

Analisis Jatuh Tegangan Pada Jaringan Tegangan Rendah (Jtr) 380/220 Volt Gardu Distribusi Ktatnt020 BTN Kanawa

Annisa Qurraisyn¹, Hamles L. Latupeirissa², Elisabeth T. Mbitu³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ambon

¹polnamtrskm@gmail.com, ²hamleslatupeirissa@gmail.com,

³elisabethtansianambitu@gmail.com

Abstract - One of the reliability requirements for an electric power distribution system that must be met for service to consumers is good and stable voltage quality. Most loads have a lagging power factor and basically during peak loads, the reactive power required by the load increases and can be greater than that generated by the system. Voltage changes are basically caused by the relationship between voltage and reactive power. The voltage drop in a conductor is proportional to the reactive power flowing in the conductor. In the period of ± 2 years (2021-2023), the increase in load on the KTATNT020 distribution substation is quite significant without considering the cross-sectional area of the conductors. This has an impact on consumers, where there is a difference between the base end voltage (220 V) and the end end voltage (210.1 V) with a conductor length of ± 1.94 km, the voltage regulation that occurs at the house connection on this line is 1.6 %. The results of power flow calculations (load flow) using AAAC 25 mm² and 16 mm² channel cables, there is a voltage drop of 2.86 \div 3.52 Volts on all buses, voltage regulation for all buses is above 1%. Based on (SPLN No. 56-1, 1993), the tolerance for voltage drops on house connections (SR) is allowed to be 1% of the nominal voltage, so that all nodes or buses have exceeded the maximum allowable tolerance limit. The results of the power flow calculation (load flow) after replacement using AAAC 35 mm² and 25 mm² channel cables, there is a voltage drop of 0.22 \div 0.3 Volts on all buses, voltage regulation for all buses is below 1%.

Keywords: Channel Cross-sectional Area, Distribution Network, Voltage Drop, Voltage quality

Abstrak - Salah satu persyaratan keandalan sistem penyaluran tenaga listrik yang harus dipenuhi untuk pelayanan kepada konsumen adalah kualitas tegangan yang baik dan stabil. Sebagian besar beban memiliki faktor daya tertinggal dan pada dasarnya saat beban puncak, daya reaktif yang dibutuhkan beban meningkat dan dapat lebih besar dari yang dibangkitkan oleh sistem. Perubahan tegangan pada dasarnya disebabkan oleh adanya hubungan antara tegangan dan daya reaktif. Jatuh tegangan dalam penghantar sebanding dengan daya reaktif yang mengalir dalam penghantar tersebut. Pada kurun waktu ± 2 tahun (2021-2023), penambahan beban pada gardu distribusi KTATNT020 yang cukup signifikan tidak memperhitungkan luas penampang penghantar. Hal ini memberikan dampak pada konsumen, dimana terjadi perbedaan antara tegangan ujung pangkal (220 V) dan tegangan ujung akhir (210,1 V) dengan panjang penghantar $\pm 1,94$ km, regulasi tegangan yang terjadi pada sambungan rumah jalur ini adalah 1,6 %. Hasil perhitungan aliran daya (load flow) dengan menggunakan kabel saluran AAAC 25 mm² dan 16 mm², terjadi jatuh tegangan sebesar 2,86 \div 3,52 Volt pada semua bus, regulasi tegangan (voltage regulation) untuk semua bus diatas 1 %. Berdasarkan (SPLN No 56-1, tahun 1993), toleransi jatuh tegangan pada sambungan rumah (SR) dibolehkan 1% dari tegangan nominal, dengan demikian semua node atau bus telah melewati batas toleransi maksimum yang diijinkan. Hasil perhitungan aliran daya (load flow) setelah pergantian dengan menggunakan kabel saluran AAAC 35 mm² dan SR 25 mm², terjadi jatuh tegangan sebesar 0,22 \div 0,3 Volt pada semua bus, regulasi tegangan (voltage regulation) untuk semua bus dibawah 1%.

