phase, with a capacity of 630 kV, voltage of 20 kV-400 V, vector group Dyn-5. Differences of the electrical design includes coil current density, weight and dimensions of the coil coil (length, width, height). From the mechanical side of the transformer tank differences include dimensions (length, width, height). Viewed from the economic side, price-based transformer coil winding type (Cu-Cu) is more expensive than the material (Al-Al).

By comparing the use of different coil conductor material, is expected to design a transformer in an optimal fashion by considering the iron loss and copper loss without reducing the quality of the performance of the transformer.

Keyword: Type of winding, Dimensions, Efficiency

1. Pendahuluan

Transformator merupakan alat listrik yang dapat memindah dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian

listrik ke rangkaian listrik yang lainnya berdasarkan prinsip induksi

elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Dalam bidang elektronika, transformator di gunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban, untuk memisahkan satu rangkaian dengan rangkain yang lain. Aplikasi dalam bidang tenaga adalah sebagai penurun tegangan mulai dari sistem pembangkit ke sistem distribusi sampai ke pelanggan (konsumen).

Untuk memperoleh suatu transformator daya yang mempunyai efisiensi yang tinggi di perlukan suatu perancangan desain yang lebih maksimal. Pada proses perancangan transformator ini di lakukan secara manual. Selain dengan perhitungan yang maksimal maka penggunaan material harus juga perlu di perhatikan. Ada 3 jenis konfigurasi material yang di gunakan pada kumparan pada transformator, yaitu dengan tembaga-tembaga (*Cu-Cu*), tembaga-aluminium (*Cu-Al*) dan aluminium-aluminium (*Al-Al*). Pada pembahasan ini adalah analisa perbandingan type winding material *Cu-Cu* dengan tipe winding material *Al-Al* pada transformator distribusi 3 fasa dengan kapasitas 630 kVA, tegangan 20 kV-400 V, vector group Dyn-5.

Setelah di desain secara maksimal dengan 2 jenis material yang berbeda antara *Cu-Cu* dengan *Al-Al* dan dengan losses yang sama maka akan di dapat beberapa perbedaan pada desainnya. Perbedaan ini terlihat pada :

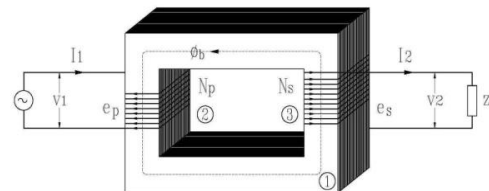
- 1.) Dimensi kumparan trafo baik primer dan sekunder (tinggi, diameter),
- 2.) Dimensi total trafo (panjang , lebar, tinggi),
- 3.) Berat material yang di gunakan pada kumparan, baik primer maupun sekunder .

2. Teori Penunjang

2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindah dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lainnya melalui suatu gandengan magnet berdasarkan prinsip induksi.

Bila kumparan primer di hubungkan dengan sumber arus bolak-balik (AC) yang amplitudonya bergantung pada tegangan primer dan jumlah lilitan, fluks bersama akan menghubungkan kumparan yang lain (kumparan sekunder), dan akan menginduksi tegangan di dalamnya yang nilainya tergantung pada jumlah lilitan sekunder. Dengan pertimbangan jumlah lilitan primer dan sekunder yang tepat, hampir semua perbandingan tegangan yang di inginkan atau perbandingan transformasi (ratio of transformasi) dapat di peroleh.



Gambar 1. Rangkain Dasar Trasformator

2.2 Jenis-Jenis Transformator

2.2.1 Berdasarkan Fungsinya

1. Transformator sebagai penurun tegangan (*Step Down*)
2. Transformator sebagai penaik tegangan (*Step Up*)

2.2.2 Berdasarkan Letak Kumparan

1. Core Type (Jenis Inti) yaitu kumparan mengelilingi inti.
2. Shell Type (Jenis Cangkang) yaitu inti mengelilingi kumparan.

