

PERHITUNGAN KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Di PT. PLN (Persero) ULP PUTUSSIBAU

M Firmansyah Pratama¹⁾, Dr. Ir. M. Iqbal Arsyad, M.T., IPM²⁾, Zainal Abidin, S.T., M.Eng³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura Pontianak

Email : mfirmaryahpratama@gmail.com

ABSTRAK

Jaringan tegangan rendah merupakan sistem distribusi sekunder yang terdiri dari sistem tiga fasa empat kawat fasa R, S, dan T. Ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan arus netral mengalir pada transformator dan dapat mengakibatkan rugi daya Di PT. PLN (Persero) ULP Putussibau. Penelitian ini menghitung pembebanan trafo, ketidakseimbangan beban, arus pada sisi primer, nilai arus netral, rugi-rugi daya dan rugi-rugi energi pada penghantar netral. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada *feeder* Bika rata-rata pembebanan sebesar 28,3234% pada siang hari dan 40,3736% pada malam hari, *feeder* Dogom rata-rata pembebanan sebesar 37,9968% pada siang hari dan 47,1132% pada malam hari, *feeder* Awin rata-rata pembebanan sebesar 22,7093% pada siang hari dan 33,3452% pada malam hari, dan *feeder* Polres rata-rata pembebanan sebesar 42,5979% pada siang hari dan 36,2956% pada malam hari. Pembebanan tertinggi pada siang hari terjadi pada *feeder* Dogom dengan persentase pembebanan sebesar 71,0697%. Pembebanan tertinggi pada malam hari terjadi pada *feeder* Bika dengan persentase pembebanan 88,0315%. Ketidakseimbangan beban pada ULP Putussibau dengan kategori Baik (<10%) terdapat 30 Unit Trafo di siang hari dan 29 Unit Trafo di malam hari, kategori Cukup (10%-<20%) terdapat 34 Unit Trafo di siang hari dan 35 Unit Trafo di malam hari, kategori Kurang (20%-<25) terdapat 8 Unit Trafo pada siang hari dan 8 Unit Trafo pada malam hari, dan kategori Buruk (>=25) terdapat 38 Unit Trafo di siang hari dan 38 Unit Trafo di malam hari. Total rugi-rugi daya pada siang hari 53,58507 kW dan pada malam hari 60,85547 kW. Rugi-rugi energi pada siang hari dengan total 267,9253 kWh dan pada malam hari 304,2773 kWh.

Kata kunci: *Trafo Distribusi, Pembebanan, ketidakseimbangan beban, arus netral, rugi-rugi.*

ABSTRACT

The low voltage network is a secondary distribution system consisting of a three-phase system with four-wire phases R, S, and T. An imbalance between the loads between the phases causes neutral currents to flow in the transformer and can result in power losses at PT. PLN (Persero) ULP Putussibau. This research calculates transformer loading, load imbalance, current on the primary side, neutral current value, power losses, and energy losses in the neutral conductor. The results showed that the Bika feeder's average loading was 28.3234% during the day and 40.3736% at night, the Dogom feeder's average loading was 37.9968% during the day and 47.1132% at night, the Awin feeder has an average loading of 22.7093% during the day and 33.3452% at night and the Polres feeder has an average loading of 42.5979% during the day and 36.2956% at night. The highest loading during the day occurred on the Dogom feeder with a loading percentage of 71.0697%. The highest loading at night occurs on the Bika feeder with a percentage of 88.0315%. Load unbalance at ULP Putussibau with Good category (<10%) there are 30 Transformer Units during the day and 29 Transformer Units at night, Enough category (10% -<20%) there are 34 Transformer Units during the day and 35 Transformer Units in at night, the Poor category (20% -<25) has 8 Transformer Units during the day and 8 Transformer Units at night and the Poor category (>=25) has 38 Transformer Units during the day and 38 Transformer Units at night. Total power losses during the day are 53.58507 kW and at night are 60.85547 kW. Energy losses during the day total 267.9253 kWh and at night 304.2773 kWh.

Keywords: *Distribution Transformer, Loading, load unbalances, neutral current, losses.*

1. Pendahuluan

Tenaga listrik merupakan salah satu sumber tenaga yang sangat diperlukan bagi kehidupan manusia. Tenaga listrik sudah menjadi kebutuhan pokok manusia. Menurut Y. Simamora dan L. Tobing Seiring berkembangnya teknologi, tenaga listrik juga dimanfaatkan untuk mengoperasikan berbagai alat penunjang kehidupan manusia, baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri [1].

Transformator distribusi pada sistem distribusi adalah suatu bagian sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah dan menurunkan tegangan listrik menengah (20 kV) menjadi jaringan tegangan rendah (380 volt / 220 volt), jaringan tegangan rendah merupakan sistem distribusi sekunder yang terdiri dari sistem tiga fasa empat kawat fasa R, fasa S, dan fasa T. Ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan arus netral mengalir pada transformator. Arus netral yang mengalir dapat mengakibatkan rugi-rugi daya pada transformator. Jaringan ini dikatakan seimbangan jika arus yang mengalir pada jaringan sama besar dan jika tidak sama maka beban tidak seimbang [2].

PT. PLN (Persero) ULP Putussibau merupakan penyedia tenaga listrik yang menyuplai dan mendistribusikan kebutuhan listrik untuk wilayah Kota Putussibau dan sekitarnya. Sistem kelistrikan di ULP Putussibau menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) untuk menghasilkan energi listrik. ULP Putussibau membebani kebutuhan listrik 5 *feeder*, diantaranya *feeder* Bika (01) dengan panjang jaringan 65 Kms memiliki 45 GD dan daya terpasang sebesar 4390 kVA, *feeder* Dogom (02) dengan panjang jaringan 6 Kms memiliki 16 GD dan daya terpasang sebesar 2260 kVA, *feeder* Suruk (03) dengan panjang jaringan 135 Kms memiliki 76 GD dan daya terpasang sebesar 5711 kVA, *feeder* awin (04) dengan panjang jaringan 50 Kms memiliki 29 GD dan daya terpasang sebesar 2345 kVA, *feeder* Polres (05) dengan panjang jaringan 6 Kms memiliki 21 GD dan daya terpasang sebesar 3520 kVA. Data-data pada penelitian ini bersumber dari PLN ULP Putussibau. Objek penelitian dilakukan pada transformator distribusi pada 4 *feeder* di ULP Putussibau Pengambilan 4 *feeder* berdasarkan data PT. PLN (Persero) memiliki karakteristik ketidakseimbangan beban cukup tinggi.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Transformator

Transformator merupakan suatu komponen yang terdiri dari dua atau lebih kumparan yang dihubungkan oleh medan magnetik bersama (*mutual magnetic field*), jika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, akan menimbulkan fluks bolak balik yang amplitudonya bergantung pada tegangan dan jumlah lilitan Primer.