Kata kunci: Luas Penampang Saluran, Jaringan Distribusi, Jatuh Tegangan, kualitas tegangan

I. PENDAHULUAN

Beban listrik yang digunakan umumnya bersifat induktif dan kapasitif. beban induktif membutuhkan daya reaktif seperti trafo pada rectifier, motor induksi (AC) dan lampu TL, sedangkan beban kapasitif mengeluarkan daya reaktif. Daya reaktif merupakan daya yang tidak berguna sehingga tidak dapat diubah menjadi tenaga dan akan diperlukan untuk proses transmisi energi listrik pada beban. Jadi yang menyebabkan pemborosan energi listrik adalah banyaknya peralatan yang bersifat induktif [1]. Hal ini berarti dalam penggunaan energi listrik, pelanggan tidak hanya dibebani oleh daya aktif (kW) saja tetapi juga daya reaktif (kVAR). Penjumlahan kedua daya itu akan menghasilkan daya nyata (VA) yang merupakan daya yang disuplai oleh PLN.

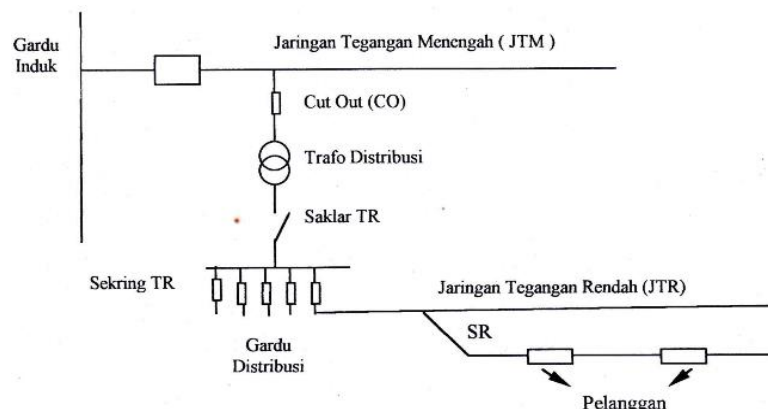
Salah satu persyaratan keandalan sistem penyaluran tenaga listrik yang harus dipenuhi untuk pelayanan kepada konsumen adalah kualitas tegangan yang baik dan stabil [2]. Meskipun kelangsungan catu daya dapat diandalkan, namun belum mungkin untuk mempertahankan tegangan tetap pada sistem distribusi, karena jatuh tegangan akan terjadi di semua bagian sistem dan akan berubah dengan adanya perubahan beban. Sebagian besar beban memiliki faktor daya tertinggal dan pada dasarnya saat beban puncak, daya reaktif yang dibutuhkan beban meningkat dan dapat lebih besar dari yang dibangkitkan oleh sistem. Penambahan daya reaktif dan luas penampang saluran pada sistem memungkinkan diperoleh perbaikan pada sistem berupa profil tegangan yang baik, dan losses daya yang lebih kecil. Perubahan tegangan pada dasarnya disebabkan oleh adanya hubungan antara tegangan dan daya reaktif. Jatuh tegangan dalam penghantar sebanding dengan daya reaktif yang mengalir dalam penghantar tersebut.

Hasil pengamatan dan pengukuran sementara pada perumahan yang dilayani oleh jaringan distribusi gardu BTN Kanawa ini menunjukkan adanya jatuh tegangan, dimana tegangan terukur adalah 216,98 Volt. Penelitian ini diharapkan nantinya dapat memberikan solusi yang sangat konstruktif, sehingga losses akibat resistansi pada saluran dapat dikurangi dan kebutuhan arus menurun serta tegangan kembali normal 220 Volt.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi

Jaringan setelah keluar dari GI biasa disebut jaringan distribusi. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui distribusi primer, kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan rendah, kemudian disalurkan melalui Jaringan Tegangan Rendah untuk selanjutnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN melalui sambungan rumah.



Gambar 1. Jaringan Distribusi Tegangan Menengah (JTM), Tegangan Rendah (JTR) dan Sambungan Rumah ke Pelanggan

Dalam pendistribusian tenaga listrik ke konsumen, tegangan yang digunakan bervariasi tergantung dari jenis konsumen yang membutuhkan. Untuk konsumen industri biasanya digunakan tegangan menengah 20kV sedangkan untuk konsumen perumahan digunakan tegangan rendah 220/380 V.

Dengan demikian maka sistem distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian sistem yaitu:

a. Sistem Distribusi Primer

Tingkat tegangan yang digunakan pada sistem distribusi primer adalah meliputi tegangan menengah 20kV, oleh karena itu sistem distribusi ini sering disebut dengan sistem distribusi tegangan menengah.

b. Sistem Distribusi Sekunder

Tingkat tegangan yang digunakan pada sistem distribusi sekunder adalah tegangan rendah 220/380 volt, oleh karena itu sistem distribusi ini sering disebut dengan sistem distribusi tegangan rendah. Sistem jaringan yang digunakan untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik tersebut dapat menggunakan sistem satu fasa dengan dua kawat maupun sistem tiga fasa dengan empat kawat.

