

SKENARIO TRANSPOSISI SISTEM 3 FASA UNTUK MENGATASI KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI TANAH LAUT MILL

Felix^{1,*}, Deni Rachmat¹, Novelita Wahyu Mondamina²

¹ Program Studi Teknologi Pengolahan Sawit, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sains Bandung

² Program Studi Teknologi Pengolahan Sawit, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sains Bandung

Abstrak. Gangguan ketidakseimbangan pada sistem distribusi jaringan tegangan rendah 380V/220V, 3 Φ (R,S,T), 50 Hz yang dipasok oleh transformator distribusi step down menyebabkan munculnya arus netral. Arus netral yang mengalir menyebabkan losses (rugi-rugi). Secara tidak langsung, Losses berdampak pada kerugian biaya yang ditanggung oleh perusahaan. Penelitian ini dikaji untuk mengetahui kerugian yang disebabkan oleh ketidakseimbangan beban dan upaya untuk mengatasi ketidakseimbangan beban. Studi kasus dilaksanakan pada transformator step down 6,9 kV/0,4 kV Tanah Laut Mill. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah wawancara dan observasi. Pengambilan sampel dilakukan dengan pengukuran langsung berdasarkan variabel-variabel berupa arus, tegangan, dan faktor daya. Hasil dari kajian didapat besar ketidakseimbangan beban yang muncul sebesar 10,66 %. Arus yang mengalir pada penghantar netral adalah 29,1 A. Losses akibat arus netral sebesar 0,359 kW. Biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan per tahun adalah Rp.2.344.473/Tahun. Untuk penghantar grounding tidak ada arus yang mengalir yang menunjukkan tidak adanya gangguan masing-masing fasa terhadap grounding. Upaya untuk mengatasi ketidakseimbangan beban dilakukan dengan menyeimbangkan beban antar fasa (transposisi). Telah dilakukan kajian penyeimbangan beban dengan 3 skenario. Skenario 1 berdasarkan jumlah rumah (beban nominal) dengan pemindahan jalur fasa R ke fasa S sebanyak 2 rumah (4A) dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah (12 A). Skenario 2 berdasarkan faktor kebutuhan dengan pemindahan jalur fasa R ke fasa S sebanyak 2 rumah (2,8 A) dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah (8,4 A). Skenario 3 berdasarkan nilai rata-rata per fasa diperlukan memindahkan fasa R ke fasa S sebanyak 1 rumah (2 A) dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah (12 A). Dari ketiga skenario diatas, maka dipilih skenario 3 karena mewakili dari hasil pengukuran yang telah dilakukan.

Kata kunci: ketidakseimbangan, arus netral, transformator, transposisi

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Penyediaan tenaga listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik. Untuk itu, terjadi pembagian beban - beban yang pada awalnya merata, tetapi karena ketidakserempakan waktu penyalaan beban - beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S, dan fasa T) inilah yang menyebabkan mengalirnya arus di penghantar netral transformator ^[1]. Seperti yang telah di uraikan pada alinea sebelumnya bahwa transformator yang ada di PKS adalah transformator step up dan step down. Objek yang akan di teliti adalah transformator step down yang terletak di perumahan karyawan. Waktu penelitian yang terjadi di TLTM yaitu saat listrik mulai dihidupkan ke perumahan karyawan pukul 18.00 WITA. Berdasarkan pemaparan di atas diperlukan upaya untuk mengatasi ketidakseimbangan di transformator distribusi perumahan karyawan, salah satunya dengan cara penyeimbangan sistem 3 fasa. Untuk itu penulis mengangkat topik tugas akhir yang berjudul “Skenario Transposisi Sistem 3 Fasa Untuk Mengatasi Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Tanah Laut Mill”

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dikaji adalah sebagai berikut:

1. Seberapa besar ketidakseimbangan beban pada tiap fasa pada transformator distribusi perumahan karyawan di Tanah Laut Mill?

¹* Corresponding author: felix.budiman1998@gmail.com

2. Seberapa besar losses yang terjadi akibat ketidakseimbangan beban dan seberapa besar losses yang terjadi dengan adanya arus netral pada transformator distribusi perumahan karyawan di Tanah Laut Mill?
3. Bagaimana cara penyeimbangan sistem 3 fasa pada transformator distribusi perumahan karyawan di Tanah Laut Mill?

1.3 Tujuan Penelitian

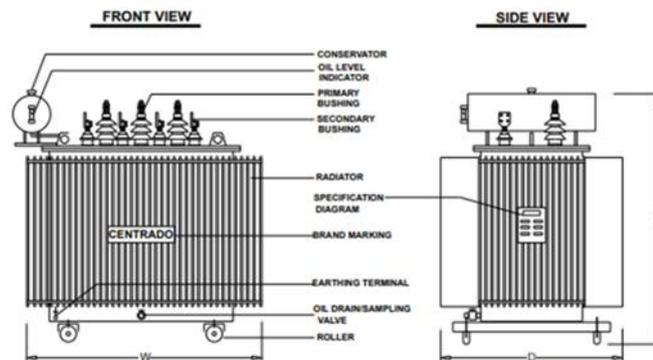
Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besar ketidakseimbangan beban pada tiap fasa pada transformator distribusi perumahan karyawan.
2. Mengetahui besar losses yang terjadi akibat ketidakseimbangan beban dan besar losses yang terjadi dengan adanya arus netral pada transformator distribusi perumahan karyawan.
3. Mengetahui cara penyeimbangan sistem 3 fasa pada transformator distribusi perumahan karyawan di Tanah Laut Mill.

