

Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP

Rizky Tambara Ginting¹, Zulfahri², Arlenny³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning Pekanbaru.

Jl. Yos Sudarso Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email : rizkytambaraginting123@gmail.com, zulfahri@unilak.ac.id, arlenny@unilak.ac.id

Submitted : 17 Maret 2022

Accepted: 26 Juni 2022

DOI: 10.31849/sainetin.v6i2.9734

ABSTRAK

Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik, distribusi beban pada awalnya merata, tetapi karena ketidaksamaan waktu pemasangan atau pemakaian. Hal ini menyebabkan ketidakseimbangan beban akibat waktu pemasangan dan pemakaian beban-beban tersebut tidak konsisten, yang berdampak pada penyuplai daya energi listrik. Ketidakseimbangan beban antara masing-masing fasa (fasa R, fasa S dan fasa T) menyebabkan arus mengalir di bagian netral transformator. PLN sebagai pemasok listrik bagi masyarakat harus dapat melayani kebutuhan listrik masyarakat dengan tingkat kualitas yang bagus dan baik. Agar mendapatkan hasil kerja yang *efisien* dan *efektif* perlunya dilakukan produktivitas yang tinggi. Dari analisis ketidakseimbangan beban pada Gardu distribusi ST 263 jalan Kaharuddin Nasution pekanbaru, terhadap arus netral perhitungan terdapat 0.383 kW *losses* pada siang hari dan 0.662 kW pada malam hari, dari simulasi dan perhitungan menggunakan etap *losses* pada siang hari sebesar 0.344 kW dan 0.583 kW pada malam hari. Terdapat selisih sebesar 0.023% pada siang hari dan 0.047% saat perhitungan pengukuran dengan etap. Berdasarkan standar ketidakseimbangan beban, transformator ST 263 200 kVA masih memenuhi standar IEEE std 446-1995 yaitu sebesar 5% - 20%. Semakin besar arus netral I_N yang mengalir di penghantar netral transformator maka semakin besar juga *losses* yang dihasilkan.

Kata Kunci : Ketidakseimbangan, Transformator, Rugi-Rugi, Gardu Distribusi

ABSTRACT

In order to meet the demand for electrical energy, the load distribution was initially evenly distributed, but due to the unequal installation or usage time. This causes a load imbalance due to inconsistent installation time and usage of these loads, which has an impact on the supply of electrical energy. The load imbalance between each phase (R phase, S phase and T phase) causes current to flow in the neutral section of the transformer. PLN as a supplier of electricity for the community must be able to serve the electricity needs of the community with a good and good quality level. In order to get efficient and effective work results, high productivity is needed. From the load imbalance analysis at the ST 263 distribution substation, Jalan Kaharuddin Nasution, Pekanbaru, against the neutral current, there are 0.383 kW losses during the day and 0.662 kW at night, from simulations and calculations using stages the losses during the day are 0.344 kW and 0.583 kW at night. day. There is a difference of 0.023% during the day and 0.047% when calculating the measurements with the stages. Based on the load imbalance standard, the ST 263 200 kVA transformer still meets the IEEE std 446-1995 standard, which is 5% - 20%. The greater the I_N neutral current flowing in the transformer neutral conductor, the greater the losses generated.

Keywords: Unbalance, Transformer, Losses, Distribution Substation

1. PENDAHULUAN

Dalam pendistribusian tenaga listrik, terjadi rugi-rugi daya (*losses*), akibat hilangnya daya tersebut berdampak pada rendahnya keandalan kualitas daya yang dipasok ke konsumen [1]–[3]. Penyebab kerugian terletak pada beberapa faktor,

seperti jarak saluran listrik yang terlalu jauh, beban tidak seimbang, sambungan penghantar, dan lain-lain hal ini. [4] Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik, distribusi beban pada awalnya merata, tetapi karena ketidaksamaan waktu pemasangan atau pemakaian. Hal ini dapat menyebabkan

ketidakseimbangan beban akibat waktu pemasangan dan pemakaian beban-beban tersebut tidak konsisten, yang berdampak pada penyuplai daya energi listrik. Ketidakseimbangan beban antara masing-masing fasa (fasa R, fasa S dan fasa T) menyebabkan arus mengalir di bagian netral transformator [5]–[7].