2.2 Tegangan Jatuh (*Drop Tegangan*)

Daryanto (2010) menyatakan bahwa tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Tegangan jatuh V pada penghantar semakin besar jika arus I di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar R_l semakin besar pula. Tegangan jatuh merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas dasar hal tersebut maka tegangan jatuh yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya.

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh PLN (SPLN), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 2%. Tegangan jatuh pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan reaktansi (X). Jatuh tegangan phasor V_d pada suatu penghantar yang mempunyai impedansi (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan dengan rumus [3].

$$V_d = I.Z \quad (1)$$

Dalam pembahasan ini yang dimaksudkan dengan jatuh tegangan (ΔV) adalah selisih antara tegangan kirim (V_s) dengan tegangan terima (V_r), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan adalah [3]

$$\Delta V = (V_s) - (V_r) \quad (2)$$

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relative dinamakan regulasi tegangan V_R (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh rumus [3]

$$V_R = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (3)$$

dimana :

V_R : regulasi tegangan

V_s = tegangan pada pangkal pengiriman

V_r = tegangan pada ujung penerimaan

Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor dayanya ($\cos \phi$) antara 0,6 s/d 0,85. Jatuh tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut [3]

$$\Delta V = I (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi) L \quad (4)$$

dimana :

I = Arus beban (Ampere)

R = Tahanan rangkaian (Ohm)

X = Reaktansi rangkaian (Ohm)

L = Panjang penghantar (m)

2.3 Penyebab Terjadinya Tegangan Jatuh

Besar kecilnya jatuh tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

1. Tahanan saluran
2. Arus saluran
3. Faktor daya (Cos ϕ)
4. Panjang saluran

Akibat adanya impedansi saluran dan beban maka antara tegangan sumber (V_s) dan tegangan penerima (V_r) ada perbedaan. Dimana tegangan penerima akan selalu lebih kecil dari tegangan sumber ($V_s > V_r$). Selisih tegangan tersebut disebut jatuh tegangan (ΔV). Secara umum jatuh tegangan adalah $\Delta V = V_s - V_r$.

1. Besar beban pada suatu titik (tiang) tidak sama pada fasa yang satu dengan fasa yang lainnya, walaupun dilihat dari gardu, beban tiap fasanya mungkin sama besar diantaranya disebabkan oleh perilaku beban konsumen yang tidak teratur.
2. Beban dilihat dari gardu tidak sama untuk masing – masing fasa, sudah pasti beban ditiap tiang tidak sama.
3. Pembagian atau penempatan beban di masing- masing fasa tidak sama.

2.4 Pengaturan Tegangan dan Jatuh Tegangan

Menurut standar perusahaan umum listrik Negara (SPLN) No 56-1, tahun 1993 [4], jatuh tegangan yang diijinkan pada masing-masing jenis sambungan, sebagai berikut:

1. Jatuh tegangan pada jaringan tegangan menengah (JTM) dibolehkan:
 - a. 2% dari tegangan kerja sebagaimana tercantum pada ayat 22 bagi sistem yang tidak memanfaatkan STB (yaitu sistem Spindel dan Gugus).
 - b. 5% dari tegangan kerja bagi sistem yang memanfaatkan STB yaitu sistem radial di atas tanah dan sistem simpul.
2. Jatuh tegangan pada transformator distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja.
3. Jatuh tegangan pada sambungan tegangan rendah (STR) dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.

Jatuh tegangan pada sambungan rumah (SR) dibolehkan 1% dari tegangan nominal.