2.2.3 Berdasarkan Bahan Kumparan

1. Tembaga (*Cu-Cu*)
2. Aluminium (*Al-Al*)

2.3 Kelompok Hubungan

1. Delta
2. Wye
3. Zig-zag

2.4 Tegangan Pengenal, Penyadapan, Frekuensi, Daya Pengenal

Tegangan primer di tetapkan sesuai dengan tegangan nominal sistem pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang berlaku di Indonesia , yaitu tegangan 20 kV :

- a. Transformator fasa tiga : 20 kV
- b. Transformator fasa tunggal
 - Sistem distribusi JTM 3 kawat : 20 kV
 - Sistem distribusi JTM 4 kawat : $20/\sqrt{3}$ kV

Tegangan di sesuaikan dengan nominal sistem pada jaringan tegangan rendah (JTR) yang berlaku di Indonesia 231 Volt (untuk sistem fase tunggal) dan 400/231 Volt (untuk sistem fase-tiga), yaitu : 231 Volt dan 400/231 Volt (pada keadaan tanpa beban). Ada 2 (dua) macam penyadapan tegangan tanpa beban pada transformator yaitu, sebagai berikut :

- a. Sadapan tanpa beban (STB) tiga langkah (21, 20, 19 kV).
- b. Sadapan tanpa beban lima langkah (22, 21, 20, 19, 18 kV).

Menurut standard SPLN 50:1997 frekuensi yang umum dipakai di sistem jaringan distribusi di Indoensia dan daya pengenal dan rugi-rugi transformator distribusi tiga fasa adalah seperti tabel di bawah ini.

Tabel 1. Daya Pengenal, Frekuensi dan Rugi-rugi

Daya (kVA)	Frekuensi (Hz)	Rugi Besi (Watt)	Rugi Belitan (Watt)
25	50	75	425
50	50	150	800
100	50	300	1600
160	50	400	2000
200	50	480	2500
250	50	600	3000
315	50	770	3900
400	50	930	4600
500	50	1100	5500
630	50	1300	6500
800	50	1750	9100
1000	50	2300	12100
1250	50	2500	15000
1600	50	3000	18100
2000	50	3600	21000
2500	50	4000	25000

2.5 Bagian-Bagian Transformator

2.5.1 Bagian Utama

1. Inti besi
Berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang di timbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan.
2. Kumparan
Kumparan terdiri dari kumparan primer dan sekunder
3. Minyak
Berfungsi sebagai media pendingin akibat transformator beroperasi. Minyak tersebut memindahkan panas (di sirkulasi) dan bersifat pula sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi).
4. Terminal
Untuk menghubungkan antara kumparan transformator ke jaringan luar.
5. Tangki
Merupakan tempat (wadah) dari bagian inti trafo yang di isi minyak transformator serta sebagai tempat bagian-bagian pelengkap lainnya.

2.5.2 Peralatan Bantu

1. Pendingin
Media yang di gunakan pada sistem pendingin pada transformator dapat berupa udara/gas, minyak, dan air. Sistem ini terdiri udara alamiah (*Air Natural*), Oli dan alamiah (*Oil Natural Air Natural*), tekanan / paksaan (*Oil Natural Air Forced*), dan kombinasi alamiah dan paksa (*ONAN/ONAF*).
2. Tap changer
Berfungsi untuk merubah tegangan sadapan untuk mendapatkan tegangan operasi ketika tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah.
3. Indikator-indikator
Berfungsi untuk memantau/mengontrol selama transformator beroperasi yang terdiri dari indikator level minyak, temperature minyak dan tekanan.

2.6 Rumus-Rumus Transformator

2.6.1 Bagian Sisi Elektrik

➤ Daya pengenal

$$P = VI\sqrt{3}$$

Dimana :

P = Daya pengenal transformator (kVA)

V = Tegangan line-line (Volt)

I = Arus untuk line-line (A)

➤ Angka transformasi

$$a = \frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1}$$

Dimana :

a = Angka transformasi

N1 = Jumlah belitan primer

N2 = Jumlah belitan sekunder

V1 = Tegangan primer (Volt)

V2 = Tegangan sekunder (Volt)

I1 = Arus kumparan primer (A)

I2 = Arus kumparan sekunder (A)

➤ Arus dan tegangan kumparan

Jika dihubungkan delta

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}V_L}$$

$$I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$V_L = \frac{P}{\sqrt{3}I_L}$$

$$V_p = V_L$$

Jika dihubungkan wye

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}V_L}$$

$$I_p = I_L$$

$$V_L = \frac{P}{\sqrt{3}I_L}$$

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

Dimana :