PT. PLN (Persero) ialah salah satu pemasok listrik terkemuka di Indonesia. Kegiatan PLN meliputi produksi tenaga listrik (pembangkit), penyaluran tenaga listrik (transmisi dan gardu induk), distribusi (jaringan distribusi) dan penjualan tenaga listrik (pelanggan). PLN sebagai pemasok listrik bagi masyarakat harus dapat melayani kebutuhan listrik masyarakat dengan tingkat kualitas yang bagus dan baik. Agar mendapatkan hasil kerja yang *efisien* dan *efektif* perlunya dilakukan produktivitas yang tinggi. Untuk mengetahui susut/losses maka dilakukan analisis untuk menghitung susut dari segi teknis dan non teknis yaitu mengukur beban transformator pada PHB-TR. Dari pengukuran tersebut akan digunakan sebagai bahan untuk menganalisis kerugian (*losses*) akibat adanya ketidakseimbangan beban ataupun beberapa parameter yang mempengaruhi rugi daya tersebut, agar adanya upaya dari pihak perusahaan untuk bisa meminimalisir kerugian. Dengan berdasarkan SPLN No. 50 Tahun 1997 dimana rugi daya yang diijinkan dalam suatu sistem distribusi adalah sebesar 10%, kemudian untuk standar ketidakseimbangan beban diatur dalam IEEE std 446-1995 yaitu sebesar 5% - 20% .

Tujuan dari penelitian ini adalah : a). Menganalisis besarnya rugi-rugi (*losses*) akibat adanya arus netral yang mengalir pada netral transformator distribusi. b). Menganalisis besarnya rugi-rugi (*losses*) teknik dan non teknik pada jaringan tegangan rendahnya. c. Mengetahui jumlah kerugian akibat *losses* pada gardu distribusi ST263. Agar penelitian ini tidak memiliki cakupan yang luas maka penelitian ini diberikan batasan : a). Hanya membahas pengaruh beban tidak seimbang berdasarkan pengukuran beban terhadap arus netral transformator. b). Penulis hanya menghitung *losses* jaringan pada Gardu Distribusi ST 263 Tranformator 200 kVA PT. PLN (Persero) ULP Simpang Tiga Pekanbaru.

2. METODE PENELITIAN

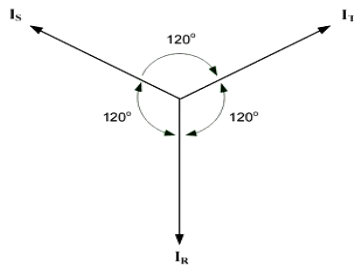
Jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV ialah jaringan distribusi primer, dan merupakan jaringan yang menggunakan saluran udara tegangan menengah (SUTM) atau saluran kabel tegangan menengah (SKTM). Sumber tenaga diperoleh dari

gardu induk atau pusat tenaga listrik. Sementara untuk jaringan distribusi dengan tegangan rendah (TR), 220/380 V disebut jaringan distribusi sekunder, dimana sumber kelistrikannya diperoleh dari gardu distribusi [8].

Gardu Distribusi ialah salah satu komponen sistem distribusi yang digunakan untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau untuk menyalurkan tenaga listrik antar konsumen, baik konsumen tegangan menengah maupun rendah. Definisi umum yang paling dikenal dari gardu distribusi adalah bangunan gardu listrik yang berisi atau terdiri dari instalasi perangkat sambungan tegangan menengah (PHB-TM), transformator distribusi (TD) dan perangkat sambungan distribusi tegangan rendah (PHB-TR) dan tegangan rendah (TR 220/380V).

Transformator biasanya terdiri dari dua atau lebih inti besi yang dililitkan di sekitar gulungan kawat tembaga. Prinsip perubahan tegangan dicapai dengan menggunakan sejumlah besar lilitan pada inti transformator. Ketika tegangan yang bervariasi diterapkan ke salah satu kelompok belitan, biasanya disebut sebagai belitan primer (N_1), itu menciptakan fluks timbal balik yang bervariasi dengan amplitudo yang tergantung pada tegangan, jumlah lilitan kawat tembaga di belitan primer dan frekuensi tegangan. Fluks timbal balik yang terjadi dihubungkan ke belitan lain, yang disebut sekunder (N_2), dan menginduksi tegangan di dalamnya yang bervariasi dengan nilai tegangan yang tergantung pada jumlah belitan pada belitan sekunder [9].

Ketidakeimbangan beban adalah masalah umum dalam sistem tiga fasa, karena dominasi pelanggan satu fasa atas pelanggan tiga fasa. Namun, dengan banyaknya pelanggan 3 fasa, tidak ada jaminan keseimbangan fasa. Jika terjadi ketidakseimbangan beban pada sistem 3 fasa, arus kawat netral akan mengalir dan perbedaan sudut beban per fasa tidak sama dengan 120° , beban transformator yang tidak seimbang akan menyebabkan arus netral. Berikut yang dimaksud dengan keadaan seimbang yaitu keadaan dimana [10]: a). Ketiga vektor tersebut berpotongan membentuk sudut 120° . b). Ketiga vektor membentuk sudut 120 derajat satu sama lain. Hal ini terlihat seperti pada Gambar 1. Vektor saat ini berada dalam kesetimbangan seperti yang ditunjukkan pada gambar. Jumlah ketiga vektor arus I_R , I_N dan I_T adalah nol, sehingga tidak ada arus netral pada transformator.