2.5 Perhitungan Arus Beban Penuh Trafo

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut [5]:

$$S = \sqrt{3}.V.I \text{ (VA)} \quad (5)$$

dimana:

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi primer transformator (kV)

I = Arus jala-jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*), dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}.V} \quad \text{(Ampere)} \quad (6)$$

dimana :

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi sekunder transformator (kV)

2.6 Analisis Aliran Daya

Didalam sistem tenaga listrik, daya mengalir dari sumber-sumber daya ke pusat-pusat beban melalui sistem transmisi. Dalam proses ini, banyak hal-hal yang perlu mendapat perhatian antara lain keadaan tegangan setiap bus, aliran daya MW dan MVAR dalam setiap cabang dan lain-lain. Saat ini sistem tenaga listrik telah berkembang menjadi sangat besar dan kompleks dan sejalan dengan perkembangan komputer dewasa ini, perhatian tentang hal-hal tersebut diatas dapat dilakukan dengan bantuan komputer. Keterangan utama yang didapat dari studi aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan, daya reaktif, daya aktif yang dibangkitkan generator dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap cabang. Studi aliran daya banyak dilakukan untuk perencanaan sistem baru atau untuk perluasan sistem yang ada. Studi ini juga digunakan untuk mengevaluasi sistem tenaga listrik terhadap pengaruh kondisi pembebanan yang berbeda. Studi-studi seperti hubung singkat, stabilitas, pembebanan ekonomis juga memerlukan studi aliran daya terlebih dahulu.

Sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem jaringan yang membawa tenaga listrik. Oleh karena itu, setiap titik/bus terdapat daya aktif P , daya reaktif Q dan tegangan E . Tegangan biasanya dinyatakan dalam besar dan sudut fasanya. Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , E dan δ . Didalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. berdasarkan hal tersebut diatas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun.

1). Bus beban

Pada bus ini, selisih daya antara daya yang dibangkitkan oleh generator dan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya.

2). Bus generator

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif P , sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q .

3). Bus berayun

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif P dan daya reaktif Q . Umumnya dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

III. METODE

3.1 Jenis Penelitian

Jenis yang digunakan dalam penelitian ini adalah Survey Research (penelitian survei), dimana tidak dilakukan perubahan atau tidak ada perlakuan khusus terhadap variabel yang diteliti.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini di laksanakan di PT. PLN (Persero) Area Ambon, penyulang Wayame 1, khususnya pada gardu dan jaringan distribusi tegangan rendah (sekunder) 380/220volt gardu distribusi BGLWY1036 Lorong Service Desa Rumah Tiga.

3.3 Waktu Penelitian

Waktu penelitian Analisa Kerugian Tegangan Pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) 380/220 Volt gardu distribusi BGLWY1036 Lorong Service Desa Rumah Tiga, dilaksanakan selama 1 bulan.

3.4 Jenis Data Penelitian

Jenis data yang diperlukan untuk melakukan analisis perhitungan, sebagai berikut:

1. Data Primer

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran, yakni :

- Data trafo distribusi gardu BGLWY1036 Rumahtiga.
- Data arus dan tegangan, gardu distribusi BGLWY1036 Rumahtiga.

2. Data Sekunder

Data yang diperoleh dari referensi (buku, jurnal, dan PLN), yakni :

- Data spesifikasi transformator
- Data standar jenis-jenis dan ukuran saluran/kabel

3.5 Variabel Analisis Hasil Penelitian

Variabel yang digunakan dalam menganalisis hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 1
Variabel Analisis

No	Variabel	Simbol	Satuan
1	Ketidakseimbangan beban trafo		%
2	Losses akibat adanya arus pada penghantar netral trafo	P_N	Watt
3	Losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah	P_G	Watt

3.6 Metode Analisis

Analisis perhitungan ketidakseimbangan beban pada penelitian ini, difokuskan pada :

- Arus beban penuh trafo.
- Arus rata-rata trafo pada siang dan malam hari.
- Presentasi pembebanan trafo pada siang dan malam hari.
- Ketidakseimbangan beban trafo pada siang dan malam hari.
- Losses akibat adanya arus pada penghantar netral trafo untuk Luas Penampang Penghantar Netral 50 mm² pada siang dan malam hari.
- Losses akibat adanya arus pada penghantar netral trafo untuk luas penampang penghantar netral 70 mm² pada siang dan malam hari.
- Losses akibat adanya arus pada penghantar netral trafo untuk luas penampang penghantar netral 95 mm² pada siang dan malam hari.
- Losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah pada siang dan malam hari.
- Kesimpulan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

