

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Metode Penyeimbangan Beban Trafo Distribusi 3 Fasa**

Dalam penyeimbangan beban trafo distribusi 3 fasa terdapat dua metode penerapan yaitu metode SBS (Seimbang Beban Sehari) dan metode satu titik/dua titik waktu. Penyeimbangan beban dengan metode SBS adalah metode penyeimbangan beban yang dalam perancangannya sudah mempertimbangkan tingkat keseimbangan yang akan dicapai dalam rentang waktu 24 jam/sehari penuh untuk menurunkan nilai arus netral secara optimal. Dalam pengukuran sebelum dan sesudah beban diseimbangkan harus melakukan pengukuran beban selama rentang waktu 24 jam/sehari dengan tetap menggunakan metode SBS. Alat ukur yang digunakan pada metode ini disebut *power logger*, sebuah alat yang bisa mengukur beban/ampere dan merekam hasil dari waktu ke waktu secara periodik. Pemasangan alat ukur *power logger* dilakukan pada masing-masing jurusan pada trafo distribusi yang akan diukur. Alat ini akan merecord atau merekam data pengukuran beban trafo distribusi bagian PHB (Panel Hubung Bagi) selama 24 jam dan bisa diatur *record* setiap 1 jam atau 30 menit. Saat sebelum proses penyeimbangannya perlu melihat jenis kelompok pelanggan pada topologinya untuk melihat arus mana yang paling besar dari R S T yang akan dipindahkan. Pengukuran dan penyeimbangan beban dengan metode SBS jarang digunakan karena keterbatasan peralatan tersebut pada unit pelayanan jaringan.

Metode yang digunakan dalam penyeimbangan beban trafo distribusi adalah metode penyeimbangan beban berdasarkan satu titik waktu atau dua titik waktu. Metode yang dilakukan dengan mengambil sampel salah satu atau keduanya dari WBP (Waktu Beban Puncak) dan LWBP (Luar Waktu Beba Puncak) merupakan metode penyeimbangan beban yang biasa digunakan pelayanan area rayon. Prosesnya pada jurusan penyulang tegangan rendah diukur dengan tang ampere beban tiap fasanya pada saat beban puncak dan luar beban puncak. Hasil pengukuran beban ini digunakan sebagai dasar penentuan besar beban yang akan dipindah dari fasa dengan beban tinggi ke fasa dengan beban

yang lebih rendah. Pada pelaksanaan penyeimbangan beban dilapangan dengan menggunakan metode WBP dan LWBP atau salah satunya dilakukan beberapa langkah dengan urutan sebagai berikut :

- a. Mengukur besarnya beban/ampere per fasa pada waktu beban puncak dan luar waktu beban puncak atau salah satunya di PHB TR. Pada PHB TR besaran yang diukur adalah arus beban, tegangan, arus ground, faktor daya dan tahanan tanah.
- b. Menghitung nilai rata – rata dari besarnya ampere ketiga fasa R – S – T waktu beban puncak untuk menentukan nilai beban/ampere yang akan dituju sebagai acuan nilai ideal kondisi optimal seimbang.
- c. Ketika hasil rata-rata besar ampere ketiga fasa telah diperoleh, selanjutnya menentukan fasa mana yang akan dikurangi atau ditambah bebannya beserta nilai ampere waktu beban puncak yang harus dipindahkan.
- d. Ditentukannya Ditentukan suatu nilai kesetaraan tertentu antara besarnya daya tersambung pelanggan dengan ampere yang dipergunakan pada waktu beban puncak dan bersifat kondisional.
- e. Menentukan atau mencari beberapa pelanggan yang akan dipindahkan yang amperenya bisa mewakili sejumlah nilai ampere waktu beban puncak yang harus dipindahkan.

#### **4.2 Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu**

Jaringan distribusi PT PLN (Persero) Rayon Sedayu disulang oleh 9 *feeder* yang berasal dari tiga gardu induk, yaitu Gardu Induk Bantul, Gardu Induk Godean dan Gardu Induk Wirobrajan. Gardu induk Bantul memiliki tiga buah transformator tenaga dengan kapasitas daya ketiganya 60 MVA dan Gardu Induk Godean memiliki dua buah transformator tenaga dengan kapasitas daya masing-masing 30 MVA dan 60 MVA serta Gardu Induk Wirobrajan memiliki dua buah transformator tenaga dengan kapasitas keduanya 60 MVA. Panjang jaringan tegangan menengah (JTM) di PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu terdapat 477 kms,

sedangkan untuk panjang jaringan tegangan rendah (JTR) mencapai 681,39 kms yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik sebanyak 140.861 pelanggan per Februari 2019. *Single line diagram feeder 20 kV* di PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu dapat dilihat pada Lampiran 1.

Berdasarkan data rekapitulasi formulir 12 C edaran 060/PST/1976 tanggal 1 Desember 1976 Triwulan Februari 2019 PT.PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah & Yogyakarta, panjang jaringan tegangan rendah SUTR pada area yang dilayani di Rayon Sedayu adalah sebagai berikut :

- a. Godean 1 : panjang jaringan 71,26 kms
- b. Godean 2 : panjang jaringan 167,43 kms
- c. Godean 3 : panjang jaringan 56,12 kms
- d. Godean 4 : panjang jaringan 197,28 kms
- e. Godean 5 : panjang jaringan 27,67 kms
- f. Godean 6 : panjang jaringan 18,13 kms
- g. Bantul 1 : panjang jaringan 5,22 kms
- h. Bantul 8 : panjang jaringan 106,69 kms
- i. Wirobrajan 6 : panjang jaringan 31,60 kms

Berdasarkan topologi trafo distribusi yang dimiliki oleh PT PLN (Persero) Area Yogyakarta berikut adalah Tabel 4.1 yang menunjukkan daya dan jumlah trafo distribusi 3 fasa yang terpasang di Rayon Sedayu

Tabel 4.1 Daya dan jumlah trafo 3 fasa di Rayon Sedayu

No.	Daya (kVA)	Jumlah (Unit)
1.	25	3
2.	50	130
3.	100	96
4.	160	49
5.	200	34
6.	315	2
7.	400	2

8.	500	1
9.	630	1

Jumlah rata - rata pelanggan 1 unit trafo distribusi 50 kVA adalah 66 pelanggan, trafo 100 kVA memiliki jumlah pelanggan 119, trafo 160 kVA memiliki jumlah pelanggan 178, trafo 200 kVA memiliki jumlah pelanggan 218, trafo distribusi 315 kVA adalah 344 pelanggan, trafo 400 kVA memiliki jumlah pelanggan 439 , trafo 500 kVA memiliki jumlah pelanggan 541 dan trafo 630 kVA memiliki jumlah pelanggan 680.

### 4.3 Data Teknis Transformator

Dalam melakukan penelitian ini hasil pengukuran beban yang dilakukan saat WBP dengan asumsi nilai konstan dan diambil sampel 2 unit transformator distribusi 3 phase yang berada di wilayah kerja PT. PLN (Persero) Rayon Sedayu. Berikut ini adalah data teknis dari kedua transformator :

#### 4.3.1 Transformator Distribusi 1503115



Gambar 4.1 Gardu distribusi 1503115

Transformator Distribusi 1503115 adalah transformator distribusi 3 phase yang terletak di Jl. Rakahino, Gunung Sempu, Desa Bangunjiwo, Kecamatan Kasihan, Bantul dengan nomor gardu 1503115 dan nomor tiang S1-36/52I seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Jaringan pelayanan

transformator 1503115 ini melayani pelanggan umum dengan jenis beban rumah tangga dan masjid yang menggunakan tegangan 1 phase Transformator 1503115 menerima supply energi listrik dari penyulang 20 kV Bantul 8 (BNL-8) yang berasal dari Trafo 3 Gardu Induk Bantul yang memiliki kapasitas daya sebesar 60 MVA. Pada Tabel 4.2 adalah data teknis yang dilihat dari nameplate yang tertera pada transformator 1503115 :

Tabel 4.2 Spesifikasi Transformator 1503115

No.	Nameplate	Keterangan
1	Produsen / merk	B&D
2	Standart pembuatan	SPLN D3.002-1 : 2007
3	Jumlah phase / frekuensi	3 / 50 Hz
4	Daya pengenalan	160 kVA
5	Hubungan	YN – yn0
6	Tegangan pengenalan	18000 - 21000 V / 400 V
7	Arus pengenalan	4,619 A / 230,940 A
8	Tegangan hubung singkat	4,0 %
9	Rugi tanpa beban / berbeban	300 W / 2000 W
10	Bahan belitan primer – sekunder	AL - AL
11	Jenis minyak	Mineral
12	Pendinginan	ONAN
13	Kenaikan suhu minyak / kumparan	50 °C / 55 °C
14	Tingkat isolasi dasar	125 kV
15	Volume minyak	339 L
16	Berat total	1160 kg

Transformator 1503115 memiliki kemampuan pelayanan daya 160 kVA dan tegangan pengenalan antara 18 kV – 21 kV untuk sisi primer dan 400 V untuk sisi sekunder dengan 7 buah tap changer. Belitan trafo menggunakan hubungan Y – Y dengan vektor grup YNyn0 yang menunjukkan tidak ada pergeseran sudut phase antara tegangan primer dan tegangan sekunder. Pendinginan trafo menggunakan media minyak jenis mineral dengan sistem ONAN (Oil Natural Air Natural).