Fluks bersama akan menghubungkan kumparan yang lain, yang sekunder, dan akan menginduksikan tegangan didalamnya yang nilainya bergantung dengan jumlah lilitan sekunder [9].

Perhitungan arus di sisi primer pada transformator menggunakan persamaan untuk menghitung ratio belitan transformator yang terhubung pada sisi primer delta dan sisi sekunder sebagai berikut [9]:

$$\frac{V_p}{V_s \times \sqrt{3}} = \frac{I_2}{I_1 \times \sqrt{3}} \quad (1)$$

Keterangan :

- V_p = Tegangan fasa pada sisi primer trafo
- I_1 = Arus fasa pada sisi primer trafo
- V_s = Tegangan fasa pada sisi sekunder trafo
- I_2 = Arus fasa pada sisi Sekunder trafo

Merujuk pada surat edaran direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan trafo distribusi berbasis kaidah Manajemen Aset halaman 8 bagian 6.6.2.6 matrik online Assessment tier-1 pada trafo distribusi menetapkan acuan load reading and profiling persentase ketidakseimbangan arus antara fasa ditunjukkan oleh table 1. [10]:

Tabel 1 Standar Ketidakseimbangan Arus Antara Fasa [10]

| Karakteristik | Health Index | | | |
|----------------------------------|--------------|------------|------------|-------|
| | Baik | Cukup | Kurang | Buruk |
| Ketidakeimbangan Arus Antar Fasa | <10% | 10% - <20% | 20% - <25% | >=25% |

2.2. Ketidakseimbangan Beban

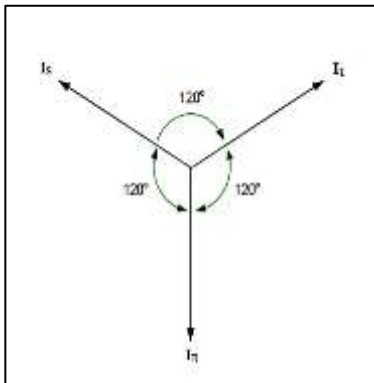
Masalah yang sering timbul pada sistem tiga fasa yaitu beban tidak seimbang, biasanya terjadi karena beban pada salah satu fasa lebih mendominasi dari ketiga fasa tersebut. Jika terjadi ketidakseimbangan beban pada tiga fasa, maka akan mengakibatkan mengalirnya arus pada kawat netral dan perbedaan sudut beban per fasa nya tidak sama dengan 120° [9]. Yang dimaksud dengan keadaan beban seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- a. Ketiga vektor arus/tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu :

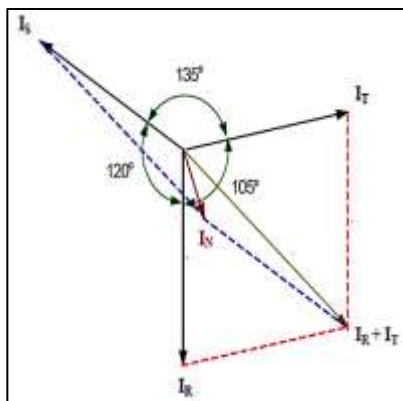
- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.

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



Gambar 1 Vektor diagram arus keadaan seimbang [11]

Dari Gambar 1 menunjukkan vektor diagram dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa perjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak munculnya arus netral.



Gambar 2 Vektor diagram arus keadaan tidak seimbang [11]

Dari Gambar 2 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Dapat dilihat bahwa perjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) adalah tidak sama dengan nol sehingga memicu adanya arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada seberapa besar vektor ketidakseimbangannya.

2.3. Perhitungan Arus Beban Pada Transformator

Daya kerja pada transformator menandakan kapasitas transformator tersebut. Karena sudah diketahui rating tegangan pada sisi primer dan sekunder, maka dapat dirumuskan sebagai berikut [9] :

$$S = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I \quad (2)$$

Keterangan :

- S = Daya pada transformator (kVA)
 V_{LL} = Tegangan line to line sisi sekunder (V)
 I = Arus jala-jala pada transformator (A)

Menghitung arus beban penuh ($I_{\text{beban penuh}}$) dan arus rata-rata ($I_{\text{rata-rata}}$) dapat menggunakan rumus sebagai berikut [9] :

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{LL}} \quad (3)$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (4)$$

Keterangan :

- $I_{\text{beban penuh}}$ = Arus beban penuh (A)
 $I_{\text{rata-rata}}$ = Arus rata-rata (A)
 I_R = Arus Fasa R
 I_S = Arus Fasa S
 I_T = Arus Fasa T

Sedangkan untuk mencari persentase pembebanan pada transformator distribusi dapat digunakan rumus sebagai berikut [9] :

$$\% \text{Pembelian} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{beban penuh}}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan :

- % Pembelian = Persentase pembebanan transformator (%)

2.4. Arus Netral

Arus netral pada sistem distribusi merupakan arus yang mengalir pada penghantar netral pada sistem tiga fasa empat kawat. Munculnya arus netral dapat disebabkan karena ketidakseimbangan beban dan juga karena adanya arus harmonisa sebagai akibat banyaknya penggunaan beban nonlinier.

2.5. Penyaluran dan Susut Daya

Misalnya daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = 3 \times V_{LN} \times I \times \cos \phi \quad (6)$$

Keterangan :

- P = Daya
 V_{LN} = Tegangan line to netral
 $\cos \phi$ = Faktor Daya

Jika I adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fase dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c sebagai berikut [12]:

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}} \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} \quad (7)$$

$$I_S = b \times I_{\text{rata-rata}} \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} \quad (8)$$

$$I_T = c \times I_{\text{rata-rata}} \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} \quad (9)$$

Dengan $I_R, I_S,$ dan I_T berturut-turut adalah arus fase R, S, dan T. Faktor daya ($\cos \phi$) ketiga fase dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = (a + b + c) \times V_{LN} \times I \times \cos \phi \quad (10)$$

Apabila persamaan 10 dan persamaan 6 menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari

kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu :

$$a + b + c = 3 \quad (11)$$

Dimana pada keadaan seimbang, nilai $a = b = c = 1$. Dengan demikian, untuk menentukan prosentase ketidakseimbangan beban rata-rata dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \times 100\% \quad (12)$$

2.6. Rugi-Rugi Pada Sistem Distribusi

Rugi-rugi pada saluran distribusi merupakan kerugian yang diakibatkan oleh perbedaan antara energi listrik yang digunakan dengan energi listrik yang tersalurkan. Rugi-rugi dibedakan menjadi dua yaitu :

- 1) Rugi-rugi pada saluran penghantar fase.
- 2) Rugi-rugi akibat adanya arus netral pada penghantar netral.