Gambar 1. Diagram Vektor Dalam Keadaan Arus Seimbang

Persen ketidakseimbangan beban dapat ditentukan dengan koefisien a, b dan c, dimana koefisien a, b dan c membutuhkan arus untuk setiap fase dan arus rata-rata. Maka persamaan untuk koefisien a, b dan c diperoleh sebagai berikut [11].

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (1)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (3)$$

Dalam keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c sama dengan satu. Maka persamaan persen ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$\% = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (4)$$

Arus penghantar netral dalam suatu sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada penghantar netral dalam sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini terjadi ketika: a). Kondisi beban tidakseimbang, dan b). Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear. Arus yang mengalir dalam penghantar netral, yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat, adalah jumlah vektor dari arus tiga fasa dalam komponen simetris. Untuk arus tiga fasa dari sistem yang tidak seimbang, dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Menggunakan notasi yang sama seperti untuk tegangan, mendapatkan persamaan berikut untuk arus fasa [12] :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad (5)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (6)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (7)$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini, jumlah arus utama sama dengan penghantar netral yang mengalir kembali melalui penghantar netral, yaitu menjadi :

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan maka diperoleh :

$$I_N = 3I_0 \quad (9)$$

Arus yang mengalir melalui kabel netral transformator ini menyebabkan rugi-rugi (*losses*). Rugi-rugi dari penghantar netral dirumuskan sebagai berikut [13] :

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

Arus beban penuh dari sisi daya tegangan tinggi pada transformator distribusi dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut [10] :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (11)$$

Mendapatkan perhitungan arus beban penuh (*full load*), maka dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Maka untuk menghitung persentase pembebanan ialah sebagai berikut :

$$\% b = \frac{I_{Ph}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (13)$$

Rugi-rugi besi terdiri dari rugi histeresis dan rugi eddy. Rugi histeresis karena fluks bolak-balik di inti besi dapat dinyatakan sebagai berikut [14] :

$$P_h = K_h \times f \times Bm^2 \quad (14)$$

Sementara itu, rugi-rugi arus eddy akibat arus eddy pada inti besi diberikan sebagai berikut [15]:

$$P^e = K_e \times f^2 \times Bm^2 \quad (15)$$

Nilai rugi-rugi tembaga (P_{Cu}) berubah secara konstan, hal ini dipengaruhi oleh arus beban yang mengalir pada tahanan transformator. Besarnya arus beban ini tergantung pada beban yang dioperasikan oleh transformator, oleh karena itu rugi-rugi tembaga (P_{Cu}) adalah [16] :

$$P_{Cu} = P_{cu1} + P_{cu2} = (I_1^2 \times R_1) + (I_2^2 \times R_2) \quad (16)$$

Perbandingan antara daya *output* dengan dengan daya input ialah efisiensi transformator. Secara sistematis ditulis sebagai berikut [16]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + rugi-rui} \times 100\% \quad (17)$$

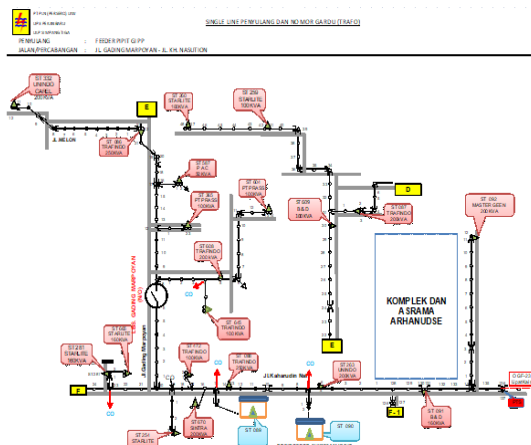
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konstruksi Gardu Distribusi ST 263 mendapat sumber tegangan dari jaringan tegangan menengah yaitu 20 kV kemudian diturunkan menjadi 380/220 V melalui transformator distribusi.



Gambar 2. Konstruksi Gardu Distribusi ST 263

Gambar 3 berikut merupakan *single line* diagram Gardu Distribusi ST 263 Transformator 200 kVA.



Gambar 3. Single Line Diagram Gardu ST263

Hasil Pengukuran Pada Pukul 13.00 Untuk Luar Beban Puncak (LWBP) dan Pukul 20.00 Untuk Waktu Beban Puncak (WBP) Tanggal 01 Februari 2021 transformator distribusi ST 263 dalam Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Hasil Pengukuran LWBP

Pengukuran	Siang (13.00 WIB)
Arus / Beban transformator	R 124,5 A
	S 155 A
	T 112,7 A
	N 40,6 A
Tegangan Transformator	R-N 231 V
	S-N 230 V
	T-N 232 V
	R-S 402 V
	R-T 403V
S-T 405 V	

Hasil dari pengukuran berupa arus dan tegangan. Untuk nilai arus digunakan sebagai

perhitungan pembebanan dan analisa ketidakseimbangan tranformator, untuk arus netral digunakan untuk menghitung rugi arus netral terhadap transformator.