### 4.3.2 Transformator Distribusi 1411671019



Gambar 4.2 Gardu distribusi 1411671019

Transformator Distribusi 1411671019 adalah transformator distribusi 3 phase yang terletak di Jl. Jambon Dukuh Baturan, Desa Trihanggo, Kecamatan Tegalrejo, Sleman dengan nomor gardu 1411671019 dan nomor tiang U2-166Z/7 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 Jaringan pelayanan transformator 1411671019 ini melayani pelanggan umum dengan jenis beban rumah tangga dan toko yang menggunakan tegangan 1 phase dan terdapat juga beberapa sekolah dan PDAM yang menggunakan tegangan 3 phase. Transformator 1411671019 menerima supply energi listrik dari penyulang 20 kV Godean 5 (GDN-5) yang berasal dari Trafo 1 Gardu Induk Godean yang memiliki kapasitas daya sebesar 30 MVA. Pada Tabel 4.3 adalah data teknis yang dilihat dari nameplate yang tertera pada transformator 1411671019 :

Tabel 4.3 Spesifikasi Transformator 1411671019

No.	Nameplate	Keterangan
1	Produsen / merk	Starlite
2	Standart pembuatan	SPLN D3.002-1 : 2007
3	Jumlah phase / frekuensi	3 / 50 Hz
4	Daya pengenal	200 kVA
5	Hubungan	YN – yn0
6	Tegangan pengenal	18000 - 21000 V / 400 V
7	Arus pengenal	5,77 A / 288,6 A
8	Tegangan hubung singkat	4,0 %

9	Rugi tanpa beban / berbeban	355 W / 2350 W
10	Bahan belitan primer – sekunder	AL - AL
11	Jenis minyak	Mineral
12	Pendinginan	ONAN
13	Kenaikan suhu minyak / kumparan	50 °C / 55 °C
14	Tingkat isolasi dasar	125 kV
15	Volume minyak	438 L
16	Berat total	1750 kg

Transformator 1411671019 memiliki kemampuan pelayanan daya 200 kVA dan tegangan pengenalan antara 18 kV – 21 kV untuk sisi primer dan 400 V untuk sisi sekunder dengan 7 buah tap changer. Belitan trafo menggunakan hubungan Y – Y dengan vektor grup YNyn0 yang menunjukkan tidak ada pergeseran sudut phase antara tegangan primer dan tegangan sekunder. Pendinginan trafo menggunakan media minyak jenis mineral dengan sistem ONAN (Oil Natural Air Natural).

#### 4.4 Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Transformator

##### 4.4.1. Jenis Penghantar

Jaringan pelayanan kedua transformator distribusi 3 phase yang digunakan sebagai penelitian semuanya menggunakan saluran udara tegangan rendah (SUTR) dengan jenis penghantar NFA2X-T / LVTC (Low Voltage Twisted Cable) dengan luas penampang 70 mm<sup>2</sup> untuk penghantar phase dan 50 mm<sup>2</sup> untuk penghantar netral. Kapasitas maksimum kuat hantar arus penghantar *phase* berdiameter 70 mm<sup>2</sup> pada suhu 35 °C yaitu 196 A per *phase* dengan resistansi kabel 0,433 Ω / km dan penghantar netral berdiameter 50 mm<sup>2</sup> memiliki resistansi 0,690 Ω / km pada suhu 20 °C sesuai dengan karakteristik listrik dari NFA2X-T menurut SPLN 42 – 10 : 1993 pada tabel 4.5 dibawah ini :

Tabel 4.4 Karakteristik Elektris NFA2X-T

<i>Size of Cable</i>	<i>Phase</i>		<i>Neutral</i>
	<i>Maximum DC Conductor Resistance at 20 °C</i>	<i>Maximum Current Carrying Capacity in Air at 35 °C</i>	<i>Maximum DC Conductor Resistance at 20 °C</i>
mm <sup>2</sup>	ohm / km	A	ohm / km
2 x 25 + 1 x 25	1,200	130	1,380
2 x 35 + 1 x 25	0,868	125	1,380
2 x 50 + 1 x 35	0,641	154	0,986
2 x 70 + 1 x 50	0,433	196	0,690
2 x 95 + 1 x 70	0,320	242	0,450
3 x 25 + 1 x 25	1,200	242	1,380
3 x 35 + 1 x 25	0,868	125	1,380
3 x 50 + 1 x 35	0,641	154	0,986
3 x 70 + 1 x 50	0,433	196	0,690
3 x 95 + 1 x 70	0,320	242	0,450

#### 4.4.2 Panjang Penghantar

Pengukuran panjang penghantar jaringan pelayanan transformator distribusi dilakukan dengan mengukur jarak antara transformator dengan tiang terakhir (dead end/end pole) menggunakan roll meter. Prosedur menghitung secara bertahap antar tiang dan berdasar pada Buku 1 PLN Kriteria Disain Enjinerig Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik dengan asumsi jarak antar gawang luar kota maksimum 50 meter, yang kemudian hasil ukurnya dikalikan 1,03 untuk memperhitungkan andongan (panjang lenturan) penghantar antar tiang. Berikut adalah hasil pengukuran panjang penghantar dari kedua transformator :

##### 4.4.2.1 Transformator 1503115

Tabel 4.5 Jaringan Pelayanan Transformator 1503115

Jalur	No. Tiang	Panjang
Line A	1-2	46 meter
	2-3	47 meter
	3-4	43 meter
	4-5	40 meter
	5-6	43 meter
	6-7	43 meter
	7-8	44 meter
	8-9	47 meter
	9-10	45 meter
	10-11	44 meter
<b>Total</b>	11 Tiang	442 meter
Line B	1-2	43 meter
	2-3	44 meter

	3-4	47 meter
	4-5	45 meter
	5-6	44 meter
	6-7	45 meter
	7-8	44 meter
<b>Total</b>	8 Tiang	312 meter
Total Panjang Jaringan Pelayanan Line A dan B = 754 meter		

Dari Tabel 4.5 diketahui bahwa jaringan pelayanan transformator distribusi 3 phase 1503115 memiliki dua jalur pelayanan dengan menggunakan 19 tiang dengan jarak total antara transformator 1503115 dengan tiang terakhir adalah 754 meter. Jadi untuk panjang penghantar totalnya adalah

$$L = 1 \times 1,03 = 754 \times 1,03 = 776 \text{ m}$$

#### 4.4.2.2 Transformator 1411671019

Tabel 4.6 Jaringan Pelayanan Transformator 1411671019

Jalur	No. Tiang	Panjang
Line A	1-2	43 meter
	2-3	45 meter
	3-4	48 meter
	4-5	47 meter
	5-6	48 meter
	6-7	41 meter
	7-8	42 meter
	8-9	42 meter
<b>Total</b>	9 Tiang	356 meter

Line B	1-2	45 meter
	2-3	47 meter
	3-4	47 meter
	4-5	46 meter
	5-6	43 meter
	6-7	46 meter
	7-8	44 meter
	8-9	49 meter
	9-10	45 meter
	10-11	43 meter
	11-12	46 meter
<b>Total</b>	12 Tiang	501 meter
Total Panjang Jaringan Pelayanan Line A dan B = 857 meter		

Dari Tabel 4.6 diketahui bahwa jaringan pelayanan transformator distribusi 3 phase 1411671019 memiliki dua jalur pelayanan dengan menggunakan 21 tiang dengan jarak total antara transformator 1411671019 dengan tiang terakhir adalah 857 m. Jadi untuk panjang penghantar totalnya adalah

$$L = \mathbf{1} \times 1,03 = 857 \times 1,03 = 882 \text{ m}$$

Dengan :

$L$  = Total panjang jaringan dengan andongan

$\mathbf{1}$  = Total panjang jaringan pelayanan jurusan

Panjang penghantar memiliki pengaruh pada besar resistansi penghantar untuk mencari nilai rugi-rugi daya pada penghantar netral saluran udara tegangan rendah transformator.