2.6.1. Rugi-rugi pada saluran penghantar fase

Apabila arus mengalir menuju penghantar fase maka penghantar akan panas dan menyebabkan rugi-rugi energi karena pada penghantar terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut :

$$P_p = 3 \times I^2 \times R_p \quad (13)$$

Keterangan:

P_p = Rugi daya pada saluran fase (kW)

I = Arus Perfase (A)

R_p = Resistansi (Ω)

2.6.2. Perhitungan Arus Netral

Untuk menghitung arus netral 3 fasa jika diketahui fasa R, S, dan T, dapat dihitung besar arus yang mengalir di fasa netral dengan menggunakan persamaan seperti di bawah ini [13]:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad (14)$$

Akibat dari pembebanan yang tidak seimbang antar fasanya, maka akan ada arus yang mengalir pada penghantar netral. Arus tersebut akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral [13]. Maka dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (15)$$

Keterangan :

P_N = Rugi-rugi daya akibat arus mengalir di netral (kW)

I_N = Arus pada netral transformator (A)

R_N = Resistansi pada penghantar netral (Ω)

2.7. Perhitungan Kerugian Energi yang Terbuang

Kerugian yang dimaksud adalah kerugian materiil yang disebabkan rugi-rugi daya pada

transformator. Setelah mendapatkan nilai rugi-rugi daya pada penghantar netral, maka untuk mendapatkan nilai rugi-rugi energi dapat menggunakan rumus sebagai berikut [14]:

$$E_{loss} = P_N \times Waktu \times Harga \text{ listrik per kWh} \quad (16)$$

Dimana:

E_{loss} = Rugi-rugi energi (Rp)

1 kWh = Rp. 1.444,70 [15]

Waktu = Pada perhitungan ini waktu yang digunakan hanya pada saat LWBP dan WBP

3. Metodologi Penelitian

Penelitian akan dilakukan di PT. PLN ULP Putussibau yang berlokasi di Kabupaten Kapuas Hulu. Pelayanan tenaga listrik pada 4 *feeder* yaitu Bika, Dogom, Awin, dan Polres. Sistem kelistrikan di ULP Putussibau menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) untuk menghasilkan energi listrik.

Peralatan yang digunakan dalam melakukan penelitian ini sebagai berikut:

1. Laptop;
2. Digital Clamp Meter Tang Amper;
3. Kalkulator dan Alat Tulis.
4. Motor sebagai alat transportasi.
5. Software Ms. Excel sebagai alat bantu untuk melakukan perhitungan.

Bahan atau data yang diperlukan antara lain

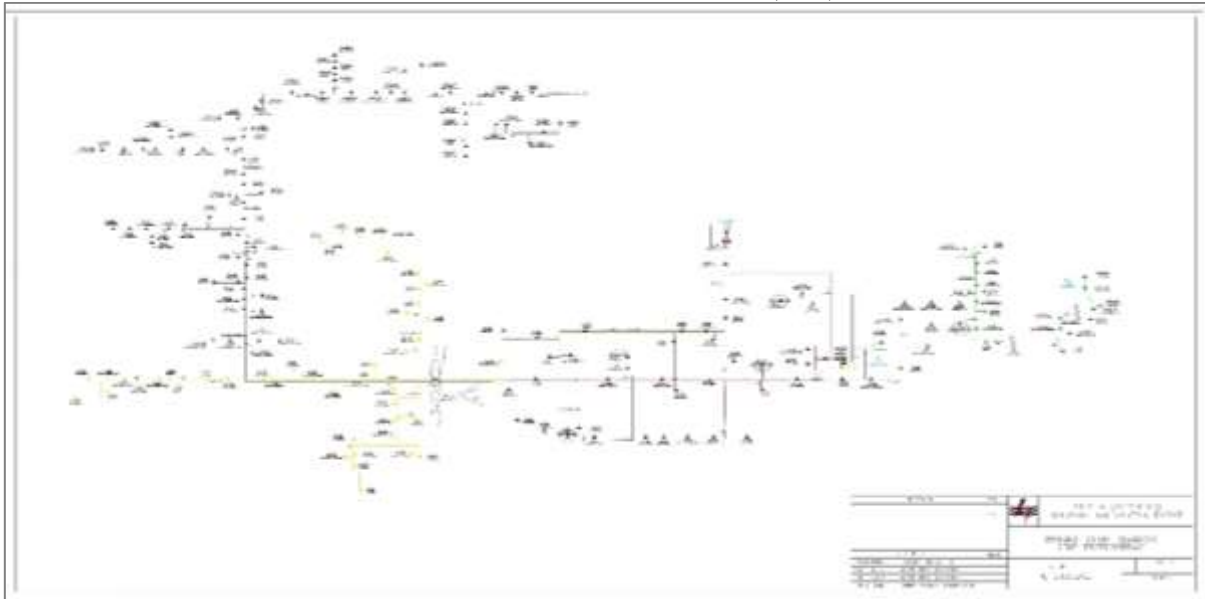
1. Data Kelistrikan ULP Putussibau;
2. Single Line Diagram 4 *feeder* Putussibau;
3. Data Transformator Distribusi 4 *feeder* Putussibau;
4. Kurva Beban Harian 4 *feeder* Putussibau;
5. Data Pembebanan Transformator Distribusi;

Tahapan-tahapan atau metode yang dilakukan dalam penelitian ini:

1. Studi Literatur dengan melakukan pengumpulan data yang didapat melalui penelitian terdahulu, buku dan jurnal;
2. Observasi melalui pengamatan langsung atau peninjauan langsung di lapangan atau lokasi penelitian;

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data diambil dari bulan Januari 2022 sampai dengan bulan Desember 2022. Data-data yang diambil diantaranya:

1. Data kelitrikan ULP Putussibau (SLD)



Gambar 3 SLD Putussibau

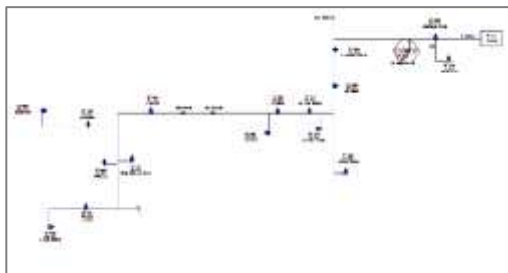
2. SLD 4 Feeder Putussibau



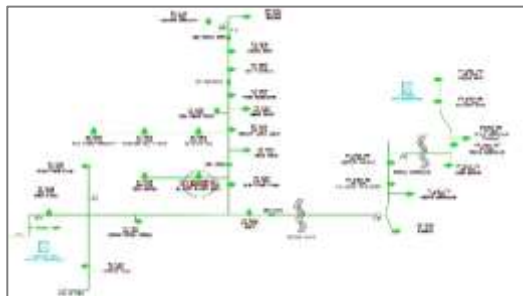
Gambar 4 SLD Feeder Bika



Gambar 7 SLD Feeder Polres

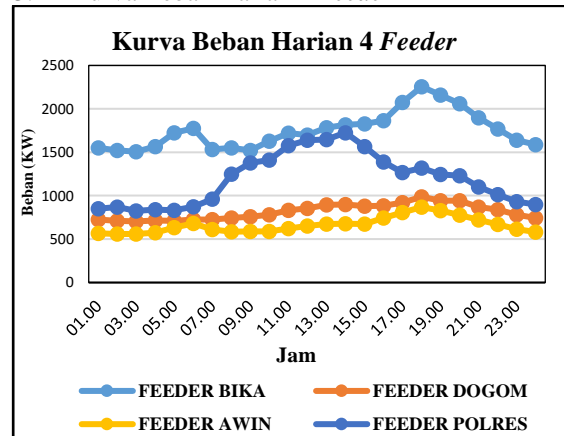


Gambar 5 SLD Feeder Dogom



Gambar 6 SLD Feeder Awin

3. Kurva Beban Harian 4 Feeder



Gambar 8 Beban Harian 4 Feeder

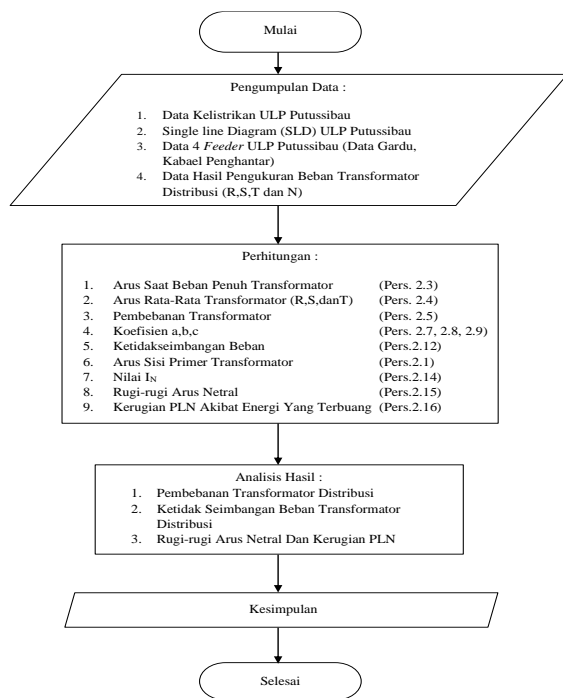
4. Data Pengukuran Transformator

Tabel 2 Feeder Bika

| No | No Trafo | Siang | | | | Malam | | | |
|----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | R (A) | S (A) | T (A) | N (A) | R (A) | S (A) | T (A) | N (A) |
| 1 | PT0003 | 169 | 151 | 92,6 | 74,3 | 220 | 196 | 163 | 61,1 |
| 2 | PT0004 | 25,4 | 20,9 | 55,5 | 30,9 | 41 | 37 | 77 | 54 |
| 3 | PT0007 | 151 | 111 | 144 | 40 | 210 | 179 | 227 | 49,9 |

Dalam penelitian ini akan dilakukan beberapa tahapan penelitian dengan diagram alir (flowchart) seperti pada gambar berikut ini:

Gambar 10 Diagram Alir Perhitungan



Gambar 9 Diagram Alir Penelitian

4. Hasil Dan Anlisis

4.1. Perhitungan dan Analisis Pembebanan

Berdasarkan cara perhitungan yang telah dibahas di Bab II dengan menggunakan data pembebanan transformator digunakan setandar PLN tegangan sekunder transformator distribusi sebesar 380 V. Perhitungan arus beban penuh pada trafo nomor PT0061 acuan data hasil pengukuran pada siang hari dan malam hari sebagai berikut:

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{LL}}$$

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{200.000}{\sqrt{3} \times 380}$$

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{200.000}{658.179306} = 303.86856 \text{ Ampere}$$

Untuk menentukan besarnya arus rata-rata pada transformator dapat menggunakan rumus persamaan 4. Pada setiap transformator dapat dihitung arus rata-rata pada siang hari dan pada malam hari sebagai berikut :

a. Arus rata-rata pada saat pembebanan siang hari.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{214,1 + 141,4 + 103}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = 152,8 \text{ A}$$

b. Arus rata-rata pada saat pembebanan malam hari.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{252,8 + 161,1 + 119,5}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = 177,8 \text{ A}$$

Setelah didapatkan arus rata-rata maka mengetahui berapa besar persentase pembebanan

pada transformator dapat menggunakan rumus persamaan 5. Maka perhitungannya sebagai berikut :

a. Persentase pembebanan pada siang hari.

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{152,8}{303,86856} \times 100\%$$

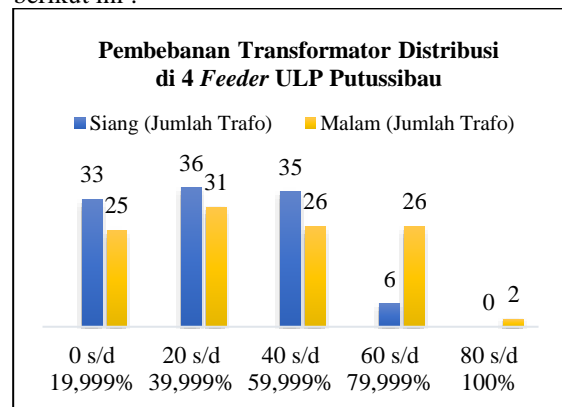
$$\% \text{ Pembebanan} = 50,30\%$$

b. Persentase pembebanan pada malam hari.