P = Daya pengenal (kVA)

I_L = Arus untuk line (A)

I_p = Arus untuk fasa (A)

V_L = Tegangan untuk line (

Volt)

V_p = Tegangan untuk fasa (

Volt)

➤ Jumlah belitan

$$N1 = \frac{V_p}{V_t}$$

$$N2 = \frac{V_s}{V_t}$$

Dimana :

N1 = Jumlah lilitan kumparan primer

N2 = Jumlah lilitan kumparan sekunder

V_p = Tegangan primer (Volt)

V_s = Tegangansekunder (Volt)

➤ Kerapatan arus

$$J_p = \frac{I_p}{A1}$$

$$J_s = \frac{I_s}{A2}$$

Dimana :

J_p = Kerapatan arus kumparan primer (A/mm²)

J_s =Kerapatan arus kumparan sekunder (A/mm²)

I_p = Arus fasa kumparan primer (A)

I_s = Arus fasa kumparan sekunder (A)

A1 = Luas penampang konduktor primer (mm²)

A2 = Luas penampang konduktor sekunder (mm²)

➤ Kerapatan fluks inti besi

$$B_m = \frac{V_t}{4.44 \times f \times A_i}$$

Dimana :

B_m = Kerapatan fluks inti besi (Tesla)

V_t = Tegangan per lilitan (Volt / turn)

f = Frekuensi

A_i = Luas inti besi murni (mm²)

➤ Rug-rugi inti besi

$$W_{F_e} = M_{F_e} W_B B_{f_e}$$

Dimana :

W_{F_e} = Rugi inti besi (Watt)

M_{F_e} = Berat total inti besi (kg)

W_B = Rugi inti / berat (Watt / kg)

B_{f_e} = Berat jenis silicone sheet inti besi

(7.65 x 10⁻⁶ kg/mm)

➤ Rugi-rugi tembaga

$$WC_u = (I_p^2 \times R_1) + (I_s^2 \times R_2)$$

Dimana untuk $R_1 = \frac{\rho_{cu} \times N1 \times T1}{A1}$

$R_2 = \frac{\rho_{cu} \times N2 \times T2}{A2}$

Dimana :

$WC_u =$ Rugi total tembaga (Watt)

)

$I_p =$ Arus fasa primer (A)

$I_s =$ Arus fasa sekunder (A)

$R_1 =$ Resistance kumparan

primer (Ω)

$R_2 =$ Resistance kumparan

sekunder (Ω)

$\rho_{cu} =$ Tahanan jenis bahan kumparan ($\mu\Omega m$)

$N1 =$ Jumlah lilitan kumparan

primer

$T1 =$ Keliling kumparan primer

(mm)

$T2 =$ Keliling kumparan

sekunder (mm)

$A1 =$ Luas penampang

konduktor

primer (mm^2)

$A2 =$ Luas penampang

konduktor

sekunder (mm^2)

➤ Impedansi

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}$$

Dimana :

$Z =$ Impedansi (%)

$X =$ Reaktansi (%)

$R =$ Resistansi (%)

➤ Panjang Tangki

$$P_T = 20 + 2W1 + 2A + D1 + \Delta I$$

Dimana :

$P_T =$ Panjang tangki (mm)

$W1 =$ Lebar inti besi yang terbesar (mm)

$A =$ Lebar jendela inti besi (mm)

$D1 =$ Diameter terluar kumparan / lebar kumparan (mm)

$\Delta I =$ Jarak terluar kumparan dengan plat pengikat inti besi (mm)

➤ Lebar Tangki

$$L_T = D2 + \Delta k$$

Dimana :

$L_T =$ Lebar tangki (mm)

$D2 =$ Diameter teluar kumparan / panjang kumparan (mm)

$\Delta k =$ Jarak terluar kumparan primer / sekunder terhadap plat tangki depan / belakang (mm)

➤ Tinggi tangki

$$H_T = 2W1 + 20 + H + \Delta h$$

Dimana :

$H_T =$ Tinggi tangki (mm)