#### 4.5 Data Pembebanan Transformator

Dalam pengukuran konsumsi energi listrik oleh pelanggan, terdapat 2 kategori waktu beban puncak harian yang dikenal sesuai Peraturan Menteri Nomor 28 Tahun 2016 dan istilah kelistrikan website PLN yaitu Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) berkisar waktu 22.00 – 18.00 dan Waktu Beban Puncak (WBP) berkisar waktu 18.00 – 22.00. Pada penelitian ini, dari data laporan pembebanan kedua transformator distribusi 3 phase PT. PLN Rayon Sedayu dilakukan pada tanggal 14 Februari 2019 pada saat kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) yaitu sekitar pukul 19.05 WIB dengan durasi waktu pengukuran selama 10 detik. Proses pengukuran dengan hasil laporan data dilakukan dengan menggunakan alat *Tang Ampere* atau *Clamp on Power Tester* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3, di mana alat ini dapat mengukur berbagai macam variabel listrik seperti nilai arus, tegangan, daya aktif, daya reaktif, daya semu, serta juga faktor daya. Sedangkan untuk tahanan pentanahan dan arus netral yang mengalir ke tanah diukur menggunakan alat Earth Clamp Tester.



Gambar 4.3 *Clamp on Power Tester*

Berikut adalah hasil pengukuran pembebanan kedua transformator distribusi 3 phase yang telah dilakukan :

#### 4.5.1 Transformator 1503115

Tabel 4.7 Data pembebanan transformator 1503115

Laporan hasil pengukuran pada malam hari (WBP)			
Fasa	I (A)	$V_{F-N}$ (V)	Cos $\phi$
R	69,2	233	0,954
S	117	233	0,901
R	147	230	0,912
$I_N$	57,3 A		
$I_G$	6,21 A		
$R_G$	2,4 $\Omega$		

#### 4.5.2 Transformator 1411671019

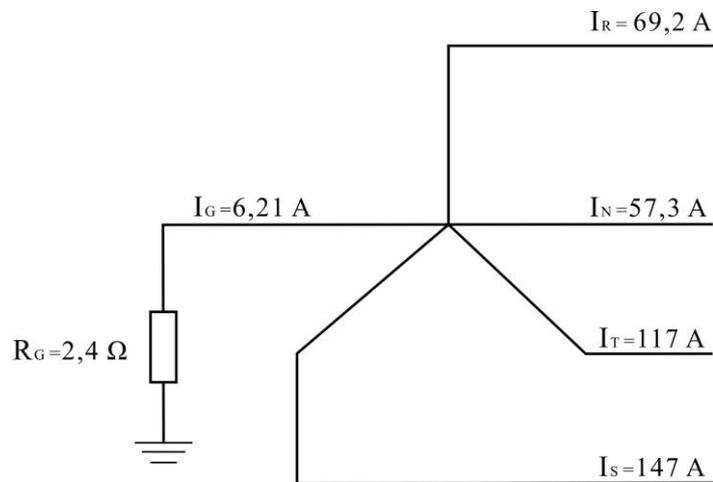
Tabel 4.8 Data pembebanan transformator 1411671019

Laporan hasil pengukuran pada malam hari (WBP)			
Fasa	I (A)	$V_{F-N}$ (V)	Cos $\phi$
R	134,7	218	0,87
S	110,5	223	0,942
R	124,1	222	0,914
$I_N$	27,5 A		
$I_G$	4,5 A		
$R_G$	1,38 $\Omega$		

### 4.6 Analisis Pembebanan Transformator

Analisis pembebanan transformator bertujuan untuk mengetahui apakah suatu transformator mengalami overload atau tidak. Dalam menganalisis pembebanan transformator sendiri dapat dilakukan dengan mencari nilai presentase pembebanan transformator pada kondisi Waktu Beban Puncak (WBP), di mana jika nilainya melebihi 100% maka dapat disimpulkan bahwa transformator tersebut mengalami overload. Berikut adalah analisis pembebanan pada kedua transformator :

## 4.6.1 Transformator 1503115



Gambar 4.4 Skema aliran arus transformator 1503115

Untuk mencari nilai presentase pembebanan, terlebih dahulu dihitung besar arus beban penuh transformator 1503115. Dari Tabel 4.2 diketahui bahwa transformator 1503115 memiliki spesifikasi :

$$\text{Daya pengenalan (S)} = 160 \text{ kVA}$$

$$\text{Tegangan pengenalan (V)} = 400 \text{ V}$$

Dengan menggunakan Persamaan 2.16, maka besar arus beban penuh setiap fasa transformator 1503115 adalah

$$\begin{aligned} I_{FL} &= \frac{S}{V \sqrt{3}} \\ &= \frac{160000 \text{ VA}}{400 \sqrt{3}} \\ &= 230,94 \text{ A} \end{aligned}$$

Setelah diketahui nilai  $I_{FL}$ , maka dengan data hasil pengukuran arus beban transformator 1503115 pada tabel 4.7 dan menggunakan Persamaan 2.18, presentase pembebanan tiap phase-nya adalah :

$$I_R = 69,2 \text{ A}$$

$$\% r = \frac{I_R}{I_{fl}} \times 100\%$$

$$= \frac{69,2 \text{ A}}{230,94 \text{ A}} \times 100\%$$

$$= 29,9\%$$

$$I_S = 117 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% s &= \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{117 \text{ A}}{230,94 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 50,5\% \end{aligned}$$

$$I_T = 147 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% t &= \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{147 \text{ A}}{230,94 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 63,6\% \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.19, maka presentase pembebanan rata-rata pada transformator 1503115 adalah :

$$\begin{aligned} \% x &= \frac{\% r + \% s + \% t}{3} \\ &= \frac{\% 29,9 + \% 50,5 + \% 63,6}{3} \\ &= 48\% \end{aligned}$$

Dengan :

% r = presentase pembebanan phase R (%)

% s = presentase pembebanan phase S (%)

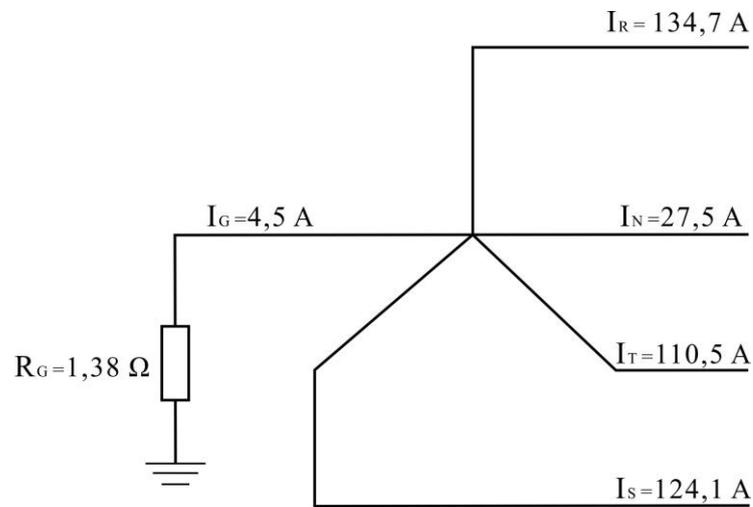
% t = presentase pembebanan phase T (%)

% x = presentase pembebanan rata-rata transformator (%)

Maka pada kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) nilai total dari beban yang terpakai pada transformator 1503115 adalah

$$\begin{aligned} S &= \% x \cdot \text{daya pengenal transformator} \\ &= 48\% \times 160 \text{ kVA} \\ &= 77 \text{ kVA} \end{aligned}$$

## 4.6.2 Transformator 1411671019



Gambar 4.5 Skema aliran arus transformator 1411671019

Untuk mencari nilai presentase pembebanan, terlebih dahulu dihitung besar arus beban penuh transformator 1411671019. Dari Tabel 4.3 diketahui bahwa transformator 1411671019 memiliki spesifikasi :

$$\text{Daya pengenalan (S)} = 200 \text{ kVA}$$

$$\text{Tegangan pengenalan (V)} = 400 \text{ V}$$

Dengan menggunakan Persamaan 2.16, maka besar arus beban penuh setiap fasa transformator 1411671019 adalah

$$\begin{aligned} I_{FL} &= \frac{S}{V \sqrt{3}} \\ &= \frac{200000 \text{ VA}}{400 \sqrt{3}} \\ &= 288,67 \text{ A} \end{aligned}$$