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{177,8}{303,86856} \times 100\%$$

$$\% \text{ Pembebanan} = 58,51\%$$

Dari hasil perhitungan pembebanan transformator distribusi di ULP Putussibau untuk memudahkan analisis maka Unit Trafo dikelompokkan berdasarkan persentase pembebanan yang dapat dilihat pada grafik sebagai berikut ini :



Gambar 10 Grafik Pembebanan

4.2. Perhitungan dan Analisis Ketidakseimbangan Beban

Untuk mendapatkan nilai ketidakseimbangan beban maka harus diketahui besarnya koefisien. Untuk menghitung besarnya koefisien a, b, dan c dapat digunakan persamaan 7, sampai 9 sebagai berikut :

Perhitungan Ketidakseimbangan pada trafo nomor PT0061 acuan data hasil pengukuran pada siang hari dan malam hari sebagai berikut :

a. Diketahui arus per-fasa pada siang hari :

$$Fasa R = 214,1 \text{ A}$$

$$Fasa S = 141,4 \text{ A}$$

$$Fasa T = 103 \text{ A}$$

Besarnya koefisien a, b, dan c pada siang hari.

$$a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{214,1}{152,8} = 1,4011$$

$$b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{141,4}{152,8} = 0,9253$$

$$c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{103}{152,8} = 0,6740$$

b. Diketahui arus per-fasa pada malam hari:

$$Fasa R = 252,8 \text{ A}$$

$$Fasa S = 161,1 \text{ A}$$

$$Fasa T = 119,5 \text{ A}$$

Besarnya koefisien a, b, dan c pada malam hari.

$$a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{252,8}{177,8} = 1,4218$$

$$b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{161,1}{177,8} = 0,9061$$

$$c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{119,5}{177,8} = 0,6721$$

Transformator distribusi dalam keadaan seimbang koefisien a, b, dan c sama dengan 1, tetapi dalam keadaan tidak seimbang nilai koefisien a, b, dan c tidak sama dengan 1 atau arus fase tidak sama dengan arus rata-rata.

Setelah didapatkan koefisien a, b, dan c maka mengetahui berapa besarnya ketidakseimbangan beban pada transformator dapat digunakan rumus persamaan 12 sebagai berikut :

a. Ketidakseimbangan beban pada siang hari.

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|1,4011 - 1| + |0,9253 - 1| + |0,6740 - 1|\}}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan beban} = 26,73\%$$

b. Ketidakseimbangan beban pada malam hari.

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|1,4218 - 1| + |0,9061 - 1| + |0,6721 - 1|\}}{3} \times 100\%$$

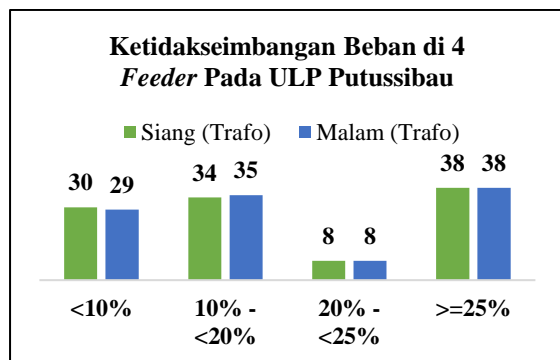
$$\% \text{Ketidakseimbangan beban} = 39,59\%$$

Data hasil perhitungan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di 4 feeder ULP Putussibau dapat dilihat bahwa terdapat transformator distribusi yang dilayani terjadi ketidakseimbangan beban pada siang hari maupun malam hari dengan persentase ketidakseimbangan beban yang berbeda-beda, maka untuk memudahkan analisa data hasil perhitungan ketidakseimbangan beban direkapitulasi berdasarkan persentase pembebanan yang dapat dilihat pada tabel 6 sebagai berikut :

Tabel 6 Rekapitulasi Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi di 4 Feeder

| Persentase | Health Index | Siang (Trafo) | Malam (Trafo) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|
| <10% | Baik | 30 | 29 |
| 10% - <20% | Cukup | 34 | 35 |
| 20% - <25% | Kurang | 8 | 8 |
| >=25% | Buruk | 38 | 38 |
| Jumlah | | 110 | 110 |

Jika dalam bentuk grafik ketidakseimbangan beban pada 4 feeder ULP Putussibau berdasarkan rekapitulasi tabel 6 seperti berikut ini:



Gambar 11 Grafik Pembebanan

4.3. Perhitungan Arus Sisi Primer Transformator Distribusi

Akibat dari ketidakseimbangan beban yang terjadi di sisi sekunder berdampak pada sisi primer

dimana untuk menghitung ketidakseimbangan pada sisi primer feeder maka diperlukan arus yang mengalir pada sisi primer transformator distribusi yang dilayani feeder yang dapat dihitung menggunakan persamaan 1 untuk menghitung rasio belitan transformator dengan diketahui besar arus yang mengalir pada masing-masing fasa sisi sekunder transformator dengan tegangan kerja 20.000/380 Volt maka arus yang mengalir pada sisi primer transformator distribusi sebagai berikut:

Diketahui arus pada sisi sekunder transformator distribusi PT 0061 sebagai berikut:

a. Diketahui Tegangan dan arus per-fasa pada siang hari:

$$\text{Fasa R} = 214,1 \text{ A}$$

$$\text{Fasa S} = 141,4 \text{ A}$$

$$\text{Fasa T} = 103 \text{ A}$$

$$VP \text{ L-L} = 20 \text{ KV} = 20.000 \text{ V}$$

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

Maka arus pada sisi primer transformator distribusi PT 0061 pada siang hari :

$$I_1 \text{ pada fasa R} = \frac{20.000}{380 \times \sqrt{3}} = \frac{214,1}{I_1 \times \sqrt{3}} = 4,0679 \text{ A}$$

$$I_1 \text{ pada fasa S} = \frac{20.000}{380 \times \sqrt{3}} = \frac{141,4}{I_1 \times \sqrt{3}} = 2,6866 \text{ A}$$

$$I_1 \text{ pada fasa T} = \frac{20.000}{380 \times \sqrt{3}} = \frac{103}{I_1 \times \sqrt{3}} = 1,957 \text{ A}$$

b. Diketahui Tegangan dan arus per-fasa pada malam hari:

$$\text{Fasa R} = 252,8 \text{ A}$$

$$\text{Fasa S} = 161,1 \text{ A}$$

$$\text{Fasa T} = 119,5 \text{ A}$$

$$VP \text{ L-L} = 20 \text{ KV} = 20.000 \text{ V}$$

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

Maka arus pada sisi primer transformator distribusi PT 0061 pada malam hari :

$$I_1 \text{ pada fasa R} = \frac{20.000}{380 \times \sqrt{3}} = \frac{252,8}{I_1 \times \sqrt{3}} = 4,8032 \text{ A}$$

$$I_1 \text{ pada fasa S} = \frac{20.000}{380 \times \sqrt{3}} = \frac{161,1}{I_1 \times \sqrt{3}} = 3,0609 \text{ A}$$

$$I_1 \text{ pada fasa T} = \frac{20.000}{380 \times \sqrt{3}} = \frac{119,5}{I_1 \times \sqrt{3}} = 2,2705 \text{ A}$$