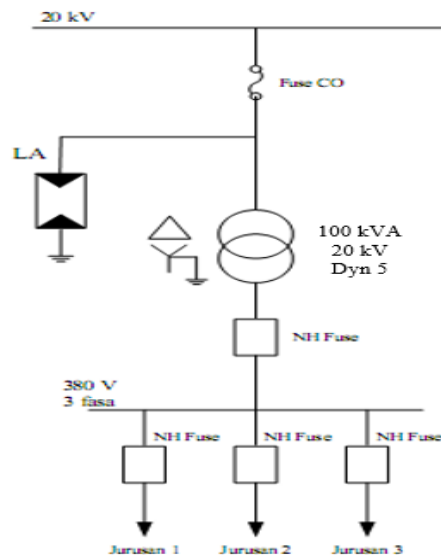
Hasil penelitian, diperoleh dari (i) sumber data PT (Persero) PLN Cabang Ambon, (ii) pengukuran pada ujung penghantar. Hasil dan data yang diperoleh pada bulan Mei 2023. Deskripsi Gardu BGLWY1036 Rumah Tiga:

Buatan Pabrik	: Sintra
Tipe	: Outdoor
Daya	: 100 kVA
Tegangan Kerja	: 20 kV / 400 V
Arus	: 5 – 250 A
Hubungan	: Dyn5
Impedansi	: 4%
Jumlah Trafo	: 1 x 3 phasa

Trafo Distribusi dan Single Line 100kVA dan Single line trafo distribusi 100 kVA, masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Trafo Distribusi 100 kVA



Gambar 3. Single line trafo distribusi 100 kVA

Data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2.

Hasil pengukuran trafo distribusi 100 kVA siang hari

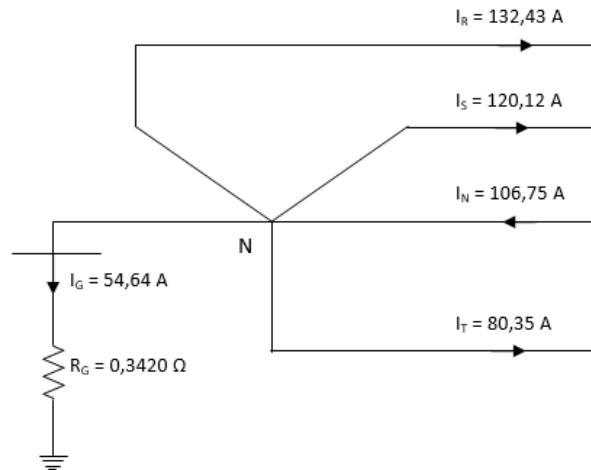
Phasa	S (kVA)	Vp (Volt)	I (Ampere)	Cosφ
R	28,61	216	132,43	0,82
S	26,17	218	120,12	0,84
T	17,68	220	80,35	0,85
I_N	106,75 A			
I_G	54,64 A			
R_G	0,3420 Ω			

Tabel 3.

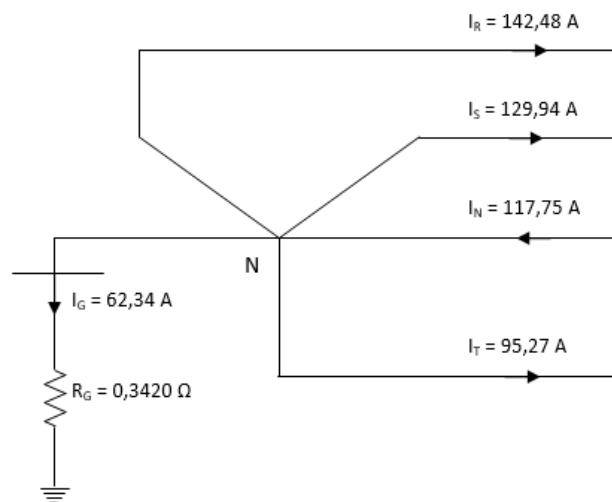
Hasil pengukuran trafo distribusi 100 kVA malam hari

Phasa	S (kVA)	Vp-n (Volt)	I (Ampere)	Cosφ
R	36,70	216	142,48	0,81
S	31,70	217	129,94	0,82
T	26,21	219	95,27	0,84
I_N	117,08 A			
I_G	62,34 A			

Ukuran kawat kabel netral trafo adalah 50 mm² (AAAC) dengan $R = 0,6452 \Omega/\text{km}$, kawat kabel phasanya adalah 70 mm² (AAAC) dengan $R = 0,4608 \Omega/\text{km}$, kawat kabel phasanya adalah 95 mm² (AAAC) dengan $R = 0,3096 \Omega/\text{km}$. Ukuran kabel pentanahan trafo adalah 70 mm² (XLPE) dengan $R = 0,3420 \Omega/\text{km}$. Skema Aliran Arus disisi sekunder pada siang dan malam hari ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Skema Aliran Arus di Sisi Sekunder Trafo pada Siang Hari.