Setelah diketahui nilai  $I_{FL}$ , maka dengan data hasil pengukuran arus beban transformator 1411671019 pada tabel 4.8 dan menggunakan Persamaan 2.18, presentase pembebanan tiap phase-nya adalah :

$$I_R = 134,7 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% r &= \frac{I_R}{I_{FL}} \times 100\% \\ &= \frac{134,7 \text{ A}}{288,67 \text{ A}} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 46\%$$

$$I_S = 110,5 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% s &= \frac{I_S}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{110,5 \text{ A}}{288,67 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 38\% \end{aligned}$$

$$I_T = 124,1 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% t &= \frac{I_T}{I_{fl}} \times 100\% \\ &= \frac{124,1 \text{ A}}{288,67 \text{ A}} \times 100\% \\ &= 43\% \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.19, maka presentase pembebanan rata-rata pada transformator 1411671019 adalah :

$$\begin{aligned} \% x &= \frac{\% r + \% s + \% t}{3} \\ &= \frac{\% 46 + \% 38 + \% 43}{3} \\ &= 42,3\% \end{aligned}$$

Dengan :

% r = presentase pembebanan phase R (%)

% s = presentase pembebanan phase S (%)

% t = presentase pembebanan phase T (%)

% x = presentase pembebanan rata-rata transformator (%)

Maka pada kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) nilai total dari beban yang terpakai pada transformator 1411671019 adalah

$$\begin{aligned} S &= \% x \cdot \text{daya pengenalan transformator} \\ &= 42,3\% \times 200 \text{ kVA} \\ &= 84,6 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Nilai persentase pembebanan ini digunakan untuk mengetahui beban yang digunakan melebihi arus beban penuh atau tidak. Apabila persentase pembebanan melebihi 80% maka hal ini akan menyebabkan NH fuse menjadi panas bahkan bisa terjadi kerusakan pada NH fuse.

#### 4.7 Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator

Analisis ketidakseimbangan beban bertujuan untuk mengetahui berapa besar nilai dari presentase ketidakseimbangan beban pada suatu transformator, yaitu dengan cara mencari nilai koefisien ketidakseimbangan pada masing-masing phase. Berikut adalah analisis ketidakseimbangan beban pada kedua transformator:

##### 4.7.1 Transformator 1503115

Untuk mencari nilai koefisien ketidakseimbangan masing-masing phase pada transformator 1503115, terlebih dahulu dicari besar arus beban rata-rata pada kondisi seimbang dengan menggunakan persamaan 2.17.

$$\begin{aligned} I_{\text{Rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{69,2 + 117 + 147}{3} \\ &= 111,06 \text{ A} \end{aligned}$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 2.20 – 2.22, nilai koefisien ketidakseimbangan beban pada masing-masing phase transformator 1503115 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{a} &= \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{69,2}{111,06} = 0,62 \\ \text{b} &= \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{117}{111,06} = 1,05 \\ \text{c} &= \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{147}{111,06} = 1,32 \end{aligned}$$

Pada keadaan beban seimbang, koefisien dari a, b, dan c adalah bernilai 1, maka dengan persamaan 2.23 presentase ketidakseimbangan beban pada transformator 1503115 adalah

$$\begin{aligned}
 \% k &= \frac{(|a-1|)+(|b-1|)+(|c-1|)}{3} \times 100\% \\
 &= \frac{(|0,62-1|)+(|1,05-1|)+(|1,32-1|)}{3} \times 100\% \\
 &= \frac{0,38+0,05+0,32}{3} \times 100\% = 25\%
 \end{aligned}$$

Dengan :

$\% k$  = presentase ketidakseimbangan beban trafo (%)

#### 4.7.2 Transformator 1411671019

Untuk mencari nilai koefisien ketidakseimbangan masing-masing phase pada transformator 1411671019, terlebih dahulu dicari besar arus beban rata-rata pada kondisi seimbang dengan menggunakan persamaan 2.17.

$$\begin{aligned}
 I_{\text{Rata-rata}} &= \frac{IR + IS + IT}{3} \\
 &= \frac{134,7 + 110,5 + 124,1}{3} \\
 &= 123,1 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan 2.20 – 2.22, nilai koefisien ketidakseimbangan beban pada masing-masing phase transformator 1411671019 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{IR}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{134,7}{123,1} = 1,1 \\
 b &= \frac{IS}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{110,5}{123,1} = 0,89 \\
 c &= \frac{IT}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{124,1}{123,1} = 1,01
 \end{aligned}$$

Pada keadaan beban seimbang, koefisien dari a, b, dan c adalah bernilai 1, maka dengan persamaan 2.23 presentase ketidakseimbangan beban pada transformator 1411671019 adalah

$$\begin{aligned}
 \% k &= \frac{(|a-1|)+(|b-1|)+(|c-1|)}{3} \times 100\% \\
 &= \frac{(|1,1-1|)+(|0,89-1|)+(|1,01-1|)}{3} \times 100\%
 \end{aligned}$$

$$= \frac{0,1+0,11+0,01}{3} \times 100\% = 7,3\%$$

Dengan :

% k = presentase ketidakseimbangan beban trafo (%)

#### 4.8 Perhitungan Arus Netral

Perhitungan arus netral bertujuan untuk mencari nilai arus netral, di mana hasil hitungnya digunakan sebagai perbandingan untuk hasil pengukuran secara langsung yang telah dilakukan.

##### 4.8.1 Transformator 1503115

Berdasarkan hasil pengukuran tabel 4.7 arus beban pada masing-masing phase transformator 1503115 adalah sebagai berikut :

$I_R = 69,2 \text{ A}$	$\text{Cos } \theta = 0,954$	$\theta = 17,43^\circ$
$I_S = 117 \text{ A}$	$\text{Cos } \theta = 0,901$	$\theta = 25,64^\circ$
$I_T = 147 \text{ A}$	$\text{Cos } \theta = 0,912$	$\theta = 24,11^\circ$
$I_N = 57,3 \text{ A}$	$I_G = 6,21 \text{ A}$	

Dengan menggunakan persamaan 2.14, besar arus netral pada transformator 1411671019 adalah

$$\begin{aligned} I_N &= I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos (\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos (\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ)) \\ &= 69,2 \text{ A} (\cos 17,43^\circ + j \sin 17,43^\circ) + 117 \text{ A} (\cos (25,64^\circ-120^\circ) + j \sin(25,64^\circ-120^\circ)) + 147 \text{ A} (\cos (24,11^\circ+120^\circ) + j \sin(24,11^\circ+120^\circ)) \\ &= 69,2 \text{ A} (\cos 17,43^\circ + j \sin 17,43^\circ) + 117 \text{ A} (\cos -94,36^\circ + j \sin -94,36^\circ) + 147 \text{ A} (\cos 144,11^\circ + j \sin 144,11^\circ) \\ &= 69,2 \text{ A} (0,954 + j 0,299) + 117 \text{ A} (-0,076 + j -0,997) + 147 \text{ A} (-0,810 + j 0,586) \\ &= (-61,94 + -j 9,75) \text{ A} \end{aligned}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$I_N = \sqrt{(-61,94)^2 + (-9,75)^2} \text{ A}$$

$$= 62,7 \text{ A}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-61,94}{-9,75} = 81,06^\circ$$

Dengan hasil perhitungan di atas terlihat bahwa nilai hasil hitung lebih besar dari hasil ukur. Faktor kesalahannya (FK) adalah

$$FK = \frac{62,7 \text{ A} - 57,3 \text{ A}}{62,7 \text{ A}} \times 100\% = 8,6\%$$

#### 4.8.2 Transformator 1411671019

Berdasarkan hasil pengukuran tabel 4.8 arus beban pada masing-masing phase transformator 1411671019 adalah sebagai berikut :

$I_R = 134,7 \text{ A}$	$\text{Cos } \theta = 0,87$	$\theta = 29,52^\circ$
$I_S = 110,5 \text{ A}$	$\text{Cos } \theta = 0,942$	$\theta = 19,47^\circ$
$I_T = 124,1 \text{ A}$	$\text{Cos } \theta = 0,914$	$\theta = 23,87^\circ$
$I_N = 27,5 \text{ A}$	$I_G = 4,5 \text{ A}$	

Dengan menggunakan persamaan 2.14, besar arus netral pada transformator 1411671019 adalah

$$I_N = I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos (\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos (\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ))$$

$$= 134,7 \text{ A} (\cos 29,52^\circ + j \sin 29,52^\circ) + 110,5 \text{ A} (\cos (19,47^\circ - 120^\circ) + j \sin(19,47^\circ - 120^\circ)) + 124,1 \text{ A} (\cos (23,87^\circ + 120^\circ) + j \sin(23,87^\circ + 120^\circ))$$

$$= 134,7 \text{ A} (\cos 29,52^\circ + j \sin 29,52^\circ) + 110,5 \text{ A} (\cos -100,53^\circ + j \sin -100,53^\circ) + 124,1 \text{ A} (\cos 143,87^\circ + j \sin 143,87^\circ)$$

$$= 134,7 \text{ A} (0,87 + j 0,492) + 110,5 \text{ A} (-0,182 + j -0,983) + 124,1 \text{ A} (-0,807 + j 0,589)$$

$$= (-3,21 + j30,8) \text{ A}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$I_N = \sqrt{(-3,21)^2 + 30,8^2} \text{ A}$$

$$= 31,06 \text{ A}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{30,8}{-3,21} = -84,15^\circ$$

Dengan hasil perhitungan di atas terlihat bahwa nilai hasil hitung lebih besar dari hasil ukur. Faktor kesalahannya (FK) adalah

$$FK = \frac{31,06 \text{ A} - 27,5 \text{ A}}{31,06 \text{ A}} \times 100\% = 11,4\%$$

#### **4.9 Perhitungan Susut Daya Akibat Arus Netral Pada Penghantar Netral Transformator**

Susut daya pada penghantar netral disebabkan oleh adanya arus netral yang mengalir pada penghantar netral, di mana penghantar netral mempunyai resistansi yang nilainya dipengaruhi oleh massa jenis bahan, luas penampang, dan panjang penghantar. Berikut adalah perhitungan susut daya yang diakibatkan oleh adanya arus yang mengalir pada penghantar netral.