2. Landasan Teori

2.1 Transformator distribusi

Trafo distribusi atau *Distribution Transformer* digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan ataupun lokasi industri. Pada dasarnya, trafo distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan rendah yang kurang dari 33 kilo Volt untuk keperluan rumah tangga ataupun industri yang berada dalam kisaran tegangan 220V hingga 440V [2].



Gambar 1. Transformator Distribusi [6]

2.2 Perhitungan Arus Beban Pada Transformator

Daya pada transformator memiliki kapasitas yang berbeda-beda. Akan tetapi untuk menentukan perhitungan arus pada transformator mempunyai rumus yang sama, pada sisi primer dan sisi sekunder arus beban penuh dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut [3]:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (1)$$

$$I_{FL} = S / (\sqrt{3} \times V) \quad (2)$$

Keterangan rumus:

S : Daya trafo (kVA)

V : Tegangan trafo (kV)

I : Arus jala-jala (A)

I_{FL} : Arus beban penuh (A)

Perhitungan arus rata-rata pada ketiga fasa dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut [3]:

$$I_{rata-rata} = (I_R + I_S + I_T) / 3 \quad (3)$$

Keterangan rumus:

Irata-rata : arus rata-rata di ketiga fasa (A)
 I_R : arus fasa R (A)
 I_S : arus fasa S (A)
 I_T : arus fasa T (A)

2.3 Daya Pada Saluran distribusi

Perhitungan daya [P] yang disalurkan melalui suatu penghantar netral dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini dengan syarat arus pada fasa R, S, dan T dalam keadaan seimbang, secara matematis persamaannya sebagai berikut ^[3]:

$$P = 3 \times V_{(L-L)} \times I \times \cos \varphi \quad (4)$$

Keterangan rumus:

P : daya pada ujung kirim (Watt)
 V_{L-L} : tegangan pada ujung kirim (V)
 I : arus pada ujung kirim (A)
 $\cos \varphi$: faktor daya

Koefisien keseimbangan beban mempunyai nilai $a = b = c = 1$. Jika persamaan (4) menggambarkan [I] adalah besaran arus fasa pada daya dalam keadaan yang seimbang, maka persamaan di bawah ini menggambarkan [I] adalah besaran arus fasa pada daya dalam keadaan tidak seimbang. Koefisien arus fasa pada keadaan tidak seimbang dapat dinyatakan dengan a, b, dan c. Secara matematis dinyatakan dengan persamaan ^[3]:

$$[I_R] = a \times I, \text{ jadi } a = I_R / I_{\text{rata-rata}} \quad (5)$$

$$[I_S] = b \times I, \text{ jadi } b = I_S / I_{\text{rata-rata}} \quad (6)$$

$$[I_T] = c \times I, \text{ jadi } c = I_T / I_{\text{rata-rata}} \quad (7)$$

Rata-rata beban tidak seimbang dalam (%) dapat dinyatakan dengan persamaan ^[3]:

$$\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\} / 3 \times 100 \% \quad (8)$$

2.4 Hambatan Suatu Penghantar

Berdasarkan eksperimen, Ohm merumuskan bahwa hambatan R kawat logam berbanding lurus dengan panjang l, berbanding terbalik dengan luas penampang lintang kawat A, dan bergantung kepada jenis bahan tersebut. Secara matematis dituliskan ^[4]:

$$R = \rho \times l / A \quad (9)$$

keterangan:

R = hambatan kawat penghantar (Ω)
 l = panjang kawat penghantar (m)
 A = luas penampang lintang penghantar (m^2)
 ρ = hambatan jenis kawat penghantar ($\Omega.m$)

Konstanta pembanding ρ disebut hambatan jenis (resistivitas). Hambatan jenis kawat berbeda-beda tergantung bahannya. Berikut tabel beberapa hambatan jenis bahan ^[4].

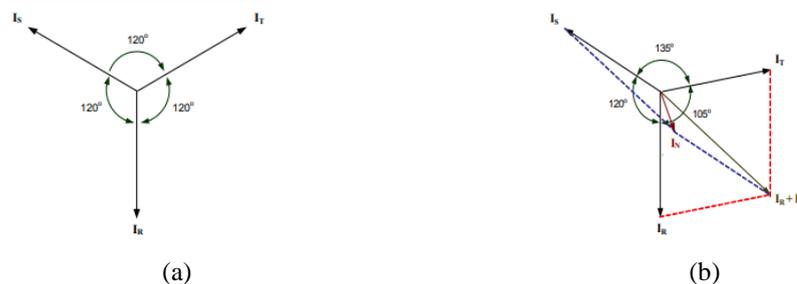
Bahan	Hambatan Jenis ρ (Ωm)
Konduktor	
Perak	$1,59 \times 10^{-8}$
Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$
Emas	$2,44 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungsten	$5,60 \times 10^{-8}$
Besi	$9,71 \times 10^{-8}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$
Air raksa	98×10^{-8}
Nikrom (logam campuran Ni, Fe, Cr)	100×10^{-8}
Semikonduktor	
Karbon (grafit)	$(3-60) \times 10^{-5}$
Germanium	$(1-500) \times 10^{-3}$
Silikon	0,1 - 60
Isolator	
Kaca	$10^9 - 10^{12}$
Karet padatan	$10^{23} - 10^{25}$