Gambar 5. Skema Aliran Arus di Sisi Sekunder Trafo pada Malam Hari.

4.2 Pembahasan

4.2.1. Perhitungan Pembebanan Trafo

a. Arus Beban Penuh Trafo

Perhitung arus beban penuh (full load) trafo distribusi, menggunakan persamaan (2):

$$S = 100 \text{ kVA}$$

$$V = 0,38 \text{ kV phasa - phasa}$$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$
$$= \frac{100000}{\sqrt{3} \times 380} = 152,11 \text{ A}$$

b. Arus rata-rata trafo

- Pada siang hari

$$I_R = 132,43 \text{ A}$$

$$I_S = 120,12 \text{ A}$$

$$I_T = 80,35 \text{ A}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{132,43 + 120,12 + 80,35}{3} = \mathbf{110,97 \text{ A}}$$

- Pada malam hari

$$I_R = 142,48 \text{ A}$$

$$I_S = 129,94 \text{ A}$$

$$I_T = 95,27 \text{ A}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{142,48 + 129,94 + 95,27}{3} = \mathbf{122,56 \text{ A}}$$

- c. Persentasi Pembebanan Trafo

- Pada siang hari

$$\%_{TL} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{107,97}{152,114} \times 100\% = \mathbf{72,95\%}$$

- Pada malam hari

$$\%_{TL} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{122,56}{152,114} \times 100\% = \mathbf{80,57\%}$$

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa pada saat malam hari (WBP = Waktu Beban Puncak) persentase pembebanan cukup tinggi yaitu 80,57 %.

4.2.2. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Trafo

- Pada Siang Hari

Dengan menggunakan persamaan (6), koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata ($I_{rata-rata}$).

$$I_R = a \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{132,43}{110,97} = 1,193$$

$$I_S = b \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{120,12}{110,97} = 1,082$$

$$I_T = c \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{80,35}{110,97} = 0,724$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah:

$$= \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\% \\ = \frac{\{|1,193-1| + |1,082-1| + |0,724-1|\}}{3} \times 100\% = \mathbf{18,39\%}$$

- Pada Malam Hari

Dengan menggunakan persamaan (6), koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata ($I_{rata-rata}$).

$$I_R = a \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{142,48}{122,56} = 1,163$$

$$I_S = b \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{129,94}{122,56} = 1,060$$

$$I_T = c \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{95,27}{122,56} = 0,777$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah:

$$= \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\% \\ = \frac{\{|1,163-1| + |1,060-1| + |0,777-1|\}}{3} \times 100\% = \mathbf{14,85\%}$$

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa baik pada siang hari maupun malam hari, ketidakseimbangan beban masih dalam toleransi dari batas maksimum nilai ketidakseimbangan beban yang di asumsikan PLN yakni sebesar 20%. (I Gede Budiayasa, dkk. 2021, hal. 286)

4.2.3. Perhitungan Losses Akibat Adanya Arus pada Penghantar Netral Trafo

a. Luas Penampang Penghantar Netral 50 mm²

- Pada Siang Hari

Dari tabel pengukuran, dan dengan menggunakan persamaan (3), *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo dapat dihitung besarnya, yaitu:

$$\begin{aligned} I_N &= 106,75 \text{ A} \\ R_N &= 0,6452 \Omega \\ P_N &= I_N^2 \times R_N \\ &= 106,75^2 \times 0,6452 = \mathbf{7352,42 \text{ Watt} \approx 7,352 \text{ kW}} \end{aligned}$$

dimana daya aktif trafo (P):

$$P = S \times \cos \varphi,$$

dimana $\cos \varphi$ yang digunakan adalah 0,85 dan daya semu trafo (S) = 100 Kva

$$P = 100 \times 0,85 = \mathbf{85 \text{ kW}}$$

Sehingga, persentasi *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo adalah:

$$\%_{PN} = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{7,352}{85} \times 100\% = \mathbf{8,650 \%}$$

- Pada Malam Hari

Dari tabel pengukuran, dan dengan menggunakan persamaan (3), *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo dapat dihitung besarnya, yaitu:

$$\begin{aligned} I_N &= 117,08 \text{ A} \\ R_N &= 0,6452 \Omega \\ P_N &= I_N^2 \times R_N \\ &= 117,08^2 \times 0,6452 = \mathbf{8844,23 \text{ Watt} \approx 8,844 \text{ kW}} \end{aligned}$$

Sehingga, persentase *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo adalah:

$$\%_{PN} = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{8,844}{85} \times 100\% = \mathbf{10,405 \%}$$

b. Luas Penampang Penghantar Netral 70 mm²

Untuk meminimalkan *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan luas penampang penghantar netral sebesar 70 mm².