##### **4.9.1 Susut Daya Arus Netral Transformator 1503115**

Penghantar netral transformator 1503115 adalah penghantar dengan jenis NFA2X-T dengan diameter penghantar adalah 50 mm<sup>2</sup>. Berdasarkan tabel 4.4 penghantar transformator 1503115 memiliki spesifikasi resistansi 0,690 Ω/km, maka dengan panjang total 776 m nilai resistansinya adalah

$$R_N = r_{\text{kabel}} \times L$$

$$= 0,690 \text{ } \Omega/\text{km} \times 0,776 \text{ km} = 0,53 \text{ } \Omega$$

Sesuai dengan tabel 4.7 nilai arus netral yang mengalir pada transformator 1503115 adalah sebesar 57,3 A. Dengan menggunakan persamaan 2.28 didapat nilai susut daya pada penghantar netral adalah

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= (57,3 \text{ A})^2 \times 0,53 \text{ } \Omega = 1.740,14 \text{ Watt}$$

#### 4.9.2 Susut Daya Arus Netral Transformator 1411671019

Penghantar netral transformator 1411671019 adalah penghantar dengan jenis NFA2X-T dengan diameter penghantar adalah 50 mm<sup>2</sup>. Berdasarkan tabel 4.4 penghantar transformator 1411671019 memiliki spesifikasi resistansi 0,690  $\Omega$ /km, maka dengan panjang total 882 m nilai resistansinya adalah

$$R_N = r_{\text{kabel}} \times L$$

$$= 0,690 \text{ } \Omega/\text{km} \times 0,882 \text{ km} = 0,61 \text{ } \Omega$$

Sesuai dengan tabel 4.8 nilai arus netral yang mengalir pada transformator 1411671019 adalah sebesar 27,5 A. Dengan menggunakan persamaan 2.28 didapat nilai susut daya pada penghantar netral adalah

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= (27,5 \text{ A})^2 \times 0,61 \text{ } \Omega = 461,31 \text{ Watt}$$

### 4.10 Perhitungan Susut Daya Akibat Arus Yang Mengalir ke Tanah

Adanya arus yang mengalir ke tanah dapat menyebabkan susut daya karena terdapat resistansi pada suatu sistem pentanahan, di mana nilainya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.29. Berikut adalah perhitungan susut daya akibat adanya arus yang mengalir ke tanah pada kedua transformator :

#### 4.10.1 Susut Daya Arus Grounding Transformator 1503115

Berdasarkan hasil laporan pengukuran menggunakan Earth Clamp Tester nilai arus yang mengalir ke tanah pada transformator 1503115 adalah sebesar 6,21 A dengan tahanan pentanahan 2,4  $\Omega$ . Maka dengan menggunakan persamaan 2.29 besar susut daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah adalah

$$P_G = I_G^2 \times R_G$$

$$= (6,21 \text{ A})^2 \times 2,4 \Omega = 92,553 \text{ Watt}$$

#### 4.10.2 Susut Daya Arus Grounding Transformator 1411671019

Berdasarkan hasil laporan pengukuran menggunakan Earth Clamp Tester nilai arus yang mengalir ke tanah pada transformator 1411671019 adalah sebesar 4,5 A dengan tahanan pentanahan 1,38  $\Omega$ . Maka dengan menggunakan persamaan 2.29 besar susut daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah adalah

$$P_G = I_G^2 \times R_G$$

$$= (4,5 \text{ A})^2 \times 1,38 \Omega = 27,945 \text{ Watt}$$

### 4.11 Perhitungan Susut Daya Penghantar Fasa

Dalam menghitung susut daya penghantar fasa transformator memiliki nilai tahanan yang berbeda dengan penghantar netralnya. Menentukan tahanan penghantar dipengaruhi oleh panjang penghantar saluran fasa dan diameter penghantar yang digunakan. Penghantar fasa berdiameter 70 mm<sup>2</sup> dan panjang jaringan sama dengan penghantar netral.

#### 4.11.1 Susut Daya Penghantar Fasa Transformator 1503115

Berdasarkan tabel 4.4 penghantar fasa transformator 1503115 memiliki spesifikasi resistansi 0,433  $\Omega$ /km, maka dengan panjang total 776 m nilai resistansinya adalah

$$R_{Fasa} = r_{kabel} \times L$$

$$R_{Fasa} = 0,433 \times 0,776 = 0,336 \Omega$$

Jadi besarnya nilai tahanan penghantar pada saluran fasa R, S, dan T adalah 0,336  $\Omega$

Sesuai dengan hasil laporan pengukuran pada tabel 4.7 nilai arus fasa R, S, dan T yang mengalir pada transformator 1503115 adalah sebesar 69,2 A untuk arus fasa R, 117 A untuk arus fasa S, dan 147 A untuk arus fasa T.

Maka dengan menggunakan persamaan 2.32 besar nilai susut daya penghantar fasa adalah

$$\begin{aligned} P_{R \text{ Sal}} &= I_R^2 \times R_R \\ &= (69,2)^2 \text{ A} \times 0,336 \text{ } \Omega = 1.608,9 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{S \text{ Sal}} &= I_S^2 \times R_S \\ &= (117)^2 \text{ A} \times 0,336 \text{ } \Omega = 4.599,5 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{T \text{ Sal}} &= I_T^2 \times R_T \\ &= (147)^2 \text{ A} \times 0,336 \text{ } \Omega = 7.260,6 \text{ W} \end{aligned}$$

Sehingga total susut daya di penghantar fasa R, S dan T pada transformator 1503115

$$\begin{aligned} P_{\text{Sal total}} &= P_{R \text{ Sal}} + P_{S \text{ Sal}} + P_{T \text{ Sal}} \\ &= 1.608,9 \text{ W} + 4.599,5 \text{ W} + 7.260,6 \text{ W} \\ &= 13.469 \text{ W} \end{aligned}$$

#### 4.11.2 Susut Daya Penghantar Fasa Transformator 1411671019

Berdasarkan tabel 4.4 penghantar fasa transformator 1411671019 memiliki spesifikasi resistansi 0,433  $\Omega$ /km, maka dengan panjang total 882 m nilai resistansinya adalah

$$\begin{aligned} R_{\text{Fasa}} &= r_{\text{kabel}} \times L \\ R_{\text{Fasa}} &= 0,433 \times 0,882 = 0,38 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Jadi besarnya nilai tahanan penghantar pada saluran fasa R, S, dan T adalah 0,38  $\Omega$

Sesuai dengan hasil laporan pengukuran pada tabel 4.8 nilai arus fasa R, S, dan T yang mengalir pada transformator 1411671019 adalah sebesar 134,7 A untuk arus fasa R, 110,5 A untuk arus fasa S, dan 124,1 A untuk arus fasa T. Maka dengan menggunakan persamaan 2.32 besar nilai susut daya penghantar fasa adalah

$$P_{R \text{ Sal}} = I_R^2 \times R_R$$

$$= (134,7)^2 \text{ A} \times 0,38 \ \Omega = 6.894,7 \text{ W}$$

$$P_{S \text{ Sal}} = I_S^2 \times R_S$$

$$= (110,5)^2 \text{ A} \times 0,38 \ \Omega = 4.639,8 \text{ W}$$

$$P_{T \text{ Sal}} = I_T^2 \times R_T$$

$$= (124,1)^2 \text{ A} \times 0,38 \ \Omega = 5.852,3 \text{ W}$$

Sehingga total susut daya di penghantar fasa R, S dan T pada transformator 1411671019

$$P_{\text{Sal total}} = P_{R \text{ Sal}} + P_{S \text{ Sal}} + P_{T \text{ Sal}}$$

$$= 6894,7 \text{ W} + 4639,8 \text{ W} + 5852,3 \text{ W}$$

$$= 17.386,1 \text{ W}$$

#### 4.12 Hasil Perbandingan Susut Daya/Rugi-Rugi Daya

Berikut adalah table perbandingan susut daya pada transformator 1503115 dan transformator 1411671019 beban tidak seimbang.