Gambar 2. Tabel Hambatan Jenis Bahan [4]

2.5 Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu [1]:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 4. Vektor Diagram Arus (a) dalam keadaan seimbang, (b) dalam keadaan tidak seimbang

2.6 Perhitungan Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Losses pada trafo distribusi seringkali terjadi karena pada penghantar netral transformator terdapat arus yang mengalir. Hal ini disebabkan karena sulitnya mengatur beban di sisi pelanggan sehingga menyebabkan ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasanya. Persamaan (10) dapat digunakan untuk mencari rugi-rugi daya yang hilang akibat adanya arus netral pada penghantar transformator. Secara matematis dinyatakan dengan rumus [3]:

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (10)$$

Keterangan rumus :

P_N : rugi-rugi daya pada penghantar netral transformator (Watt)

I_N : arus yang muncul pada penghantar netral transformator (A)

R_N : tahanan pada penghantar netral transformator (Ω)

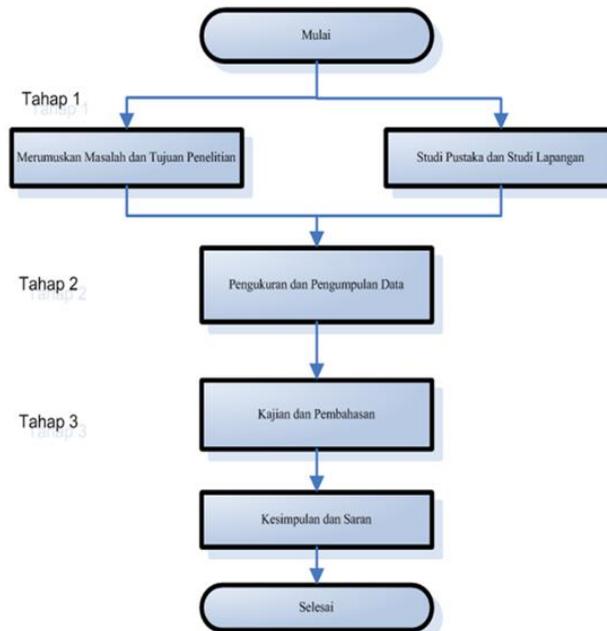
2.7 Penyeimbangan Beban

Penyeimbangan beban adalah suatu kegiatan yang terdiri dari pengukuran awal, hingga pemerataan beban tiap fasa yang tidak seimbang (pincang) yang bertujuan agar arus pada netral tersebut berkurang, sehingga mengurangi kerugian terhadap PKS. Penyeimbangan beban ini juga memberikan pengaruh yang besar terhadap umur trafo. Karena jika pada salah satu fasa bebannya sudah melebihi batas yang diperbolehkan, maka akan dapat menyebabkan kabel pada gardu tersebut terbakar. Beban

yang sudah melebihi batas tersebut dapat ditandai dengan fuse atau sekering pada gardu akan panas dan mengeluarkan asap jika terlalu berlebihan [5].

3. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif. Adapun alur prosedur penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

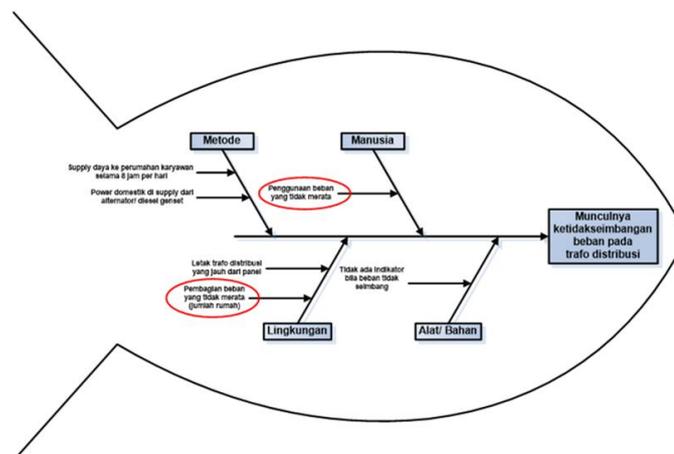


Gambar 5. Diagram Alir Prosedur Penelitian

4. Kajian dan Pembahasan

4.1 Identifikasi Masalah

Dari latar belakang masalah di atas, maka didapat identifikasi masalah dengan menggunakan diagram Ishikawa:



Gambar 6. Diagram Ishikawa Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi

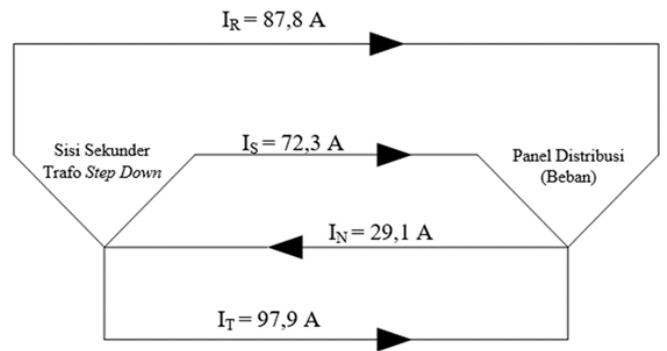
Dari gambar 4.1, terdapat 4 kategori penyebab utama yaitu metode, manusia, lingkungan, dan alat/bahan. Dari setiap kategori, diuraikan sebab-penyebab yang sesuai dengan kategori di atas. Maka ditemukan 2 penyebab utama yang paling mungkin, yaitu pembagian beban yang tidak merata di lihat dari jumlah rumah dan penggunaan beban yang tidak merata.