Tabel 2. Hasil Pengukuran WBP

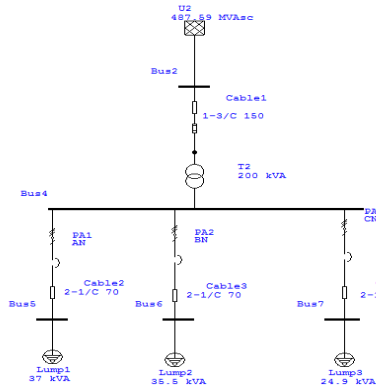
Pengukuran	Malam (20.00 WIB)
Arus / Beban Transformator	R 160 A
	S 153,5 A
	T 107,8 A
	N 48,5 A
Tegangan Transformator	R-N 231 V
	S-N 230 V
	T-N 232 V
	R-S 402 V
	R-T 403 V
S-T 405 V	

Data pada tabel 3. diambil langsung dari kWh banding Gardu Distribusi ST 263 pada tanggal 01 Februari 2021 guna perbandingan hasil dengan pengukuran langsung.

Tabel 3. Data kWh Gardu Distribusi Beban Harian

Waktu	Tegangan			Arus			PF
	R	S	T	R	S	T	
0:00	230.89	231.73	229.67	132.8	122.4	96	0.98
1:00	231.68	232.48	230.68	126.4	120	90.4	0.98
2:00	231.73	231.98	230.11	108	119.2	91.2	0.98
3:00	232.47	232.53	230.63	100	117.6	89.6	0.98
4:00	232.26	232.53	230.46	104	114.4	92	0.98
5:00	231.16	231.3	229.41	97.6	112	92	0.98
6:00	230.25	230.82	229.48	112	127.2	73.6	0.97
7:00	229.55	230.25	228.67	112.8	120	76.8	0.97
8:00	227.33	228.39	226.47	144	143.2	112.8	0.98
9:00	226.14	226.92	225.22	136	159.2	116.8	0.98
10:00	227	227.62	225.68	128.8	162.4	128	0.97
11:00	229.82	230.49	228.63	125.6	154.4	118.4	0.97
12:00	231.45	232.48	230.42	142.4	152.8	123.2	0.98
13:00	230.47	231.01	229.36	124.8	156	112.8	0.98
14:00	227.86	228.63	226.73	143.2	171.2	133.6	0.97
15:00	229.79	230.73	228.88	148	160.8	127.2	0.97
16:00	230.32	231.13	229.36	144	167.2	130.4	0.97
17:00	228.27	229.3	227.54	135.2	147.2	107.2	0.97
18:00	231.93	232.62	230.97	147.2	148.8	110.4	0.98
19:00	229.75	230.11	228.6	159.2	155.2	114.4	0.98
20:00	229.01	229.58	228.17	160.8	154.4	108	0.98
21:00	230.89	231.19	229.53	149.6	160.8	110.4	0.98
22:00	230.42	231.18	229.48	151.2	148	99.2	0.99
23:00	230.87	231.33	229.73	141.6	149.6	103.2	0.98

Berdasarkan pengukuran langsung transformator distribusi yang telah di dapat kemudian disimulasikan dengan ETAP 12.6 sehingga menghasilkan nilai arus dan tegangan yang mengalir pada transformator. Simulasi aliran daya tidak seimbang dilakukan dengan cara memilih *Unbalanced Load Flow Analysis* kemudian menjalankan simulasi dengan memilih *run unbalanced load flow analysis*.



Gambar 4. Single Line Diagram Pembebanan Transformator

Untuk mengetahui pembebanan pada transformator maka arus beban penuh (*Full Load*) atau arus pengenal pada setiap transformator dihitung berdasarkan daya transformator. Transformator distribusi 200 kVA terlihat seperti ini dengan menggunakan persamaan (12) yaitu : $S = 200 \text{ kVA}$, $V = 400 \text{ V}$ (fasa-fasa)

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{200000 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}} = 288.67 \text{ A}$$

Analisis pembebanan transformator distribusi berdasarkan hasil pengukuran pembebanan transformator 200 kVA pada persamaan (13) :

- a. Perhitungan pembebanan pada siang hari (LWBP)

$$I_{\text{rata-rata siang}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{124.5 + 155 + 112.7}{3} = 130.73 \text{ A}$$

$$\%_{OL} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{130.73}{288.67} \times 100\% = 45.28\%$$