Tabel 4.9 Perbandingan Susut Daya Kedua Transformator

Waktu	Susut Daya	Transformator	
		1503115	1411671019
Malam	$P_{\text{Netral}}$	1.740,14 Watt	461,31 Watt
	$P_{\text{Grounding}}$	92,553 Watt	27,945 Watt
	$P_{\text{Saluran Fasa}}$	13.469 Watt	17.386,1 Watt
	Total	15.301,693 Watt	17.875,355 Watt

#### 4.13 Energi yang Hilang dan Kerugian Finansial pada Jaringan Tegangan Rendah Beban Tidak Seimbang

Menurut Abdul Kadir (2000) dalam buku yang berjudul “Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik” halaman 140 daya yang dihasilkan dari beban listrik rumah tangga besar yang meliputi lampu, setrika, televisi, pompa listrik, *Air*

*Conditioner*, DVD/CD player dan lemari pendingin memiliki nilai daya beban rata-rata jam 22.00-18.00 (LWBP) berkisar 2150 VA dan daya beban rata-rata jam 18.00-22.00 (WBP) berkisar 6000 VA dimana daya yang terpakai pada waktu LWBP mencapai 36% dari waktu WBP.

Maka dari hasil susut daya pada arus netral, *grounding*, dan saluran fasa, dapat dihitung susut daya total waktu LWBP dan WBP dengan acuan buku Abdul Kadir dan kerugian finansial PT. PLN Rayon Sedayu beban tidak seimbang dengan menggunakan persamaan 2.3 dan 2.4 dengan waktu LWBP 20 jam/hari dan WBP 4 jam/hari.

#### 4.12.1 Transformator 1503115

a. Beban tidak seimbang waktu malam hari (WBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 15.301,693 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 15.301,693 \text{ Wh}$$

$$= 15,301693 \text{ kWh}$$

$$\text{Susut daya selama WBP} = 15,301693 \text{ kWh} \times 4 \text{ jam} = 61,206 \text{ kWh}$$

$$\text{Kerugian finansial/bulan} = \text{Energi yang hilang} \times 30 \text{ hari} \times \text{harga produksi listrik}$$

$$= 61,206 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 1.804.964,00/\text{bulan}$$

b. Beban tidak seimbang waktu siang hari (LWBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 15.301,693 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 15.301,693 \text{ Wh}$$

$$= 15,301693 \text{ kWh} \times 36\%$$

$$= 5,5086 \text{ kWh}$$

$$\text{Susut daya selama WBP} = 5,5086 \text{ kWh} \times 20 \text{ jam} = 110,172 \text{ kWh}$$

$$\text{Kerugian finansial/bulan} = \text{Energi yang hilang} \times 30 \text{ hari} \times \text{harga produksi listrik}$$

$$= 110,172 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 3.248.972,00/\text{bulan}$$

Maka jumlah total kerugian finansial selama 1 bulan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak transformator 1503115 adalah

$$\text{Total kerugian finansial/bulan} = \text{Kerugian finansial WBP} + \text{LWBP}$$

$$= \text{Rp } 1.804.964,00 + \text{Rp } 3.248.972,00$$

$$= \text{Rp } 5.053.936,00$$

#### 4.12.1 Transformator 1411671019

a. Beban tidak seimbang waktu malam hari (WBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 17.875,355 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 17.875,355 \text{ Wh}$$

$$= 17,875355 \text{ kWh}$$

$$\text{Susut daya selama WBP} = 17,875355 \text{ kWh} \times 4 \text{ jam} = 71,501 \text{ kWh}$$

$$\text{Kerugian finansial/bulan} = \text{Energi yang hilang} \times 30 \text{ hari} \times \text{harga produksi listrik}$$

$$= 71,501 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 2.108.564,00/\text{bulan}$$

b. Beban tidak seimbang waktu siang hari (LWBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 17.875,355 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 17.875,355 \text{ Wh}$$

$$= 17,875355 \text{ kWh} \times 36\%$$

$$= 6,4251 \text{ kWh}$$

$$\text{Susut daya selama WBP} = 6,4251 \text{ kWh} \times 20 \text{ jam} = 128,502 \text{ kWh}$$

$$\text{Kerugian finansial/bulan} = \text{Energi yang hilang} \times 30 \text{ hari} \times \text{harga produksi listrik}$$

$$= 128,502 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 3.789.523,00/\text{bulan}$$

Maka jumlah total kerugian finansial selama 1 bulan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak transformator 1411671019 adalah

$$\text{Total kerugian finansial/bulan} = \text{Kerugian finansial WBP} + \text{LWBP}$$

$$= \text{Rp } 2.108.564,00 + \text{Rp } 3.789.523,00$$

$$= \text{Rp } 5.898.087,00$$

#### 4.14 Penyeimbangan Beban Pelanggan

Pada penelitian tugas akhir ini, peneliti akan memberikan solusi untuk meminimalisir rugi-rugi daya akibat arus netral yang dikarenakan keadaan beban tidak seimbang dengan melakukan penyeimbangan beban. Solusi penyeimbangan beban dilakukan dengan menganalisis phase yang memiliki nilai arus beban di atas nilai arus rata-rata, kemudian memindahkan beberapa bebannya (konektor sambungan rumah pelanggan pada tiang) ke phase yang memiliki nilai arus beban dibawah nilai arus rata-rata.

Sebelum melakukan penyeimbangan, peneliti mengambil beberapa *sample* penggunaan arus pelanggan pada waktu beban puncak untuk perbandingan seberapa besar penggunaannya dengan daya kontraknya. Perbandingan yang didapati digunakan sebagai presentase beban yang akan direncanakan untuk dipindahkan. Hasil dilapangan menunjukkan nilainya sebagai berikut :

Tabel 4.10 Sampel Penggunaan Beban Pelanggan

No.	ID Pelanggan	V <sub>pelanggan</sub>	I <sub>Pelanggan</sub>	S = V <sub>Pelanggan</sub> X I <sub>pelanggan</sub>	Daya Kontrak PLN
1.	521040413782	223 Volt	3,4 A	758 VA	1300 VA
2.	521040413695	221 Volt	2,4 A	530 VA	900 VA
3.	521040413709	216 Volt	2,2 A	475 VA	900 VA
4.	521040413687	217 Volt	1,6 A	347 VA	450 VA
5.	521040413439	219 Volt	6,1 A	1335 VA	2200 VA

Berdasarkan persamaan 2.1 presentase penggunaan beban pelanggan

$$\begin{aligned}
 \text{a. Pelanggan 1} &= \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\% \\
 &= \frac{758 \text{ VA}}{1300 \text{ VA}} \times 100\% = 58\% \\
 \text{b. Pelanggan 2} &= \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\% \\
 &= \frac{530 \text{ VA}}{900 \text{ VA}} \times 100\% = 59\% \\
 \text{c. Pelanggan 3} &= \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\% \\
 &= \frac{475 \text{ VA}}{900 \text{ VA}} \times 100\% = 52\% \\
 \text{d. Pelanggan 4} &= \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\% \\
 &= \frac{347 \text{ VA}}{450 \text{ VA}} \times 100\% = 77\% \\
 \text{e. Pelanggan 5} &= \frac{S_{\text{pelanggan}}}{S_{\text{daya kontrak}}} \times 100\% \\
 &= \frac{1335 \text{ VA}}{2200 \text{ VA}} \times 100\% = 61\%
 \end{aligned}$$

Jadi rata-rata presentase penggunaan beban yang dapat digunakan sebagai acuan pemindahan beban sesuai persamaan rumus 2.2 adalah

$$\begin{aligned}
 \% \text{Presentase rata-rata beban} &= \frac{\%pel1 + \%pel2 + \%pel3 + \%pel4 + \%pel5}{5} \\
 &= \frac{58\% + 59\% + 52\% + 77\% + 61\%}{5} \\
 &= 60\% \text{ daya kontrak}
 \end{aligned}$$