4.2 Data Hasil Pengukuran Arus, Tegangan, Cos φ dan Skema Aliran Arus

Data penelitian diambil selama 5 hari dimulai tanggal 16 Juni 2021 – 21 Juni 2021. Pengambilan data dilakukan dengan interval 10 menit dimulai pukul 18.00-19.00 WITA, sehingga di dapatkan 6 sampel pengukuran setiap harinya. Maka didapatkan hasil rata-rata dari arus setiap fasa, arus netral, arus ground, tegangan 3 fasa, tegangan 1 fasa, dan nilai faktor daya (Cos Phi).

Tabel 1. Data pengukuran Arus, Tegangan, dan cos φ

Tanggal	Pukul (WITA)	IR (A)	IS (A)	IT (A)	IN (A)	IG (A)	VRS (V)	VST (V)	VTR (V)	VRN (V)	VSN (V)	VTN (V)	Cos Phi
16 Juni 2021	18.00	89,5	81	92,4	21,6	0	340	350	345	200	200	210	0,94
	18.10	88,7	79,5	98,3	22,8	0	340	350	350	200	200	210	0,94
	18.20	92,3	80,6	89,6	22,7	0	340	350	350	200	200	210	0,94
	18.30	90,2	77,6	101	28	0	340	350	350	205	200	210	0,94
	18.40	80,4	71,5	108	34,3	0	340	350	355	210	195	220	0,94
	18.50	80,4	71	101	35	0	340	350	355	210	205	215	0,94
17 Juni 2021	19.00	81,5	65,5	105	36,6	0	340	350	360	215	190	230	0,94
	18.00	95,7	74,5	96,4	25	0	340	350	350	205	200	210	0,95
	18.10	96,1	75,2	97,4	24,4	0	340	350	345	200	200	210	0,95
	18.20	91,2	78,5	102	26,1	0	340	350	350	200	200	215	0,95
	18.30	93,7	80,2	102	27,3	0	340	350	350	205	200	210	0,95
	18.40	88,4	76	101	25,2	0	340	350	350	205	200	210	0,95
18 Juni 2021	18.50	93,2	73	97,9	27,7	0	345	350	355	210	200	210	0,95
	19.00	84,1	73,6	101	27,6	0	340	350	355	210	195	215	0,95
	18.00	89,7	70,8	93,3	26,1	0	345	355	355	210	200	210	0,95
	18.10	92,7	73,1	92	24,9	0	345	355	355	210	205	210	0,95
	18.20	91,7	70,1	87,3	24,2	0	345	350	350	205	205	210	0,95
	18.30	91	77	87,9	23,6	0	345	355	355	205	205	210	0,95
19 Juni 2021	18.40	92,3	68,5	95,5	30	0	345	350	355	215	200	210	0,95
	18.50	91,3	68,1	94,9	29	0	350	350	360	215	200	210	0,95
	19.00	92,5	66,5	96,7	32,3	0	350	350	360	215	200	210	0,95
	18.00	79,3	64,6	104	34,4	0	340	350	355	210	195	215	0,95
	18.10	76,2	59	91,6	33,2	0	350	355	360	210	200	215	0,95
	18.20	77,9	65	99,3	33,6	0	340	350	355	210	200	215	0,95
21 Juni 2021	18.30	79	69,4	102	33,7	0	340	350	355	210	200	215	0,95
	18.40	77,8	64,1	97,2	36	0	350	355	360	210	200	215	0,95
	18.50	74,6	65,3	101	37,4	0	345	355	360	210	195	220	0,95
	19.00	75,7	65,6	106	38,3	0	340	355	360	210	195	220	0,95
	18.00	86,9	68,1	95,1	28	0	345	350	355	210	200	210	0,94
	18.10	87,4	69,5	97,4	29,3	0	340	355	355	210	200	210	0,94
Rata-rata	18.20	97,2	72,4	91,2	28,9	0	345	350	350	210	200	210	0,94
	18.30	95,7	77,2	104	29	0	340	345	350	205	200	205	0,94
	18.40	93,6	78,2	103	29,2	0	340	350	350	200	200	210	0,94
	18.50	95,6	82,1	98,3	26,2	0	335	350	345	200	200	210	0,94
	19.00	90,8	79,5	95,5	25,9	0	340	350	350	200	200	210	0,94
			87,8	72,3	97,9	29,1	0	342	351	353	207	200	212



Gambar 7. Skema Aliran Arus Pada Transformator Distribusi

Berdasarkan nilai pengukuran pada tabel 1, dibuatlah skema aliran arus pada Trafo distribusi step down. Terlihat bahwa beban rata-rata pada fasa R sebesar 87,8 A, fasa S sebesar 72,3 A dan fasa T sebesar 97,9 A dan ketiga fasa tersebut memiliki nilai yang berbeda antara satu dengan lain, terjadinya ketidakseimbangan pembebanan. Sesuai dengan teori ketidakseimbangan, maka pada kabel penghantar netral trafo distribusi akan timbul arus yaitu rata-rata sebesar 29,1 A. pengukuran nilai tersebut menggunakan clamp meter merk Kyoritsu Kew Snap 2046R.