- Pada Siang Hari

Dari tabel pengukuran, dan dengan menggunakan persamaan (3), *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo dapat dihitung besarnya, yaitu:

$$\begin{aligned} I_N &= 106,75 \text{ A} \\ R_N &= 0,4608 \Omega \\ P_N &= I_N^2 \times R_N \\ &= 106,75^2 \times 0,4608 = \mathbf{5251,075 \text{ Watt} \approx 5,251 \text{ kW}} \end{aligned}$$

dimana daya aktif trafo (P):

$P = S \times \cos \phi$, dimana $\cos \phi$ yang digunakan adalah 0,85 dan daya semu trafo (S) = 100 kVA

$P = 100 \times 0,85 = \mathbf{85 \text{ kW}}$

Sehingga, persentase *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo adalah:

$$\%_{PN} = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{5,251}{85} \times 100\% = \mathbf{6,178 \text{ \%}}$$

- Pada Malam Hari

Dari tabel pengukuran, dan dengan menggunakan persamaan (3), *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo dapat dihitung besarnya, yaitu:

$$I_N = 117,08 \text{ A}$$

$$R_N = 0,4608 \ \Omega$$

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

$$= 117,08^2 \times 0,4608 = \mathbf{6316,52 \text{ Watt} \approx 6,317 \text{ kW}}$$

dimana daya aktif trafo (P):

$P = S \times \cos \phi$, dimana $\cos \phi$ yang digunakan adalah 0,85 dan daya semu trafo (S) = 100 kVA

$P = 100 \times 0,85 = \mathbf{85 \text{ kW}}$

Sehingga, persentase *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo adalah:

$$\%_{PN} = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{6,317}{85} \times 100\% = \mathbf{7,431 \text{ \%}}$$

c. Luas Penampang Penghantar Netral 95 mm²

Untuk meminimalkan *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan luas penampang penghantar netral sebesar 70 mm².

- Pada Siang Hari

Dari tabel pengukuran, dan dengan menggunakan persamaan (3), *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo dapat dihitung besarnya, yaitu:

$$I_N = 106,75 \text{ A}$$

$$R_N = 0,3096 \ \Omega$$

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

$$= 106,75^2 \times 0,3096 = \mathbf{3528,066 \text{ Watt} \approx 3,528 \text{ kW}}$$

dimana daya aktif trafo (P):

$P = S \times \cos \phi$, dimana $\cos \phi$ yang digunakan adalah 0,85 dan daya semu trafo (S) = 100 kVA

$P = 100 \times 0,85 = \mathbf{85 \text{ kW}}$

Sehingga, persentase *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo adalah:

$$\%_{PN} = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{3,528}{85} \times 100\% = \mathbf{4,115 \text{ \%}}$$

- Pada Malam Hari

Dari tabel pengukuran, dan dengan menggunakan persamaan (3), *losses* akibat adanya arus pada penghantar netral trafo dapat dihitung besarnya, yaitu:

$$I_N = 117,08 \text{ A}$$

$$R_N = 0,3096 \ \Omega$$

$$P_N = I_N^2 \times R_N \\ = 117,08^2 \times 0,3096 = 4243,912 \text{ Watt} \approx 4,244 \text{ kW}$$

dimana daya aktif trafo (P):

$P = S \times \cos \phi$, dimana $\cos \phi$ yang digunakan adalah 0,85 dan daya semu trafo (S) = 100 kVA

$P = 100 \times 0,85 = 85 \text{ kW}$

Sehingga, persentase *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo adalah:

$$\%_{PN} = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{4,244}{85} \times 100\% = 4,993 \%$$

4.2.4. Perhitungan Losses Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

Losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah pada siang hari dapat dihitung besarnya dengan menggunakan persamaan (4), yaitu:

- Pada Siang Hari

$$P_G = I_G^2 \times R_G, \text{ dimana } I_G = 54,64 \text{ A dan } R_G = 0,3420 \Omega \\ = 54,64^2 \times 0,3096 = 1021,051 \text{ Watt} \approx 1,021 \text{ kW}$$

Dengan demikian persentase *losses*-nya adalah:

$$\%_{PG} = \frac{P_G}{P} \times 100\% = \frac{1,021}{85} \times 100\% = 1,201 \%$$

- Pada Malam Hari

$$P_G = I_G^2 \times R_G, \text{ dimana } I_G = 62,34 \text{ A dan} \\ R_G = 0,4320 \Omega \\ = 62,34^2 \times 0,4320 = 1329,106 \text{ Watt} \approx 1,329 \text{ kW}$$

Dengan demikian persentase *losses*-nya adalah:

$$\%_{PG} = \frac{P_G}{P} \times 100\% = \frac{1,329}{85} \times 100\% = 1,564 \%$$

4.2.5 Perbandingan Losses Pada Trafo Distribusi Menggunakan Luas Penampang Penghantar Netral 50 mm², 70 mm² dan 95 mm²

Pada bagian ini, diberikan perbandingan hasil perhitungan *losses* pada trafo distribusi untuk penggunaan luas penampang penghantar netral 50 mm², 70 mm² dan 95 mm², yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4
Perbandingan losses pada trafo distribusi 100 kVA

R _N (Ω)	Waktu	Ketidak- seimbangan Beban (%)	I _N (A)	P _N (kW)	P _N (%)	I _G (A)	P _G (kW)	P _G (%)
0,5882 (50 mm ²)	Siang	18,39	106,75	7,352	8,650	54,64	1,021	1,201
	Malam	14,85	117,08	8,844	10,405	62,34	1,329	1,564
0,4202 (70 mm ²)	Siang	18,39	106,75	5,251	6,178	54,64	1,021	1,201
	Malam	14,85	117,08	6,316	7,431	62,34	1,329	1,564
0,3096 (95 mm ²)	Siang	18,39	106,75	3,528	4,151	54,64	1,021	1,201
	Malam	14,85	117,08	4,243	4,993	62,34	1,329	1,564

Pada Tabel 4 terlihat bahwa semakin besar arus netral yang mengalir di penghantar netral trafo (I_N) maka semakin besar losses pada penghantar netral trafo (P_N). Demikian pula bila semakin besar arus netral yang mengalir ke tanah (I_G), maka semakin besar losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah (P_G)

Dengan semakin besar arus netral dan losses di trafo, maka efisiensi trafo menjadi turun. Bila

ukuran kawat penghantar netral dibuat sama dengan kawat penghantar phasanya (70 mm²), maka losses arus netralnya akan mengecil.

V. PENUTUP

Berdasarkan analisa data di atas, terlihat bahwa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses daya pada trafo distribusi gardu BGLWY1036 Rumah Tiga dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Losses (rugi) daya akibat adanya arus pada penghantar netral (PN)
2. Pada siang hari losses daya akibat adanya arus pada penghantar netral (PN) sebesar 8,650 %.
3. Pada malam hari losses daya akibat adanya arus pada penghantar netral (PN) sebesar 10,05 %.
4. Losses (rugi) daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah (PG)
5. Pada siang hari losses daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah (PG) sebesar 1,201 %.
6. Pada malam hari losses daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah (PG) sebesar 1,564 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I Gede Budiayasa, dkk. (2021). Rugi – Rugi Daya Akibat Pengaruh Ketidak Seimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada Efektifitas Penggunaan Daya Terpasang. Jurnal SPEKTRUM Vol. 8, No. 1 Maret 2021. Program Studi Teknik Fakultas Teknik Universitas Udayana. Bali: Universitas Udayana.
- [2] Badaruddin. (2012). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon. Laporan Penelitian Teknik Elektro Fakultas Teknik. Jakarta: Universitas Mercubuana
- [3] Daryanto. (2011). Teknik Listrik (Lanjutan), Bandung: Satu Nusa.
- [4] Panitia Revisi PUIL. (2000). Peraturan Umum Instalasi Listrik Indonesia. Jakarta: LIPI
- [5] Sumanto. (1991). Teori Transformator. Yogyakarta: Andi Offset Yogyakarta.