4.4. Perhitungan Nilai I_N

Akibat dari ketidaksimbangan beban tersebut maka akan terdapat arus yang mengalir pada fasa netral. Arus yang mengalir pada penghantar netral berbeda saat diukur langsung dan dihitung menggunakan persamaan 14. berikut ini hasil perhitungan I_N pada transformator distribusi PT 0061 dengan menggunakan persamaan 14.

a. Maka arus netral transformator distribusi PT 0061 pada siang hari :

Diketahui:

$$I_R = 214,1 \angle 0^\circ$$

$$I_S = 141,4 \angle -120^\circ$$

$$I_T = 103 \angle -240^\circ$$

Mengubah bilangan polar menjadi bentuk rectangular

$$I_R = 214,1$$

$$\begin{aligned}
I_S &= x \text{ (real)} = 141,4 (\cos (-120^\circ)) = -70,7 \\
& \quad y \text{ (imaginer)} = 141,4 (\sin (-120^\circ)) \\
& = -122,456 \\
& = -70,7 - j122,456 \\
I_T &= x \text{ (real)} = 103 (\cos (-240^\circ)) = -51,5 \\
& \quad y \text{ (imaginer)} = 103 (\sin (-240^\circ)) = 89,20062 \\
& = -51,5 + j89,20062 \\
I_N &= I_R + I_S + I_T \\
I_N &= 214,1 + (-70,7 - j122,456) + (-51,5 + j89,20062) \\
I_N &= 91,90 - j33,2554 \\
I_N &= \sqrt{91,90^2 + (-33,2554)^2} \\
I_N &= 97,7319 \text{ A}
\end{aligned}$$

b. Maka arus netral transformator distribusi PT 0061 pada malam hari :

Diketahui:

$$I_R = 252,8 \angle 0^\circ$$

$$I_S = 161,1 \angle -120^\circ$$

$$I_T = 119,5 \angle -240^\circ$$

Mengubah bilangan polar menjadi bentuk rectangular

$$I_R = 252,8$$

$$I_S = x \text{ (real)} = 161,1 (\cos (-120^\circ)) = -80,55$$

$$\begin{aligned}
& \quad y \text{ (imaginer)} = 161,1 (\sin (-120^\circ)) = -139,52 \\
& = -80,55 - j139,51
\end{aligned}$$

$$I_T = x \text{ (real)} = 119,5 (\cos (-240^\circ)) = -59,75$$

$$\begin{aligned}
& \quad y \text{ (imaginer)} = 119,5 (\sin (-240^\circ)) = 103,49 \\
& = -59,75 + j103,49
\end{aligned}$$

$$I_N = I_R + I_S + I_T$$

$$I_N = 234 + (-80,55 - j139,52) + (-59,75 + j103,49)$$

$$I_N = 112,50 - j36,0267$$

$$I_N = \sqrt{112,50^2 + (-36,0267)^2}$$

$$I_N = 118,1278 \text{ A}$$

4.5. Perhitungan dan Analisis Rugi-Rugi Arus Netral

Akibat dari ketidakseimbangan beban menyebabkan arus menghantar pada fasa netral. Dengan adanya arus yang menghantar pada fase netral maka rugi-rugi yang disebabkan arus yang mengalir pada penghantar netral dapat dihitung menggunakan persamaan 15 dan 16 dimana resistansi penghantar netral pada jaringan sekunder Transformator Distribusi yang menggunakan kabel aluminium TC $3 \times 70 \text{ mm}^2 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$ dengan ukuran penampang 50 mm^2 dimana resistansi kabel sebesar $0,581 \Omega/\text{Km}$ dengan harga listrik per kWh sebesar RP. 1.444,70, sehingga rugi-rugi daya penghantar netral pada trafo nomor PT0061 dapat dihitung sebagai berikut :

Diketahui :

$$I_N \text{ Siang} = 97,73 \text{ Ampere}$$

$$I_N \text{ Malam} = 118,13$$

$$R_N = 0,6 \text{ Km} \times 0,581 \Omega/\text{Km} = 0,3486 \Omega$$

$$\text{LWBP} = 5 \text{ Jam}$$

$$\text{WBP} = 5 \text{ Jam}$$

Rugi-rugi Pada trafo PT0061 siang hari:

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

$$P_N = (97,73)^2 \times 0,3486 \Omega$$

$$P_N = 3.329.5319 \text{ Watt} = 3,3295 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{Loss}} &= P_N \times \text{Waktu} \times \text{Harga Listrik Per kWh} \\
&= 3,3295 \text{ kW} \times 5 \text{ Jam} = 16,6475 \text{ kWh}
\end{aligned}$$

Rugi-rugi Pada trafo PT0061 malam hari:

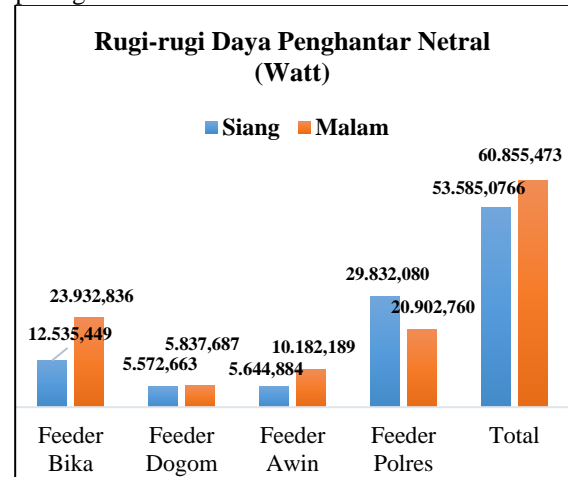
$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$P_N = (118,3)^2 \times 0,3486 \Omega$$