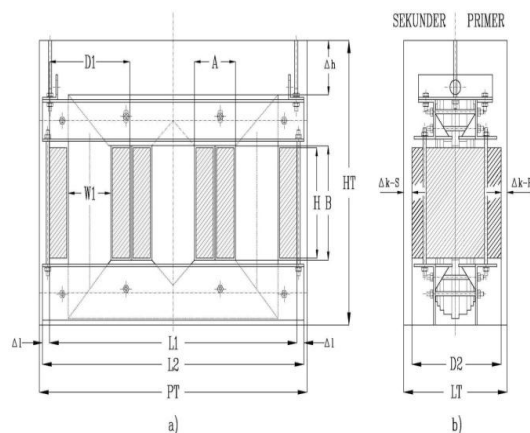
$W1 =$ Lebar inti besi yang terbesar (mm)

$B =$ Tinggi jendela inti besi (mm)

$H =$ Tinggi kumparan (mm)

$\Delta h =$ Jarak bebas dari inti besi ke tutup tangki (min 200 mm)

2.6.2 Bagian Sisi Mekanik



Gambar 2. Detail Dimensi Panjang, Lebar dan Tinggi Transformator

3. Data-Data

3.1 Data Utama Perancangan

Data-data utama perancangan traformator distribusi adalah seperti tabel di bawah ini.

Tabel 2. Data Utama Transformator

Data	Nilai
Rating daya	630 kVA
Fasa	3
Pendingin	ONAN
Frekuensi	50 Hz
Tegangan primer	20 kV
Tegangan sekunder	400 V
Tegangan sadapan	21-20.5-20-19.5-19 kV
Kelompok hubungan	Dyn-5
Tipe winding kumparan	Cu-Cu dan Al-Al

3.2 Data Hasil Perancangan

Tabel 3. Data Hasil Perhitungan Sisi Elektrik

Keterangan	Winding Cu-Cu	Winding Al-Al
Belitan sekunder	20 belitan	18 belitan
Kerapatan arus Prima dan sekunder	3.03A/mm ² 3.16A/mm ²	2.14A/mm ² 1.23A/mm ²
Panjang kumparan	361 mm	455 mm
Lebar kumparan	303 mm	326 mm
Tinggi kumparan	450 mm	490 mm
Kerapatan fluks inti besi	1.83 Tesla	1.79 Tesla
Rugi tembaga	7140 Watt	7080 Watt
Berat kumparan primer	172.48 kg	78.94 kg
Berat kumparan sekunder	123.69 kg	99.58 kg
Rugi besi (WFe)	1149.28 Watt	1291.51 Watt

Tabel 4. Data Hasil Perhitungan Sisi Mekanik

Keterangan	Winding Cu-Cu	Winding Al-Al
Panjang tangki	1040 mm	1100 mm
Lebar tangki	460 mm	520 mm
Tinggi tangki	1000 mm	1060 mm

4. Analisa Data

4.1 Ditinjau dari Sisi Elektrik

➤ Belitan sekunder

Jumlah belitan sekunder dibuat berbeda antara tipe winding *Cu-Cu* dengan *Al-Al* berbeda, karena jika dibuat sama, misalkan sama-sama 20 belitan, maka yang terjadi adalah rugi-rugi tembaga ($W_{cu} = 6500 \text{ Watt}$) SPLN 50 : 1997 yaitu melebihi 15 % dari spesifikasi yang di persyaratkan standard IEC-60076, karena jumlah belitan pada sekunder berhubungan dengan rumus perhitungan pada rugi-rugi tembaga.

➤ Kerapatan arus

Perbedaan kerapatan arus untuk kedua tipe winding tersebut di sebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah sebagai berikut :

- 1) Ukuran konduktor kumparan yang berbeda.
- 2) Standard nilai kerapatan arus pada kumparan yang berbeda.

Untuk tipe winding *Cu-Cu*, $A_1 = 3.46 \text{ mm}^2$ (ukuran konduktor = 2.1 mm), maka $J_p = 3.03 \text{ A/mm}^2$. Sedangkan pada tipe winding *Al-Al*, $A_1 = 4.9 \text{ A/mm}^2$ (ukuran konduktor = 1.4 x3.5 mm). $J_p = 2.1 \text{ A/mm}^2$. Maksimal standard pabrik, pada untuk tipe winding *Cu-Cu* untuk nilai kerapatan arus max 4.2 A/mm². Hal ini di sebabkan bahwa sifat bahan tembaga (*Cu-Cu*) yang tidak mudah menyerap panas dengan tahanan jenis = $0.0021 \times 10^{-3} \mu\Omega\text{m}$. Nilai tersebut lebih tinggi dari bahan aluminium (*Al-Al*) dengan pertimbangan pada saat tranformator di bebani kumparan tidak *over heating*, sehingga tranformator tetap aman beroperasi. Pada tipe *Al-Al* nilai kerapatan arus yang di ijinakan yaitu max 2.4 A/mm.