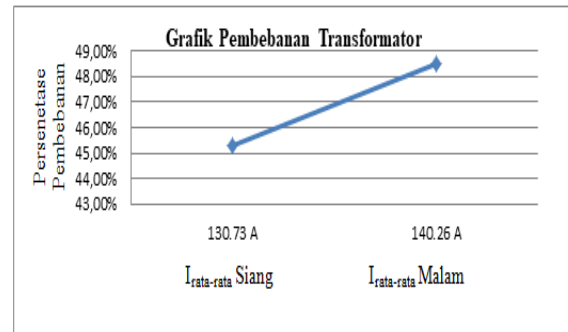
- b. Perhitungan pembebanan malam hari (WBP)

$$I_{\text{rata-rata malam}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{160 + 153.5 + 107.8}{3} = 140.26 \text{ A}$$

$$\%_{OL} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{140.26}{288.67} \times 100\% = 48.49\%$$

Sebagaimana diketahui pembebanan pada saat malam hari (WBP) berada pada pukul 17.00-22.00 WIB. Dari perhitungan dan grafik persentase beban pada transformator berdasarkan hasil pengukuran dapat diketahui bahwa beban pada malam hari atau pada saat beban puncak memiliki beban yang besar, terdapat selisih sebesar 3.21 %. Hal ini dikarenakan konsumen lebih banyak menggunakan beban pada malam hari dibandingkan pada siang hari. Persentase

beban transformator diperbolehkan hingga 80% sehingga transformator ST 263 masih memenuhi standar.



Gambar 5. Grafik Pembebanan Transformator Hasil Pengukuran

Perhitungan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi ST 263

- a. Pada Siang Hari

$$I_R = a \cdot I \Rightarrow a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{160}{140.43} = 1.139$$

$$I_S = b \cdot I \Rightarrow b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{153.5}{140.43} = 1.093$$

$$I_T = c \cdot I \Rightarrow c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{107.8}{140.43} = 0.767$$

$$\%_{UL} = \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\% = \frac{\{|1.139-1| + |1.093-1| + |0.767-1|\}}{3} \times 100\% = 15.5\%$$

- b. Pada Malam Hari

$$I_R = a \cdot I \Rightarrow a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{124}{130.7} = 0.948$$

$$I_S = b \cdot I \Rightarrow b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{155}{130.7} = 1.185$$

$$I_T = c \cdot I \Rightarrow c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{112.7}{130.73} = 0.862$$

$$\%_{UL} = \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100\% = \frac{\{|0.948-1| + |1.185-1| + |0.862-1|\}}{3} \times 100\% = 12.5\%$$

Penampang konduktor netral dari kabel penghantar transformator adalah 70 mm^2 dengan nilai resistansi $R = 0.2324 \text{ Ohm}$. Untuk transformator daya aktif 200 kVA dengan $\cos = 0.85$ sebagai berikut:

$$P = S \cdot \cos\phi = (200) \cdot (0.85) = 170 \text{ kW}$$

Analisis rugi-rugi arus netral transformator Distribusi adalah sebagai berikut

- a. Siang

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N = (40.6)^2 \cdot (0.2324) = 383.07 \text{ Watt} \approx 0.383 \text{ kW}$$

Persentase *losses*:

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{0,383}{170} \times 100\% = 0,225\%$$

b. Malam

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N = (53,4)^2 \cdot (0,2324) = 662,702 \text{ Watt} \approx 0.662 \text{ kW}$$

Persentase *losses* :

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{0,662}{170} \times 100\% = 0.389\%$$

Rugi-rugi transformator terhadap arus netral yang diperoleh dari perhitungan yang dilakukan kemudian dirangkum berdasarkan pengukuran dan hasil simulasi ETAP. Tabel 4 merupakan ringkasan kerugian untuk transformator dan perbedaannya :

Tabel 4. Perbandingan Hasil Pengukuran Dengan Etap

Transfor- mator 200 kVA ST	Waktu	Losses %		Selisih %
		Pengukuran	ETAP	
263	Siang	0,225	0,202	0,023
	Malam	0,389	0,342	0,047

Perhitungan rugi daya pada konduktor jaringan berdasarkan pengukuran pada beban puncak.

a. *Losses* pada fasa R

$$P_r = I_R^2 \times R = 160^2 \times 0,1772 = 4,53 \text{ kW}$$

Persentase *losses* pada fasa R adalah :

$$\%P_R = \frac{P_R}{P} \times 100\% = \frac{4,53}{170} \times 100\% = 2,66\%$$

b. *Losses* pada fasa S

$$P_S = I_S^2 \times R = 153,52 \times 0,1772 = 4,17 \text{ kW}$$

Persentase *losses* pada fasa S adalah :

$$\%P_S = \frac{P_S}{P} \times 100\% = \frac{4,17}{170} \times 100\% = 2,45\%$$

c. *Losses* pada fasa T

$$P_T = I_T^2 \times R = 107,8^2 \times 0,1772 = 2,05 \text{ kW}$$

Persentase *losses* pada fasa S adalah :