4.3 Hasil Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

4.3.1 Analisa Pembebanan Transformator Distribusi

Di ketahui

$S = 100 \text{ KVA}$

$V = 380 \text{ VL-L}$

Maka dengan menggunakan persamaan (1), (2) dan (3) dapat dijabarkan menjadi:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I, 100 \text{ KVA} = \sqrt{3} \times 0,38 \text{ kV} \times I, I_{FL} = 151,93 \text{ A}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = (I_R + I_S + I_T) / 3 = (87,8 + 72,3 + 97,9) / 3 = 86 \text{ A}$$

4.3.2 Analisa Ketidakseimbangan Beban pada Trafo Distribusi:

Berdasarkan persamaan (4), (6) dan (7) maka dapat dijabarkan seperti dibawah ini.

$$[I_R] = a \times I, \text{ jadi } a = I_R / I_{\text{rata-rata}} = 87,8 / 86 = 1,02$$

$$[I_S] = b \times I, \text{ jadi } b = I_S / I_{\text{rata-rata}} = 72,3 / 86 = 0,84$$

$$[I_T] = c \times I, \text{ jadi } c = I_T / I_{\text{rata-rata}} = 97,9 / 86 = 1,14$$

Hasil perhitungan di atas dapat digunakan untuk menghitung rata-rata ketidakseimbangan beban dalam persentase. Secara matematis dinyatakan menggunakan persamaan (8) dengan rumus:

$$\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}/3 \times 100\% = \{|1,02-1|+|0,84-1|+|1,14-1|\}/3 \times 100\% = 10,66\%$$

- Standar internasional seperti EN-50160 memberikan batasan untuk ketidakseimbangan hingga 2% untuk *Low Voltage (LV)* dan *Medium Voltage (MV)*
- Hal ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban sudah melebihi standar, sehingga perlu dilakukan penyeimbangan sistem 3 fasa dengan mentransposisikan beban, agar beban tiap fasa R, S, T dapat seimbang.

4.4 Perhitungan Losses Arus Netral

Diket:

- Jenis kabel : NFA2X (*Insulated Aluminium Twisted Cable*)
- Ukuran : $25 \text{ mm}^2 = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
- Jarak antara trafo dengan panel trafo $\pm (l)$: 400 m,
- Nilai hambatan jenis aluminium (ρ) : $2,65 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$

maka untuk mencari nilai tahanan pada penghantar netral menggunakan persamaan (9) adalah:

$$R_N = \rho \times l/A = 2,65 \times 10^{-8} \times 400 / (25 \times 10^{-6}) = 0,424 \Omega$$

Besarnya rugi-rugi daya yang diakibatkan munculnya arus netral pada penghantar netral trafo dapat diketahui dengan perhitungan sesuai persamaan (10), yaitu:

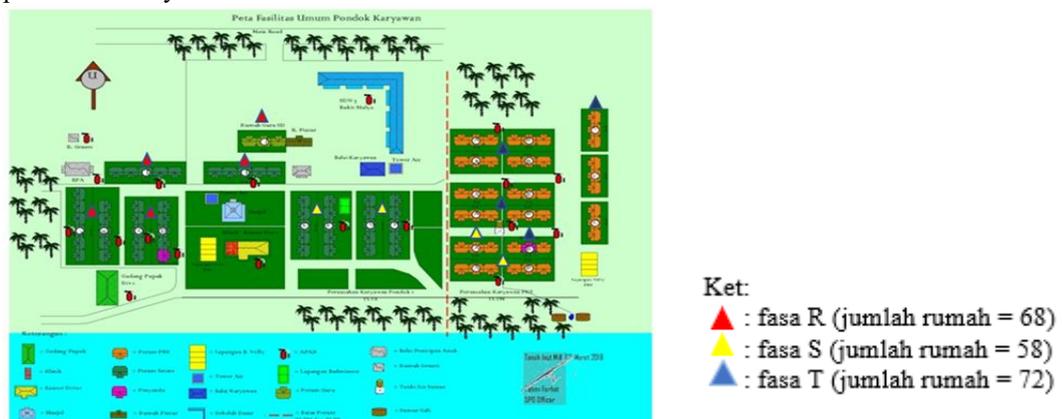
$$P_N = I_N^2 \times R_N = 29,1^2 \times 0,424 = 359 \text{ W atau } 0,359 \text{ kW}$$