Parameter-parameter yang menyebabkan adanya perbedaan dimensi kumparan adalah :

1. Lebar dudukan kumparan yang berbeda
Lebar dudukan di hitung berdasarkan

dimensi plate inti besi yang erbesar di tambahkan spare agar kumparan bisa dimasukkan pada inti besi.

➤ Winding Cu-Cu

Di ketahui $W_1 = 160 \text{ mm}$, $Y_3 = 194 \text{ mm}$, maka dimensi dudukan lebar kumparan : 164 mm, panjang :198 mm.

➤ Winding Al-Al

Di ketahui $W_1 = 160 \text{ mm}$, $Y_3 = 220 \text{ mm}$, maka dimensi dudukan lebar kumparan = 164 mm, panjang = 226 mm.

2. Tebal material konduktor kumparan

➤ Winding Cu-Cu

Konduktor pada sisi primer (*PVF*) :

2.1 mm, sekunder (*Sheet*) : 0.7 x 410 mm.

- Winding Al-Al
Konduktor pada sisi primer (Flat) :
1.4 x 3.5 mm, sekunder (Sheet) :
(0.8 x 460 mm) 2 .
- 3. Tinggi material konduktor kumparan
Diketahui dari tinggi material konduktor kumparan yang digunakan. Tipe winding Al-Al : 460 mm, sedangkan Cu-Cu : 410 mm.
- 4. Gap oli
Seperti pada (gambar 3.) gap oli antara sekunder-sekunder dan sekunder-primer merupakan salah satu pengaruh besarnya dimensi kumparan total.
 - Winding Cu-Cu
Gap oli sekunder-sekunder :5 mm, sekunder-primer :5 mm, primer-primer : 5 mm.
 - Winding Al-Al
Gap oli sekunder-sekunder : 10 mm, sekunder-primer : 5mm, primer-primer : 10 mm.

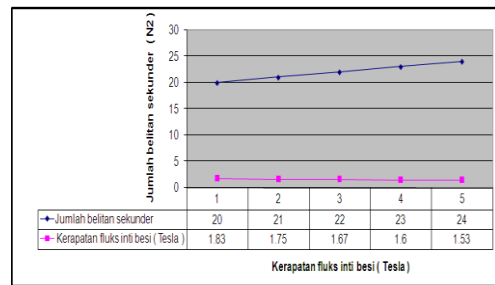
Menurut penjelasan diatas, pada tipe winding Al-Al dimensi memang lebih besar dari pada tipe winding Cu-Cu, akan tetapi kalau dilihat dari sisi berat total konduktor kumparan baik primer maupun sekunder justru sebaliknya lebih berat pada tipe winding Cu-Cu.

- a) Winding Cu-Cu
Berat kumparan primer = 172.48 kg, sekunder = 123.69 kg
- b) Winding Al-Al
Berat kumparan primer = 78.94 kg, sekunder = 99.58 kg

➤ Kerapatan fluks inti besi

Sesuai rumus $B_m = \frac{V_t}{4.44 \times f \times A_i}$ bahwa besar kecilnya nilai kerapatan fluks di pengaruhi :

- 1) Jumlah belitan sekunder
Semakin besar jumlah belitan sekunder, maka nilai kerapatan fluks inti besi juga semakin kecil,
- 2) Luas inti besi murni
Semakin besar luas inti besi murni (A_i), maka nilai kerapatan fluks inti besi juga semakin kecil, misalnya pada tipe winding Cu-Cu diketahui data $W_1 = 160$ mm, $W_2 = 140$ mm, $W_3 = 120$ mm, $Y_1 = 154$ mm, $Y_2 = 174$ mm, $Y_3 = 194$ mm, maka $A_i = 0.02834$ mm²