$$\%P_T = \frac{P_T}{P} \times 100\% = \frac{2,05}{170} \times 100\% = 1,20\%$$

Rugi-Rugi Tembaga, sesuai dengan ketentuan SPLN 50:1997 hasil nilai hambatan dan impedansi yang besar pada belitan transformator 200 kVA dengan nilai impedansi masing-masing fasa diseimbangkan, mengalami rugi-rugi daya sebesar 2500 Watt. Maka nilai hambatan masing-masing belitan fasa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (16) adalah sebagai berikut :

$$P_{cu} = I_1^2 \times R_{ek1}$$

$$R_{ek1} = \frac{P_{cu}}{I_1^2} = \frac{2500}{288,7^2} = 0,031 \Omega$$

a. Rugi Pada LWBP

$$P_{cuR} = I_R^2 \times R_{ek1} = 124,5^2 \times 0,031 = 0,48 \text{ kW}$$

$$P_{cuS} = I_S^2 \times R_{ek1} = 155^2 \times 0,031 = 0,74 \text{ kW}$$

$$P_{cuT} = I_T^2 \times R_{ek1} = 112,7^2 \times 0,031 = 0,39 \text{ kW}$$

b. Rugi Pada WBP

$$P_{cuR} = I_R^2 \times R_{ek1} = 160^2 \times 0,031 = 0,79 \text{ kW}$$

$$P_{cuS} = I_S^2 \times R_{ek1} = 0,73 \text{ kW}$$

$$P_{cuT} = I_T^2 \times R_{ek1} = 107,8^2 \times 0,031 = 0,36 \text{ kW}$$

Setelah didapatkan hasil rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti, maka rugi-rugi total pada transformator adalah sebagai berikut::

$$\text{Pada LWBP} = \text{Rugi Tembaga} + \text{Rugi Tanpa Beban} = 0,48 + 0,74 + 0,39 + 0,48 = 2,09 \text{ kW}$$

$$\text{Pada WBP} = \text{Rugi Tembaga} + \text{Rugi Tanpa Beban} = 0,79 + 0,73 + 0,36 + 0,48 = 2,36 \text{ kW}$$

Efisiensi Transformator dapat dikalkulasi melalui persamaan (17) dapat dicari berapa efisiensi transformator melalui perhitungan berikut ini:

a. Siang hari

$$P_{out} = (a + b + c) \times V \times I \times \cos \phi = (1,139 + 1,093 + 0,767) \times 403 \times 130,73 \times 0,85 = 45,5 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{145,5}{145,5 + 2,36} \times 100\% = 98,5\%$$

b. Malam hari

$$P_{out} = (a + b + c) \times V \times I \times \cos \phi$$

$$= (0,948 + 1,185 + 0,862) \times 403 \times 140,26 \times 0,85$$

$$= 143,89 \text{ kW}$$

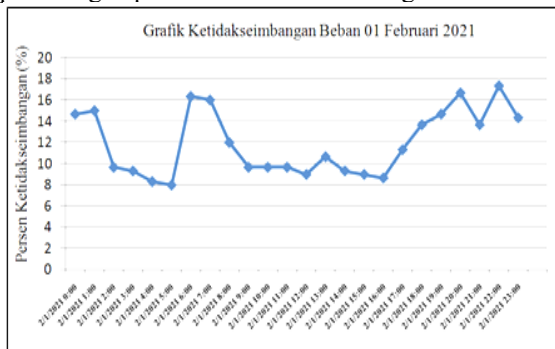
$$\eta = \frac{143,89}{143,89 + 2,36} \times 100 \% = 98,9 \%$$

Dari Tabel 5 didapat hasil perhitungan dan grafik pembebanan transformator adalah sebagai berikut :

Tabel 5. Perhitungan Permbebanan Transformator

Waktu	Arus (A)			Pembebanan	
	R	S	T	I rata-rata (A)	%L
0:00	132.8	122.4	96	117,1	41%
1:00	126.4	120	90,4	112,3	39%
2:00	108	119.2	91,2	106,1	37%
3:00	100	117.6	89.6	102,4	35%
4:00	104	114.4	92	103,5	36%
5:00	97.6	112	92	100,5	35%
6:00	112	127.2	73.6	104,3	36%
7:00	112.8	120	76.8	103,2	36%
8:00	144	143.2	112.8	133,3	46%
9:00	136	159.2	116.8	137,3	48%
10:00	128.8	162.4	128	139,7	48%
11:00	125.6	154.4	118.4	132,8	46%
12:00	142.4	152.8	123.2	139,5	48%
13:00	124.8	156	112.8	131,2	45%
14:00	143.2	171.2	133.6	149,3	52%
15:00	148	160.8	127.2	145,3	50%
16:00	144	167.2	130.4	147,2	51%
17:00	135.2	147.2	107.2	129,9	45%
18:00	147.2	148.8	110.4	135,5	47%
19:00	159.2	155.2	114.4	142,9	50%
20:00	160.8	154.4	108	141,1	49%
21:00	149.6	160.8	110.4	140,3	49%
22:00	151.2	148	99.2	132,8	46%
23:00	141.6	149.6	103.2	131,5	46%