#### 4.14.1 Transformator 1503115

Berdasarkan hasil pengukuran tabel 4.7 arus beban pada masing-masing phase transformator 1503115 adalah sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} I_R = 69,2 \text{ A} & \text{Cos } \theta = 0,954 & \theta = 17,43^\circ \\ I_S = 117 \text{ A} & \text{Cos } \theta = 0,901 & \theta = 25,64^\circ \\ I_T = 147 \text{ A} & \text{Cos } \theta = 0,912 & \theta = 24,11^\circ \\ I_N = 57,3 \text{ A} & I_G = 6,21 \text{ A} & \end{array}$$

Arus beban rata-ratanya adalah :

$$\begin{aligned} I_{\text{Rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos\theta + j \sin\theta) + I_T (\cos\theta + j \sin\theta)}{3} \\ &= \frac{69,2 (\cos 17,43^\circ + j \sin 17,43^\circ) + 117 (\cos 25,64^\circ + j \sin 25,64^\circ) + 147 (\cos 24,11^\circ + j \sin 24,11^\circ)}{3} \\ &= \frac{(66,01 + j 20,69) + (105,41 + j 50,54) + (134,06 + j 59,97)}{3} \\ &= \frac{(305,48 + j 131,2)}{3} \\ &= (101,82 + j 43,7) \end{aligned}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_{\text{Rata-rata}} &= \sqrt{101,82^2 + 43,7^2} \text{ A} \\ &= 111 \text{ A} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{43,7}{101,82} = 23,21^\circ \end{aligned}$$

Untuk meminimalisir rugi-rugi daya, masing – masing phase harus diatur agar memiliki arus beban mendekati 111 Ampere. Sehingga :

- untuk  $I_R$ ,  $I_R - I = 69,2 \text{ A} - 111 \text{ A} = -41,8 \text{ A}$  (ditambah 41,8)
- untuk  $I_S$ ,  $I_S - I = 117 \text{ A} - 111 \text{ A} = 6 \text{ A}$  (dikurangi 6)

c. untuk  $I_T$ ,  $I_T - I = 147 \text{ A} - 111 \text{ A} = 36 \text{ A}$  (dikurangi 36)

Dengan perhitungan diatas dapat dinyatakan bahwa  $\pm 6 \text{ A}$  arus beban *phase S* dilimpahkan ke *phase R* dan  $\pm 36 \text{ A}$  arus beban *phase T* dilimpahkan ke *phase R*. Sesuai pemakaian energi listrik pelanggan, digunakan sebesar 60% dari daya kontraknya, sehingga untuk proses penyeimbangan beban transformator 1503115 dapat dilakukan dengan memindahkan:

- a. Dua pelanggan daya kontrak 900 VA + satu pelanggan daya kontrak 450 VA dari *phase S* ke *phase R*

Tabel 4.11 Pemindahan Beban *Phase S* ke R Trafo 1503115

	Nama	Tarif	Daya	Arus
1.	Bintarno	R1MT	900 VA	4 A
2.	Sukino	R1M	900 VA	4 A
3.	Drs. Sri Murtono	R1	450 VA	2 A

- b. Dua pelanggan daya kontrak 900 VA + satu pelanggan daya kontrak 450 VA dari *phase T* ke *phase R*

Tabel 4.12 Pemindahan Beban *Phase T* ke R Trafo 1503115

No.	Nama	Tarif	Daya	Arus
1.	TN Mudjiyono B.A	R1	2200 VA	10 A
2.	H. Tiwan Suharto	R1	1300 VA	6 A
3.	Drs. Sudaryo	R1	1300 VA	6 A
4.	Djakim	R1	1300 VA	6 A
5.	Hartoyo	R1M	900 VA	4 A
6.	Agus Kusmantoro	R1M	900 VA	4 A
7.	Suwarno	R1M	900 VA	4 A
8.	Parjo	R1M	900 VA	4 A
9.	NG Alibasyah	R1M	900 VA	4 A
10.	Andoko	R1M	900 VA	4 A
11.	Wesman	R1M	900 VA	4 A
12.	A Samsuri	R1M	900 VA	4 A

Sehingga arus beban ketiga *phase* transformator 1503115 saat kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) adalah

$$I_R = 69,2A + (1 \times 10A \times 0,6) + (3 \times 6A \times 0,6) + (10 \times 4A \times 0,6) + (1 \times 2A \times 0,6) = 111,2 A$$

$$I_S = 117 A - (2 \times 6A \times 0,6) - (1 \times 2A \times 0,6) = 111 A$$

$$I_T = 147 A - (1 \times 10A \times 0,6) - (8 \times 6A \times 0,6) - (1 \times 2A \times 0,6) = 111 A$$

Dengan nilai arus beban pada masing-masing *phase* seperti perhitungan diatas maka dengan menggunakan Persamaan 2.14 dan 2.28 besar nilai arus netral dan rugi-rugi daya pada penghantar netralnya adalah

$$\begin{aligned} I_N &= I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos(\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos(\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ)) \\ &= 111,2 A (\cos 17,43^\circ + j \sin 17,43^\circ) + 111 A (\cos (25,64^\circ-120^\circ) + j \sin(25,64^\circ-120^\circ)) + 111 A (\cos (24,11^\circ+120^\circ) + j \sin(24,11^\circ+120^\circ)) \\ &= 111,2 A (\cos 17,43^\circ + j \sin 17,43^\circ) + 111 A (\cos -94,36^\circ + j \sin -94,36^\circ) + 111 A (\cos 144,11^\circ + j \sin 144,11^\circ) \\ &= 111,2 A (0,954 + j 0,299) + 111 A (-0,076 + j -0,997) + 111 A (-0,810 + j 0,586) \\ &= (7,739 + -j 12,37) A \end{aligned}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_N &= \sqrt{7,739^2 + (-12,37)^2} A \\ &= 14,6 A \end{aligned}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{30,8}{-3,21} = -32,03^\circ$$

Sedangkan untuk susut daya di penghantar netral adalah

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= (14,6 \text{ A})^2 \times 0,61 \Omega = 130,03 \text{ Watt}$$

Berdasarkan hasil perhitungan susut daya arus netral pada transformator 1503115 dan mengasumsikan nilai susut daya arus mengalir ke tanah dan saluran fasa tetap, maka total susut daya yang dihasilkan adalah

$$P_{\text{Total}} = P_N \times P_G + P_{\text{Saluran Fasa}}$$

$$= 130,03 \text{ Watt} + 92,553 \text{ Watt} + 13.469 \text{ Watt}$$

$$= 13.691,583 \text{ Watt}$$

Nilai energi yang hilang dan kerugian finansial sesudah penyeimbangan adalah

a. Beban seimbang waktu malam hari (WBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 13.691,583 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 13.691,583 \text{ Wh}$$

$$= 13,691583 \text{ kWh}$$

Susut daya selama WBP = 13,691583 kWh x 4 jam = 54,766 kWh

Kerugian finansial/bulan = Energi yang hilang x 30 hari x harga produksi listrik

$$= 54,766 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 1.615.049,00/\text{bulan}$$

b. Beban seimbang waktu siang hari (LWBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 13.691,583 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 13.691,583 \text{ Wh}$$

$$= 13,691583 \text{ kWh} \times 36\%$$

$$= 4,9289 \text{ kWh}$$

$$\text{Susut daya selama WBP} = 4,9289 \text{ kWh} \times 20 \text{ jam} = 98,578 \text{ kWh}$$

Kerugian finansial/bulan = Energi yang hilang x 30 hari x harga produksi listrik

$$= 98,578 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 2.907.065,00/\text{bulan}$$

Maka jumlah total kerugian finansial selama 1 bulan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP) transformator 1503115 adalah

Total kerugian finansial/bulan = Kerugian finansial WBP + LWBP

$$= \text{Rp } 1.615.049,00 + \text{Rp } 2.907.065,00$$

$$= \text{Rp } 4.522.114,00$$

#### 4.14.2 Transformator 1411671019

Berdasarkan hasil pengukuran tabel 4.8 arus beban pada masing-masing phase transformator 1411671019 adalah sebagai berikut :

$$I_R = 134,7 \text{ A} \quad \cos \theta = 0,87 \quad \theta = 29,52^\circ$$

$$I_S = 110,5 \text{ A} \quad \cos \theta = 0,942 \quad \theta = 19,47^\circ$$

$$I_T = 124,1 \text{ A} \quad \cos \theta = 0,914 \quad \theta = 23,87^\circ$$

$$I_N = 27,5 \text{ A} \quad I_G = 4,5 \text{ A}$$

Arus beban rata-ratanya adalah :

$$\begin{aligned} I_{\text{Rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{I_R (\cos \theta + j \sin \theta) + I_S (\cos \theta + j \sin \theta) + I_T (\cos \theta + j \sin \theta)}{3} \\ &= \frac{134,7 (\cos 29,52^\circ + j \sin 29,52^\circ) + 110,5 (\cos 19,47^\circ + j \sin 19,47^\circ) + 124,1 (\cos 23,87^\circ + j \sin 23,87^\circ)}{3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{((-42,96) + j(-127,64)) + (89,83 + j 64,24) + (37,60 + j(-118,25))}{3} \\
&= \frac{(84,47 + j(-181,65))}{3} \\
&= (28,15 + j(-60,55))
\end{aligned}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
I_{\text{Rata-rata}} &= \sqrt{28,15^2 + (-60,55)^2} \text{ A} \\
&= 123 \text{ A}
\end{aligned}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{28,15}{-60,55} = -24,93^\circ$$