Waktu penggunaan alternator 3036,667 Jam/Tahun diperoleh dari rata-rata penggunaan alternator no 2, 3 dan 5 dari bulan mei 2020 – 2021. Biaya Rp 2150,57/kWh diperoleh berdasarkan SAP, harga solar Rp 7527,00 /liter dan berdasarkan standar pemakaian solar (kWh/Liter), untuk 1 liter pemakaian solar menghasilkan 3,5 kWh atau 3,5 kWh/liter, sehingga biaya operasional alternator adalah Rp 2150,57/kWh. Sehingga didapat perhitungan biaya *losses* di bawah [7]:

$$\text{Biaya losses} = 0,359 \text{ kW} \times 3036,667 \text{ hours/Tahun} \times \text{Rp. } 2150,57/\text{kWh} = \text{Rp. } 2.344.473/\text{Tahun.}$$

4.5 Penyeimbangan Beban Transformator Distribusi Terhadap Arus Netral

Perumahan karyawan di PKS terdiri dari perumahan kebun, pabrik dan guru SD. Berikut denah perumahan karyawan:



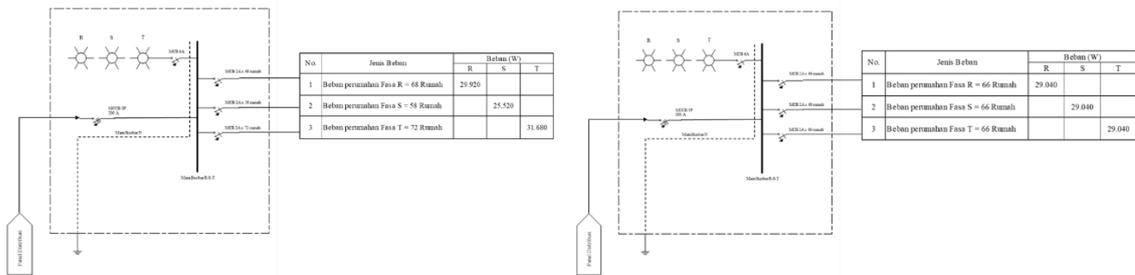
Gambar 8. Denah Perumahan Karyawan di TLTM

Menurut pembagian beban setiap fasa, untuk fasa R sebanyak 68 rumah yang terdiri dari 62 rumah karyawan kebun dan 6 rumah guru SD, untuk fasa S sebanyak 58 rumah yang terdiri dari 40 rumah karyawan kebun dan 18 rumah karyawan pabrik dan fasa T sebanyak 72 rumah karyawan pabrik. Namun, untuk pembagian beban setiap fasa berdasarkan asumsi dikarenakan tidak adanya data dari pabrik mengenai pembagian beban setiap fasa.

Penentuan skenario pada kajian ini berdasarkan dari awal instalasi listrik sebelum di sambung ke beban. Beban tersebut harus di bagi merata ke setiap fasanya untuk mengurangi terjadinya ketidakseimbangan beban. Kemudian pada awal perencanaan juga dibutuhkan menghitung nilai faktor kebutuhan beban untuk mengetahui estimasi pemakaian beban yang akan dipakai perumahan tersebut, hal ini juga untuk mengurangi nilai ketidakseimbangan beban. Namun, ketika instalasi beban sudah terlaksana di lapangan dan ingin mengetahui besar ketidakseimbangan beban secara aktual, maka diperlukan data pengukuran lapangan secara aktual. Penyeimbangan beban transformator distribusi terhadap arus netral dapat dilakukan dalam 3 skenario, dimana skenario 1 berdasarkan jumlah rumah, skenario 2 berdasarkan karakteristik beban dan skenario 3 berdasarkan hasil pengukuran data aktual lapangan.

4.5.1 Skenario 1 - Berdasarkan Jumlah Rumah (Beban Nominal)

Skenario 1 merupakan dasar dari perancangan awal instalasi listrik sebelum disambung ke beban. Skenario 1 diambil berdasarkan jumlah rumah pada perumahan TLTM. Berikut dibawah ini merupakan gambar wiring diagram panel distribusi perumahan karyawan.



Gambar 9 dan 10. Wiring Diagram Panel Distribusi Perumahan Karyawan Skenario 1: kiri (Sebelum penyeimbangan beban), kanan: (Setelah penyeimbangan beban)

Pada gambar 9 terlihat bahwa pembagian beban tiap fasa tidak seimbang, dimana fasa R memiliki total beban sebesar 29.920 W (132 A), fasa S memiliki total beban sebesar 25.520 W (116A) dan fasa T memiliki total beban sebesar 31.680 W (144 A). Dari data *budget*, 1 rumah dibatasi 2A. Rata-rata rumah untuk pembagian beban tiap fasa yaitu: $198:3 = 66$ rumah per fasa. Maka untuk penyeimbangan beban menurut pembagian beban rumah, diperlukan pemindahan beban perumahan, yaitu fasa R sebanyak 2 rumah untuk fasa S dan fasa T sebanyak 6 rumah untuk fasa S. Pada gambar 10, setelah melakukan transposisi beban tiap fasa, terlihat pada total beban setiap fasa, dimana fasa R, S dan T memiliki total beban sebesar 29.040 W (132 A).