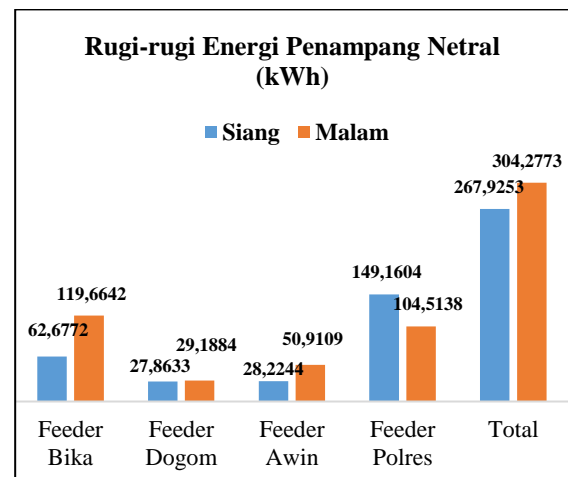
$$P_N = 4.864,60773 \text{ Watt} = 4,8646 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{Loss}} &= P_N \times \text{Waktu} \times \text{Harga Listrik Per kWh} \\
&= 4,8646 \text{ kW} \times 5 \text{ Jam} = 24,323 \text{ kWh}
\end{aligned}$$

Jika dinyatakan dalam bentuk grafik pada 4 feeder ULP Putussibau maka total rugi-rugi daya, rugi-rugi energi pada penghantar netral dapat dilihat pada gambar 12 :



(a) Rugi-Rugi Daya



(b) Rugi-Rugi Energi

Gambar 12 Rugi-Rugi Daya, dan Energi, Penghantar Netral Pada Transformator Distribusi di 4 Feeder ULP Putussibau

4.6. Analisis Hasil Perhitungan

Dari hasil perhitungan pembebanan trafo yang direkapitulasi dalam persentase pembebanan seperti gambar 10 dapat dilihat pembebanan di 4 feeder pada siang hari cukup rendah. Dari total trafo yang dilayani terdapat 110 Unit Trafo yang pembebanannya masih dibawah 80% dan 0 Unit Trafo yang pembebanannya di atas 80%.

Pembebanan trafo pada malam hari dengan beban di bawah 80% berjumlah 108 Unit Trafo dan pembebanan trafo diatas 80% berjumlah 2 Unit Trafo. Pembebanan tertinggi pada malam hari terjadi pada trafo PT0043 di *Fedeer* Bika dengan 88,0315%. Dari pembebanan siang hari dan malam hari terdapat pembebanan tinggi pada siang hari dari pembebanan malam hari dikarenakan pembebanan yang di layani beban umum dan beban komersial

Dari hasil yang ditunjukkan grafik pada gambar 11 ketidakseimbangan beban di 4 *feeder* pada siang dan malam hari terdapat 72 Unit Trafo yang ketidakseimbangan beban dibawah 25% dan terdapat 38 Unit Trafo yang ketidakseimbangan bebannya melewati batas ketentuan SPLN No. 0017.E/DIR/2014 halaman 8 bagian 6.6.2.6 matrik online Assessment tier-1 dimana ketidakseimbangan beban sama dengan/diatas 25%.

Ketidakeimbangan beban trafo tertinggi terjadi pada PT0047 yang berlokasi di Desa Engko Tambe/Abau yang memiliki kapasitas trafo sebesar 25 kVA dengan persentase ketidakseimbangan beban sebesar 133,3333% siang hari dan malam hari. Hal ini terjadi karena pada trafo distribusi tersebut kehilangan daya pada fasa S dan fasa T yang mengakibatkan tidak adanya tegangan dan arus yang mengalir pada fasa tersebut, tetapi pada trafo PT0047 bukan merupakan trafo dengan rugi-rugi daya pada penghantar netral tertinggi di siang hari dan malam hari, hal ini disebabkan karena pembebanan pada trafo PT0047 tidak mengalami overload.

Dari hasil ketidakseimbangan beban di atas dapat kita lihat bahwasanya beban yang mengalami ketidakseimbangan beban di atas 25% rata-rata beban rumah tangga dimana beban ini menggunakan beban satu fasa pada jaringan, dan adanya penggunaan beban listik yang tidak merata.

Cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi besarnya ketidakseimbangan beban yang terjadi di 4 *feeder* pada ULP melakukan pemeriksaan secara berkala beban tiap-tiap fasa pada transformator distribusi sehingga apabila terjadi ketidakseimbangan beban yang besar, beban pada tiap-tiap fasa tersebut dapat segera diseimbangkan dengan cara pemerataan beban.

Diperlukan juga adanya pemeriksaan secara berkala terhadap transformator distribusi yang terkena harmonisa untuk segera diantisipasi.

Solusi ketidakseimbangan beban dengan cara penyeimbangan beban, apabila ada pelanggan satu fasa yang melakukan penyambungan baru maka untuk mengisi pada fasa yang tidak merata pada transformator distribusi.

Dari hasil yang ditunjukkan grafik pada gambar 12 Arus netral yang mengalir pada transformator distribusi pada 4 *feeder* didapatkan total rugi-rugi daya, dan rugi-rugi energi penghantar netral dengan rugi-rugi daya tertinggi terjadi pada malam hari dengan total 60.855,4728 Watt dan pada siang hari

53.585,0766 Watt. Rugi-rugi energi pada siang hari dengan total 267,9253 kWh dan pada malam hari 304,2773 kWh.