Gambar 3. Grafik Kerapatan Fluks Inti Besi yang Dipengaruhi oleh Jumlah Belitan Sekunder

➤ Rugi-Rugi Tembaga

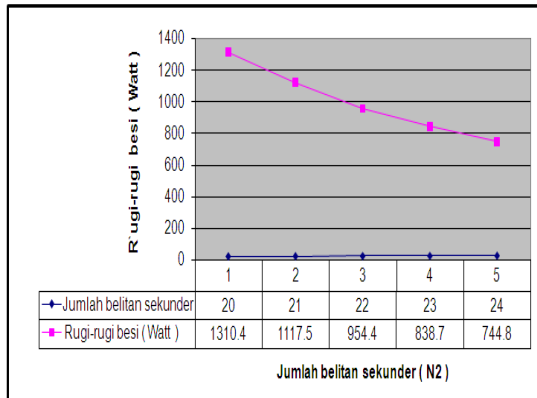
Nilai rugi-rugi tembaga (W_{cu}) hasil perhitungan telah memenuhi spesifikasi standard IEC-60076, yaitu toleransi untuk rugi-rugi tembaga = + 15 % dari spesifikasi. Perhitungan rugi-rugi tembaga pada bab-111 di peroleh sebagai berikut:

- a) Winding Cu-Cu = 7140 Watt
(spesifikasi = 6500 Watt),
Prosentase hasil perhitungan yaitu + 9.8 % (Max + 15 %)
- b) Winding Al-Al = 7080 Watt
(spesifikasi = 6500 Watt),
Prosentase hasil perhitungan yaitu + 8.9 % (Max + 15 %)

Hal-hal apa saja yang dapat mengatur besar kecilnya rugi-rugi tembaga dalam perhitungan diantaranya adalah jumlah belitan sekunder, luas penampang konduktor dan kerapatan arus kumparan.

➤ Rugi-Rugi Besi

Nilai rugi-rugi tembaga (W_{Fe}) hasil perhitungan telah memenuhi spesifikasi standard IEC-60076, yaitu melibih (+ 15 %) dari spesifikasi. Tipe winding Cu-Cu, di peroleh 1149.28 Watt (- 11.59 %), sedangkan tipe winding Al-AL di peroleh = 1291.51 Watt (+ 9.9 %). Nilai rugi-rugi besi juga di pengaruhi oleh jumlah belitan sekunder, pada grafik di bawah menunjukkan, semakin besar jumlah belitan sekunder, maka semakin kecil nilai rugi-rugi besi (Watt) yang di peroleh. Nilai-niali jumlah belitan sekunder dimulai dari 20, 21, 22, 23, 24 belitan.



Gambar 4 Grafik Rugi-Rugi Besi yang Dipengaruhi oleh Jumlah Belitan Sekunder

4.2 Ditinjau dari Sisi Mekanik

Dimensi tangki transformator akan menyesuaikan dari dimensi rangkaian elektrik dari transformator itu sendiri, yaitu mengacu pada dimensi kumparan, baik dalam menentukan panjang, lebar dan tinggi tangki.

➤ Panjang tangki

Panjang tangki transformator berpedoman pada lebar kumparan. Di ketahui tipe winding *Al-Al* dimensi panjang lebih besar (1100 mm) dari pada tipe winding *Cu-Cu* yang hanya (1040 mm) di karenakan lebar total kumparan lebih besar pada tipe *Al-Al*, yaitu 326 mm, sedangkan pada tipe *Cu-Cu* hanya 303 mm.

➤ Lebar tangki

Sama halnya dalam menentukan panjang tangki, lebar tangki juga berpedoman pada panjang kumparan total. Diketahui tipe winding *Al-Al* dimensi lebar lebih besar (520 mm) dari pada tipe winding *Cu-Cu* yang hanya (460 mm) di karenakan panjang total kumparan lebih besar pada tipe *Al-Al*, yaitu mencapai 455 mm, sedangkan pada tipe *Cu-Cu* hanya 361 mm.

➤ Tinggi tangki

Dengan mengacu pada rumus tinggi tangki pada tipe winding *Al-Al* lebih besar dari pada tipe winding *Cu-Cu* di karenakan tinggi kumparannya lebih besar, yaitu mencapai 490 mm, sedangkan pada tipe winding *Cu-Cu* hanya 450 mm.