4.5.2 Skenario 2 - Berdasarkan Beban Kebutuhan

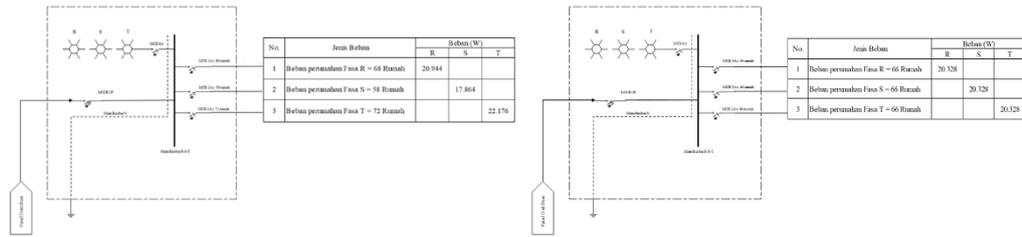
Skenario 2 berhubungan dengan skenario 1, namun ditambahkan dengan teori faktor-faktor karakteristik beban dan dalam kajian ini dipilih faktor kebutuhan. Faktor kebutuhan merupakan perbandingan antara kebutuhan maksimum (beban puncak) terhadap total daya terpasang Jenis beban yang sesuai dalam skenario 2 adalah domestik karena beban yang dikaji yaitu pada perumahan karyawan. Untuk besar daya yang terpasang pada perumahan karyawan yaitu sebesar 2 A atau 0,44 kW. Berikut merupakan tabel faktor-faktor karakteristik beban:

Tabel 2. Faktor- Faktor Karakteristik Beban

Jenis Beban	Daya (kW)	Faktor - Faktor Beban		
		Faktor Kebutuhan	Faktor Beban	Faktor Diversitas
Domestik	0,4 s/d 1,5	70-100 %	10-20%	1,2-1,3
Komersial	0,5 s/d 2	90-100 %	25-30%	1,1-1,2
Industri Besar	100-500	70-80 %	60-65%	-
Industri Berat	>500	85-90 %	70-80%	-

Dari tabel 2 nilai faktor kebutuhan dipakai sebesar 70%. Kemudian, nilai masing-masing beban pada skenario 1 di buat sebesar 70 % dan besar daya yang terpasang pada perumahan karyawan di

skenario 2 yaitu 1,4 A. Setelah diketahui nilai beban sebelum dan sesudah transposisi pada skenario 1, maka dibuat *wiring* diagram panel distribusi perumahan karyawan.



Gambar 11 dan 12. Wiring Diagram Panel Distribusi Perumahan Karyawan Skenario 2: kiri (Sebelum penyeimbangan beban), kanan: (Setelah penyeimbangan beban)

Pada gambar 11 terlihat bahwa pembagian beban tiap fasa tidak seimbang, dimana fasa R memiliki total beban sebesar 20.944 W (95,2 A), fasa S memiliki total beban sebesar 17.864 W (81,2A) dan fasa T memiliki total beban sebesar 22.176 W (100,8 A). Pada gambar 12, setelah melakukan transposisi beban tiap fasa, terlihat pada total beban setiap fasa, dimana fasa R, S dan T memiliki total beban sebesar 20.328 W (92,4 A).

4.5.3 Skenario 3 - Berdasarkan Hasil Pengukuran Data Aktual Lapangan

Skenario 3 diambil berdasarkan hasil pengukuran yang telah didapat di panel distribusi perumahan karyawan TLTM. Hasil pengukuran tersebut sudah di tuangkan dalam tabel 1 yang berisi data pengukuran arus, tegangan, dan $\cos \phi$.

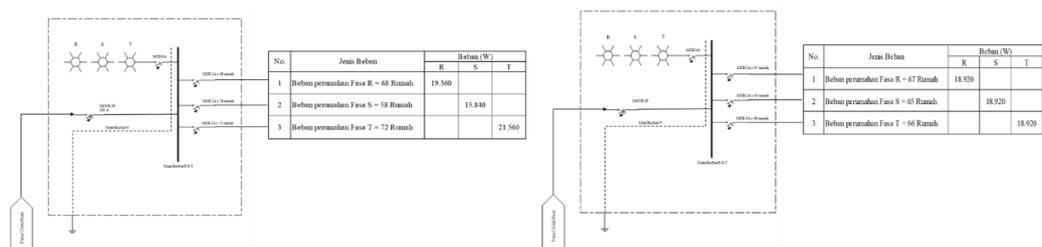
Tabel 3. Nilai Pengukuran Arus rata-rata fasa R, S dan T

Fasa/ beban	Beban Induk (A)
R	88
S	72
T	98

Dari hasil pengukuran beban trafo diatas dapat terlihat bahwa beban pada fasa T jauh lebih besar dari pada fasa lainnya, sedangkan fasa S lebih kecil dibandingkan fasa lainnya sehingga menghasilkan arus pada penghantar netral sebesar 29,1 A yang disebabkan ketidakseimbangannya beban ini. Untuk mengatasi permasalahan ini maka harus segera dilaksanakan kegiatan penyeimbang beban trafo. Pertama- tama mencari nilai rata-rata arus per fasa:

$$\text{Nilai rata-rata arus per fasa} = (\text{Beban R} + \text{Beban S} + \text{Beban T}) / 3 = (88 + 72 + 98) / 3 = 258 / 3 = 86 \text{ A}$$

Setelah didapat nilai rata-rata arus per fasa sebesar 86 A maka dapat ditentukan fasa mana yang kelebihan dan kekurangan arus. Pada fasa R sudah melewati nilai rata-rata arus (88 A), sedangkan fasa S kurang dari nilai rata-rata beban, maka fasa T yang sudah jauh melebihi nilai rata-rata beban harus dipindahkan agar ketiga fasa tersebut mendekati nilai seimbang. Maka diperlukan untuk memindahkan fasa R ke fasa S sebanyak 2 A dan fasa T ke fasa S sebanyak 12 A atau secara jumlah rumah maka fasa R ke fasa S sebanyak 1 rumah dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah. Setelah diketahui pemindahan tiap fasa, maka dibuat *wiring* diagram panel distribusi perumahan karyawan sebelum dan sesudah penyeimbangan beban.