5. Penutup

5.1. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis ketidakseimbangan beban pada ULP Putussibau dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Persentase pembebanan di ULP putussibau diantaranya pada *Feeder* Bika memiliki 45 GD dan daya terpasang sebesar 4.390 kVA, dengan pembebanan yang terpakai 51%. *Feeder* Dogom memiliki 16 GD dan daya terpasang sebesar 2.260 kVA, dengan pembebanan yang terpakai 43%. *Feeder* Awin memiliki 29 GD dan daya terpasang sebesar 2.345 kVA, dengan pembebanan yang terpakai 37%. *Feeder* Polres memiliki 20 GD dan daya terpasang sebesar 3520 kVA, dengan pembebanan yang terpakai 49%. Terdapat 2 Unit Trafo dengan pembebanan di atas 80% pada *feeder* Dogom PT0063 berkapasitas 200 kVA yang berlokasi di Bundaran Kodim dengan persentase pembebanan sebesar 85,3439% dan pada *feeder* Bika PT0043 berkapasitas 160 kVA yang berlokasi di JL. Lintas Timur dengan persentase pembebanan sebesar 88,0315%.
2. Berdasarkan persentase Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi ULP Putussibau pada *feeder* Suruk tidak dilakukan perhitungan dikarenakan kurangnya data pengukuran. Didapatkan ketidakseimbangan beban 30 Unit Trafo pada siang hari dan 29 Unit Trafo malam hari dengan persentase di bawah 10% (Baik), terdapat 34 Unit Trafo pada siang hari dan 35 Unit Trafo pada malam hari di persentase 10% - <20% (Cukup), terapat 8 Unit Trafo pada siang hari dan 8 Unit Trafo pada malam hari di persentase 20% - <25% (Kurang) dan 38 Unit Trafo pada siang hari dan 38 Unit Trafo pada malam hari di persentase $\geq 25\%$ (Buruk)
3. Pada 4 *feeder* didapatkan total rugi-rugi daya pada malam hari dengan total 60.855,4728 Watt dan pada siang hari 53.585,0766 Watt. Rugi-rugi energi pada siang hari dengan total 267,9253 kWh dan pada malam hari 304,2773 kWh.

5.2. Saran

Dari hasil penelitian tentang perhitungan ketidakseimbangan beban transformator distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Putussibau untuk meminimalisir kerugian akibat ketidakseimbangan beban maka disarankan hal-hal sebagai berikut :

1. Melakukan pengukuran beban pada trafo distribusi di waktu LWBP dikarenakan dari data PLN ULP Putussibau terdapat data pada waktu LWBP yang tidak ada data pengukuran.

2. Melakukan uprating atau sisipan untuk trafo dengan pembebanan lebih dari 80%.
3. PLN perlu memperhatikan persentase pembebanan dalam melakukan penambahan sambungan baru atau peningkatan daya pelanggan agar tidak melampaui jumlah persentase pembebanan maksimum yang telah ditetapkan.
4. Melakukan pemeriksaan secara berkala beban tiap-tiap fasa pada transformator distribusi sehingga apabila terjadi ketidakseimbangan beban yang besar, beban pada tiap-tiap fasa tersebut dapat segera diseimbangkan dengan cara pemerataan beban.

REFERENSI

- [1]. Y. Simamora and P. S. M. L. Tobing, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih Dan Estimasi Rugi-Rugi Pada Jaringan Tegangan Rendah," *Singuda ENSIKOM*, vol. 7, no. 3, pp. 137–142, 2014.
- [2]. Al-Badi, A., A. Elmoudi, I. M., Al-Wahaibi, A., Al-Ajmi, H., & Al-Bulushi, M. (2011). *Losses Reduction in Distribution Transformers*. International Multi Conference of Engineers and Computer Sciences.
- [3]. Irwan Nas 2017. "Analisis pembebanan transformator distribusi di PT.PLN (Persero) Rayon Jeneponto", Skripsi Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makasar.
- [4]. Ahmad Saiful Aprilian Ektianto, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Rayon Cepu" *J. Tek. Elektro, SIMETRIS* Vol. 15, No. 1, Juli 2021, e-ISSN 2686-312X.
- [5]. Wayan Yoga Prasetya 2020 "Analisis Ketidakseimbangan Beban Dan Harmonisa Pada Transformator Distribusi Mi 0096 Penyulang Abianbase" *J. Tek. Elektro, F. Tek Universitas Udayana SPEKTRUM* Vol. 7, No. 1 Maret 2020.
- [6]. Try Marwanto 2021 "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada *Feeder* Sejangkung Di PT.PLN (persero) ULP Sambas" *J. Tek. Elektro F. Tek Universitas Tanjungpura*.
- [7]. Mahmud Patilima 2022 "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap *Losses* dan Pembebanan Transformator Distribusi" *J. Tek. Elektor F. Tek Universitas Ichsan Gorontalo ELECTRICHSAN* Volume 11 No. 1 Periode April 2022 pISSN: 2252-8237 Hal 20-28.
- [8]. Egi Suyandi 2017 "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Area Rayon Yogyakarta Kota Di PT.PLN (Persero) APJ Gedong Kuning Yogyakarta" *J. Tek. Elektor F. Teknologi Industri, Institut Sains & Teknologi Akprind. ELEKTRIKAL*, Volume 4 No. 2, Desember 2017, 1-10.
- [9]. Kadir, Abdul. 1989. *Transformator*, Penerbit: PT. Alex Media Komputindo. Jakarta.
- [10]. Acuan Load Reading and Profiling Persentase ketidakseimbangan arus antar fasa. No. 0017.0017.E/DIR/2014. PT. PLN (Persero) Surat Edaran Direksi tentang Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset halaman 8 bagian 6.6.2.6. Tahun 2014.
- [11]. S. Hartono, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada *Feeder* Senggiring I Di PT. PLN (Persero) Area Singkawang," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, vol. 1, 2019.
- [12]. Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia, 1988.
- [13]. Moelyono Nono, 1991. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Surabaya: ITS.
- [14]. Sudaryatno Sudirham, 1991. *Pengaruh Ketidakseimbangan Arus Terhadap Susut Daya pada Saluran*, Bandung: ITB, Tim Pelaksana Kerjasama PLN-ITB.
- [15]. Permen-ESDM-No.-28-Tahun-2016, Tentang: Tarif Tenaga Listrik perusahaan PT. PLN (Persero).
- [16]. Afriansyah "Studi Pengaruh Beban Puncak Terhadap Susut Umur Transformator di PT PLN (Persero) Rayon Daya". *J. Tek. Elektro*, Vol.16 No.2 e-ISSN 2656-0143.
- [17]. Sapiee, Soedjana. Osamu Nishino. 2000. *Pengukuran Dan Alat-Alat Ukur Listrik*, PT. Pradinya Pratama: Jakarta

Biografi



M Firmansyah Pratama, lahir di Putussibau pada tanggal 25 Oktober 1999. Menempuh Pendidikan Strata 1 (S1) Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura sejak tahun 2018. Memperoleh gelar sarjana (S1) pada tahun 2023 dengan konsentrasi Teknik Tenaga Listrik. Penelitian ini diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro konsentrasi Teknik Tenaga Listrik Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.

Menyetujui :
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. M. Iqbal Arsyad, M. T., IPM
NIP. 196609071992031002

Pembimbing Pembantu,



Zainal Abidin, S. T., M.Eng
NIP. 198605072019031008