4.3 Ditinjau dari Sisi Harga Bahan Konduktor Sesuai Berat Kumparan

Harga bahan konduktor kumparan dihitung berdasarkan berat kumparan pada sisi primer dan sisi sekunder. Berat masing-masing kumparan di tunjukkan seperti pada tabel di bawah ini.

Keterangan	Winding Cu-Cu	Winding Al-Al
Kumparan primer	Berat = 172.48 kg Cost = 1274.62 \$ (PVF)	Berat = 78.94 kg Cost = 489.426 \$ (Flat)
Kumparan sekunder	Berat = 123.69 kg Cost = 672.8736 (Sheet)	Berat = 99.58 kg Cost = 99.58 \$ (Sheet)

Tabel 5. Total Harga Bahan Konduktor Sesuai Berat Kumparan

Harga bahan konduktor diatas di ambil berdasarkan sumber di departemen PPIC (*Planning Product Inventory Control*) di PT. Trafoindo Prima Perkasa.

➤ Bahan konduktor Tembaga (Cu-Cu)

Tipe Pvf (bulat) = 7.39 \$ / kg

Tipe Flat (kotak) = 8.19 \$ / kg

Tipe Sheet (lembaran) = 5.44 \$ / kg

➤ Bahan konduktor aluminium (Al-Al)

Tipe Pvf (bulat) = 4.49 \$ / kg

Tipe Flat (kotak) = 6.20 \$ / kg

Tipe Sheet (lembaran) = 1.00 \$ / kg

Harga diatas bisa berubah-ubah sesuai perubahan rupiah terhadap dollar, karena bahan-bahan merupakan bahan import dari luar negeri. Jadi dari sisi harga transformator dengan tipe winding *Cu-Cu* lebih mahal dari pada tipe winding *Al-Al*.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Sesuai data-data hasil perhitungan dan analisa dapat di simpulkan sebagai berikut :

- 1) Dimensi kumparan pada transformator berbahan konduktor aluminium (*Al-Al*) lebih besar dari pada berbahan tembaga (*Cu-Cu*).
- 2) Dimensi secara keseluruhan transformator baik panjang, lebar dan tinggi untuk tipe winding berbahan *Al-Al* lebih besar dari pada *Cu-Cu* di karenakan dimensi mekanik dari suatu transformator menyesuaikan dengan dimensi elektrik terutama pada dimensi kumparan.
- 3) Berat bahan konduktor kumparan berbahan tembaga (*Cu-Cu*) lebih besar dari pada bahan aluminium (*Al-Al*), karena tidak melihat berdasarkan besarnya dimensi kumparan melainkan berat jenis bahan.
- 4) Ditinjau dari sisi harga, maka harga transformator secara keseluruhan yang berbahan winding (kumparan) *Cu-Cu* lebih mahal dari bahan konduktor *Al-Al*.

5.2 Saran

Transformator baik berbahan winding *Cu-Cu* dengan berbahan *Al-Al* dari sisi kemampuan elektrisitas adalah sama, karena standard pabrikan transformator sudah meentukan garansi *load losses* baik pada rugi-rugi besi (*W_{fe}*) maupaun rugi-rugi tembaga (*W_{cu}*).

4) **A. C. Franklin, CEng, FIEE, D. P. Franklin, Bsc, CEng, MIEE** “*J & P Transformer Book*” TK2792.F24, London, 1983.

5) **K. Karsai D. Sc, D. Kerenyi D.Sc** “*Large Power Transformers*” ELSEVIER Amsterdam- Oxford New York – Tokyo 1987.

6) **Theodore Wildi, Professor Emeritus**, Laval University “*Electrical Machines, Drives, And Power Systems Sixth Edition*” Pearson Education International.

Daftar Pustaka

- 1) **IEC-6076-1** Standard, Edition 2 : 1993 Consolidated with Amendment 1 : 1999 “*Power Transformers*”
- 2) **Standard Umum Perusahaan Listrik Negara** “*Spesifikasi Transformator Distribusi*” SPLN 50-1997.
- 3) **Zuhal**, “*Dasar Tenaga Listrik*”, Insitut Teknologi Bandung, 1991.