Untuk meminimalisir rugi-rugi daya, masing – masing phase harus diatur agar memiliki arus beban mendekati 123 Ampere. Sehingga :

- a. untuk  $I_R$ ,  $I_R - I = 134,7 \text{ A} - 123 \text{ A} = 11,7 \text{ A}$  (dikurangi 11,7)
- b. untuk  $I_S$ ,  $I_S - I = 110,5 \text{ A} - 123 \text{ A} = -12,5 \text{ A}$  (ditambah 12,5)
- c. untuk  $I_T$ ,  $I_T - I = 124,1 \text{ A} - 123 \text{ A} = 1,1 \text{ A}$  (dikurangi 1,1)

Dengan perhitungan diatas dapat dinyatakan bahwa  $\pm 11,7 \text{ A}$  arus beban *phase R* dilimpahkan ke *phase S* dan  $\pm 1,1 \text{ A}$  arus beban *phase T* dilimpahkan ke *phase S*. Sesuai pemakaian energi listrik pelanggan, digunakan sebesar 60% dari daya kontraknya, sehingga untuk proses penyeimbangan beban transformator 1411671019 dapat dilakukan dengan memindahkan:

- a. Lima pelanggan daya kontrak 900 VA *phase R* ke *phase S*

Tabel 4.13 Pemindahan Beban *Phase R* ke *S* Trafo 1411671019

No.	Nama	Tarif	Daya	Arus
1.	Hadi Mustofa	R1M	900 VA	4 A
2.	Rachmat Muhammad	R1M	900 VA	4 A
3.	Boinem Amat Diharjo	R1T	900 VA	4 A
4.	Suwandi	R1M	900 VA	4 A
5.	Sunarjo	R1	900 VA	4 A

b. Satu pelanggan daya kontrak 450 VA dari *phase* T ke *phase* S

Tabel 4.14 Pemindahan Beban *Phase* T ke S Trafo 1411671019

No.	Nama	Tarif	Daya	Arus
1.	Wiriodimejo	R1	450 VA	2 A

Sehingga arus beban ketiga *phase* transformator 1411671019 saat kondisi Waktu Beban Puncak (WBP) adalah

$$I_R = 134,7A - (5 \times 4A \times 0,6) = 122,7 A$$

$$I_S = 110,5A + (5 \times 4A \times 0,6) + (1 \times 2A \times 0,6) = 123,7 A$$

$$I_T = 124,1 A - (1 \times 2A \times 0,6) = 122,9 A$$

Dengan nilai arus beban pada masing-masing *phase* seperti perhitungan diatas maka dengan menggunakan Persamaan 2.14 dan 2.28 besar nilai arus netral dan rugi-rugi daya pada penghantar netralnya adalah

$$\begin{aligned} I_N &= I_R (\cos\theta + j \sin\theta) + I_S (\cos (\theta-120^\circ) + j \sin(\theta-120^\circ)) + I_T (\cos (\theta+120^\circ) + j \sin(\theta+120^\circ)) \\ &= 122,7 A (\cos 29,52^\circ + j \sin 29,52^\circ) + 123,7 A (\cos (19,47^\circ - 120^\circ) + j \sin(19,47^\circ - 120^\circ)) + 122,9 A (\cos (23,87^\circ + 120^\circ) + j \sin(23,87^\circ + 120^\circ)) \\ &= 122,7 A (\cos 29,52^\circ + j \sin 29,52^\circ) + 123,7 A (\cos -100,53^\circ + j \sin -100,53^\circ) + 122,9 A (\cos 143,87^\circ + j \sin 143,87^\circ) \\ &= 122,7 A (0,87 + j 0,492) + 123,7 A (-0,182 + j -0,983) + 122,9 A (-0,807 + j 0,589) \\ &= (-14,94 + j11,15) A \end{aligned}$$

Dari bilangan kompleks diatas didapatkan hasil untuk nilai arus netral dan arah sudutnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_N &= \sqrt{(-14,94)^2 + 11,15^2} A \\ &= 18,6 A \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{-14,94}{11,15} = -53,26^\circ \end{aligned}$$

Sedangkan untuk susut daya di penghantar netral adalah

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= (18,6 \text{ A})^2 \times 0,61 \Omega = 211,04 \text{ Watt}$$

Berdasarkan hasil perhitungan susut daya arus netral pada transformator 1411671019 dan mengasumsikan nilai susut daya arus mengalir ke tanah dan saluran fasa tetap, maka total susut daya yang dihasilkan adalah

$$P_{\text{Total}} = P_N \times P_G + P_{\text{Saluran Fasa}}$$

$$= 211,04 \text{ Watt} + 27,945 \text{ Watt} + 17.386,1 \text{ Watt}$$

$$= 17.625,085 \text{ Watt}$$

a. Beban seimbang waktu malam hari (WBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 17.625,085 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 17.625,085 \text{ Wh}$$

$$= 17,625085 \text{ kWh}$$

Susut daya selama WBP = 17,625085 kWh x 4 jam = 70,5 kWh

Kerugian finansial/bulan = Energi yang hilang x 30 hari x harga produksi listrik

$$= 70,5 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 2.079.045,00/\text{bulan}$$

b. Beban seimbang waktu siang hari (LWBP) :

$$W = P \times t$$

$$= 17.625,085 \text{ Watt} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 17.625,085 \text{ Wh}$$

$$= 17,625085 \text{ kWh} \times 36\%$$

$$= 6,345 \text{ kWh}$$

Susut daya selama WBP = 6,345 kWh x 20 jam = 126,9 kWh

Kerugian finansial/bulan = Energi yang hilang x 30 hari x harga produksi listrik

$$= 126,9 \text{ kWh} \times 30 \times \text{Rp } 983,00$$

$$= \text{Rp } 3.742.281,00/\text{bulan}$$

Maka jumlah total kerugian finansial selama 1 bulan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban (LWBP) puncak transformator 1411671019 adalah

Total kerugian finansial/bulan = Kerugian finansial WBP + LWBP

$$= \text{Rp } 2.079.045,00 + \text{Rp } 3.742.281,00$$

$$= \text{Rp } 5.821.326,00$$

#### **4.15 Penghematan Biaya Sesudah Penyeimbangan Beban**

Setelah dilakukan penyeimbangan beban, nilai arus yang mengalir pada penghantar netral akan menurun sehingga berpengaruh pada susut daya dan kerugian finansial yang akan menurun juga. Sesuai hasil perhitungan susut daya penghantar netral sebelum dan sesudah penyeimbangan dengan asumsi nilai susut daya arus mengalir ke tanah dan saluran fasa tetap sehingga susut daya arus netral sebagai pembanding maka penghematan biaya yang dapat dilakukan selama sebulan dan setahun dalam perhitungan sebagai berikut

##### 4.15.1 Transformator 1503115

$H_{\text{bulan}} = \text{Total kerugian finansial/bulan sebelum penyeimbangan} - \text{Total kerugian finansial/bulan setelah penyeimbangan}$

$$= \text{Rp } 5.053.936,00 - \text{Rp } 4.522.114,00$$

$$= \text{Rp } 531.822,00$$

$H_{\text{tahun}} = \% H_{\text{bulan}} \times 12 \text{ Bulan}$

$$= \text{Rp } 531.822,00 \times 12 \text{ Bulan}$$

$$= \text{Rp } 6.381.864,00$$

## 4.15.2 Transformator 1411671019

$$H_{\text{bulan}} = \text{Total kerugian finansial/bulan sebelum penyeimbangan} - \text{Total kerugian finansial/bulan setelah penyeimbangan}$$

$$= \text{Rp } 5.898.087,00 - \text{Rp } 5.821.326,00$$

$$= \text{Rp } 76.761,00$$

$$H_{\text{tahun}} = \% H_{\text{bulan}} \times 12 \text{ Bulan}$$

$$= \text{Rp } 76.761,00 \times 12 \text{ Bulan}$$

$$= \text{Rp } 921.132,00$$

Keterangan :

$H_{\text{bulan}}$  = Penghematan biaya selama sebulan

$H_{\text{tahun}}$  = Penghematan biaya selama setahun