Gambar 6 merupakan grafik dari ketidakseimbangan transformator yang didapatkan berdasarkan perhitungan pada Tabel 5 adalah sebagai berikut :



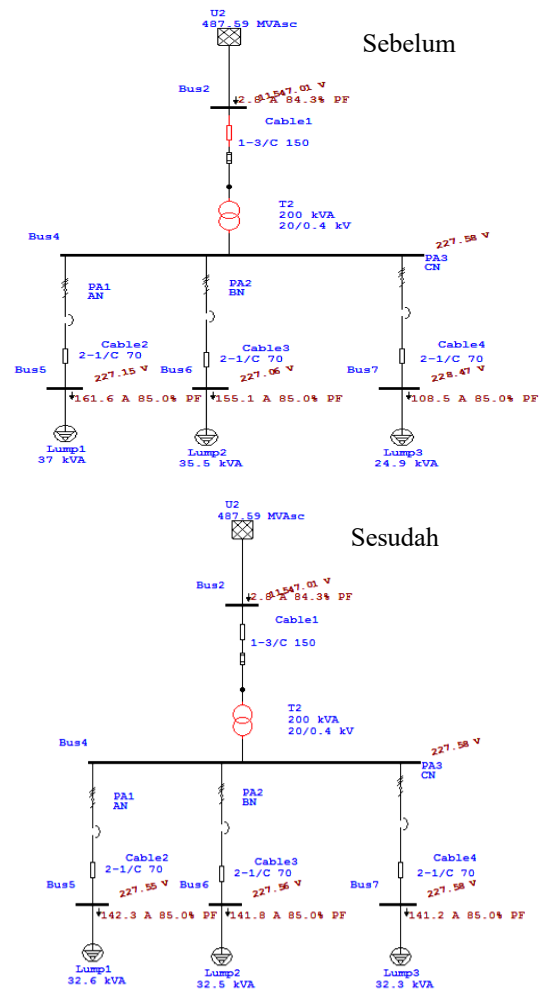
Gambar 6. Grafik Ketidakseimbangan Beban Hasil kWh

Tabel 6 merupakan bentuk sebelum dan sesudah penyeimbangan beban menggunakan ETAP.

Tabel 6. Beban Sebelum Dan Sesudah Penyeimbangan

Beban Transformator Sebelum Penyeimbangan				
Arus (A)				
R	S	T	IN	%UL
160	153,5	107,8	50,1	15,5
Beban Transformator Setelah Penyeimbangan				
Arus (A)				
R	S	T	IN	%UL
141	140,5	140	0,9	0,7

Pada Tabel 6. beban pada fasa S sebelum perbaikan adalah 160 A dipindahkan ke fasa T sebanyak 19,5 A, untuk fasa S sebelum perbaikan adalah 153,5 A dipindahkan ke fasa T sebanyak 13 A. Sehingga beban untuk fasa T yang sebelumnya adalah 107,8 A menjadi 140 A. Dari hasil analisis menggunakan ETAP, sebelum perbaikan arus netral (I_N) pada transformator 50,1 A, setelah perbaikan Arus netral mengalami penurunan menjadi 0,9 A, terjadi penurunan yang besar dari sebelum perbaikan. Berikut rangkaian dan hasil perbaikan menggunakan ETAP.



Gambar 7. Rangkaian Perbaikan Menggunakan ETAP

a. Sebelum Perbaikan

$$I_R = a \cdot I \Rightarrow a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{160}{140,43} = 1,139$$

$$I_S = b \cdot I \Rightarrow b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{153,5}{140,43} = 1,093$$

$$I_T = c \cdot I \Rightarrow c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{107,8}{140,43} = 0,767$$

$$\begin{aligned} \%_{UL} &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% = \\ &= \frac{\{|1.139-1|+|1.093-1|+|0.767-1|\}}{3} \times 100\% \\ &= 15,5\% \end{aligned}$$

b. Setelah Perbaikan

$$I_R = a \cdot I \Rightarrow a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{141}{140,5} = 1,003$$

$$I_S = b \cdot I \Rightarrow b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{140,5}{140,5} = 1$$

$$I_T = c \cdot I \Rightarrow c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{140}{140,5} = 0,996$$

$$\begin{aligned} \%_{UL} &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% = \\ &= \frac{\{|1.003-1|+|1-1|+|0.996-1|\}}{3} \times 100\% \\ &= 0,7\% \end{aligned}$$

Perhitungan *losses* Netral Transformator

a. Sebelum Perbaikan

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \cdot R_N = (50,1)^2 \cdot (0,2324) \\ &= 583,32 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Persentase *losses*:

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{0,583}{170} \times 100\% = 0,34\%$$

b. Setelah Perbaikan

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N = (0,9)^2 \cdot (0,2324) = 0,188 \text{ Watt}$$

Persentase *losses* :

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% = \frac{0,0001}{170} \times 100\% = 0,001\%$$

4. KESIMPULAN

Dari analisis ketidakseimbangan beban terhadap arus netral, untuk perhitungan pengukuran terdapat 0,383 kW *losses* pada siang hari dan 0,662 kW pada malam hari, dari simulasi menggunakan etap *losses* pada siang hari sebesar 0,344 kW dan 0,583 kW pada malam hari. Terdapat selisih sebesar 0,023% pada siang hari dan 0,047% saat perhitungan pengukuran dengan ETAP. Berdasarkan standar ketidakseimbangan beban, Transformator ST 263

200 kVA masih memenuhi standar IEEE std 446-1995 yaitu sebesar 5% - 20%. Semakin besar arus netral I_N yang mengalir di penghantar netral transformator maka semakin besar juga *losses* yang dihasilkan. Agar mengurangi *losses* pada transformator sebaiknya dilakukan pengecekan rutin pada gardu distribusi atau pemeliharaan sesuai SOP agar dapat mengurangi *losses*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Eteruddin, D. Setiawan, and P. P. P. Hutagalung, "Evaluasi Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Pada Feeder 7 Peranap PT. PLN Persero Rayon Taluk Kuantan," in *Seminar Nasional Pakar*, 2020, pp. 1.4.1-1.4.6.
- [2] I. Gunawan, H. Eteruddin, and U. Situmeang, "Analisis Transien Pada Sistem Transmisi 150 kV Riau Setelah Beroperasinya PLTU Tenayan Raya Menggunakan Powerworld Simulator," *Jurnal Teknik*, vol. 14, no. 2, pp. 223–231, 2020.
- [3] W. Octary, H. Eteruddin, and A. Tanjung, "Susut Tegangan pada Penghantar ACCC di Saluran Transmisi 150 kV di PT. PLN (Persero) Unit Pelayanan Transmisi Pekanbaru," *SainETIn*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [4] A. Van Anugrah, H. Eteruddin, and A. Arlenny, "Studi Pemasangan Express Feeder Jaringan Distribusi 20 kV Untuk Mengatasi Drop Tegangan Pada Feeder Sorek PT. PLN (Persero) Rayon Pangkalan Kerinci," *SainETIn*, vol. 4, no. 2, pp. 65–71, 2020.
- [5] H. Eteruddin, M. Mutamalikin, and A. Arlenny, "Perencanaan Sistem Distribusi 20 kV Di Sungai Guntung Kabupaten Indragiri Hilir-Riau," *Jurnal Inovasi Penelitian*, vol. 2, no. 6, pp. 1863–1872, 2021.
- [6] H. Hardiyanto, A. Arlenny, and Z. Zulfahri, "Studi Penempatan Recloser Pada Jaring Distribusi 20 kV di Penyulang 21 Tarai PT. PLN (Persero) Rayon Panam," *Jurnal Teknik*, vol. 11, no. 1, pp. 11–19, 2017.
- [7] A. R. Iklas, A. Arlenny, and U. Situmeang, "Studi Penempatan Recloser pada Jaring Distribusi 20 kV Di Penyulang 12 Kualu PT. PLN (Persero) Rayon Panam," *Jurnal Teknik*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [8] Syufrijal and R. Monatun, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. 1*. Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2014.
- [9] A. Kadir, *Transformator*. Jakarta: UI-Press, 2010.
- [10] E. Suherman and S. P. Kampay, "Kerugian Daya Akibat Ketidakseimbangan beban Terhadap Arus Netral Pada Transformator Distribusi," *Jurnal Sains & Teknologi*, vol. 7, no. 1, pp. 60–72, 2017.

- [11] H. Muchtar and Y. Sopian, “Studi Verifikasi Sistem Ketidakseimbangan Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah Menggunakan Alat PHB – SR (Peralatan Hubung Bagi Sambungan Rumah) Di Wilayah PLN Area Cempaka Putih,” *Elektum*, vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [12] W. D. Stevenson Jr, “Analisis Sistem Tenaga Listrik.” p. 405, 1994.
- [13] A. Tanjung and Atmam, “Analisis Kinerja Transformator Distribusi Rusunawa Universitas Lancang Kuning Pekanbaru,” *SainETIn*, vol. 1, no. 1, pp. 35–40, 2016.
- [14] M. Wijaya, *Dasar-Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Penerbit Djambatan, 2001.
- [15] Waluyo, A. N. Fahdiyalhaq, and S. Saodah, “Calculation Analysis of Power Losses on the Medium Voltage Feeders and Distribution Transformers,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 14, pp. 4264–4281, 2017.
- [16] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.