Gambar 13 dan 14. Wiring Diagram Panel Distribusi Perumahan Karyawan Skenario 3: kiri (Sebelum penyeimbangan beban), kanan: (Setelah penyeimbangan beban)

Pada gambar 13, terlihat bahwa pembagian beban tiap fasa tidak seimbang, dimana fasa R memiliki total beban sebesar 19.360 W (88 A), fasa S memiliki total beban sebesar 15.840 W (72 A) dan fasa T memiliki total beban sebesar 21.560 W (98 A). Pada Gambar 14, setelah melakukan transposisi beban tiap fasa, terlihat pada total beban setiap fasa, dimana fasa R, S dan T memiliki total beban sebesar 18.920 W (88 A).

Dengan adanya ketiga skenario upaya transposisi beban, maka upaya untuk memperkecil arus netral yang timbul pada penghantar panel distribusi transformator dapat dilakukan.

5. Penutup

5.1 Kesimpulan

Berikut kesimpulan untuk menjawab tujuan penelitian:

1. Persentase ketidakseimbangan beban sebesar 10,66 %
2. *Losses* akibat arus netral, $P_N = 0,359$ kW. Bila dikonversi menjadi rupiah/tahun = Rp. 2.344.473/tahun.
3. Penyeimbangan beban dapat dilakukan dengan menurut jumlah rumah (beban nominal), diperlukan pemindahan jalur fasa R ke fasa S sebanyak 2 rumah (4A) dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah (12 A). Berdasarkan beban kebutuhan sebesar 70%, diperlukan pemindahan jalur fasa R ke fasa S sebanyak 2 rumah (2,8 A) dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah (8,4 A). Berdasarkan hasil pengukuran, diperlukan memindahkan fasa R ke fasa S sebanyak 1 rumah (2 A) dan fasa T ke fasa S sebanyak 6 rumah (12 A). Dari ketiga skenario diatas, maka dipilih skenario 3 karena mewakili dari hasil pengukuran yang telah dilakukan.

5.2 Saran

Saran untuk pengembangan tugas akhir ini bagi yang ingin melanjutkan sebagai berikut:

1. Pengujian pemindahan beban tersebut hanya berupa gambaran dan belum direalisasikan di Tanah Laut Mill, untuk kedepannya dapat di uji coba transposisi beban secara langsung.
2. Pemasangan data *logger* (*power logger*) yang berfungsi untuk memudahkan *monitoring* dan *track record* dari beban yang digunakan serta mengukur berbagai jenis besaran listrik antara lain arus, tegangan, daya dan faktor daya. Data *logger* dapat dibuat dan dirancang menggunakan arduino.
3. Perlu di kaji lebih lanjut mengenai perhitungan arus *grounding* (sistem pentanahan), performansi trafo akibat ketidakseimbangan beban yaitu efisiensi dan *voltage regulation*.
4. Perlu di kaji lebih lanjut mengenai perhitungan beban trafo jika digunakan 2 sumber pembangkit.

Referensi

- [1] Setiadi, J. S., Machmudsyah, T., & Isnanto, Y. (2006, 3). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi. Jurnal Teknik Elektro, 6, 1-6.
- [2] Kho, D. (2017, 9 23). Jenis-jenis Transformator (Trafo). Retrieved from teknikelektronika: <https://teknikelektronika.com/jenis-jenis-transformator-trafo/>
- [3] Nugroho, A. (2019). ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL DAN LOSSES PADA TRAFO DISTRIBUSI (STUDI KASUS PADA PT. PLN (Persero) RAYON KARTASURA). Publikasi Ilmiah, 3-5.
- [4] Online, M. M. (2013, 04). Cara Menghitung Hambatan Suatu Penghantar. Retrieved from Materi Mafia Online: <https://mafia.mafiaol.com/2013/04/cara-menghitung-hambatan-jenis-suatu.html>
- [5] Yondri, S., Artono, T., & Sari, H. P. (2013, 6). PENGARUH PENYEIMBANGAN BEBAN TRAFO DISTRIBUSI TERHADAP ARUS NETRAL. Jurnal Elektron, 5, 1-8.
- [6] Centrado. (2010). Centrado Distribution & Power Transformers. Jakarta Pusat: PT. Centrado Prima International.
- [7] Tamba, O. (2020). Perancangan Indikator Arus Netral dan Arus Grounding pada Alternator 3 Phase (Studi Kasus Alternator PT Smart Tbk). Jurnal Vokasi Teknologi Industri, 6.