



Analisis Susut Energi Listrik pada Trafo Distribusi 160 KVA di Gardu Distribusi SP022 PLN ULP Sape Penyulang Sari Akibat Ketidakseimbangan Beban

Alfan Ediyasa Ulinuha

¹Progam Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

Alamat: Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

Korespondensi penulis: alfanedyasa@gmail.com

Abstract: This research aims to analyze the operational conditions of distribution transformers at the SP022 PLN ULP Sape substation, with a focus on calculating load imbalances caused by transformer losses. The data collected includes voltage and current measurements, as well as calculation analysis related to energy losses. The analysis results show that there is a significant load imbalance. Current measurement data shows that the load imbalance during the day is 9.967%, while at night it increases to 12.63%. The total transformer loss was recorded at 526,041 W during the day and 770,359 W at night. The energy losses that occur respectively are 15,556 kWh/day with an estimated loss cost of IDR 22,473.7 per day or 466,704 kWh per month with a loss cost of IDR 674,247.26 per month. The results of this research show that although losses due to imbalance are still within tolerance limits, regular repairs can reduce power losses and operational costs, thereby increasing the efficiency of distribution transformers.

Keywords: Distribution Transformer, Load Imbalance, Power Losses, SP022 Substation

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi operasional trafo distribusi pada gardu SP022 PLN ULP Sape, dengan fokus pada perhitungan ketidakseimbangan beban yang diakibatkan oleh rugi-rugi transformator. Data yang dikumpulkan meliputi pengukuran tegangan dan arus, serta dilakukan analisis perhitungan terkait dengan susut energi. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi ketidakseimbangan beban yang signifikan. Data pengukuran arus menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada siang hari sebesar 9,967%, sedangkan pada malam hari meningkat menjadi 12,63%. Rugi total trafo tercatat sebesar 526,041 W pada siang hari dan 770,359 W pada malam hari. Kerugian energi yang terjadi masing-masing adalah 15,556 kWh/hari dengan estimasi biaya kerugian sebesar Rp.22.473,7 per hari atau 466,704 kWh per bulan dengan biaya kerugian Rp.674.247,26 per bulan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun kerugian akibat ketidakseimbangan masih dalam batas toleransi, perbaikan secara berkala dapat menurunkan rugi-rugi daya dan biaya operasional, sehingga meningkatkan efisiensi trafo distribusi.

Kata kunci: Trafo Distribusi, Ketidakseimbangan Beban, Kehilangan Daya, Gardu Induk SP022

1. LATAR BELAKANG

Gardu distribusi merupakan salah satu elemen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara sistem transmisi dan konsumen (Latupeirissa et al., 2023). Keberadaan gardu distribusi memungkinkan pengaliran energi listrik dengan tegangan yang sesuai kebutuhan pelanggan, sekaligus menjaga kualitas pasokan listrik agar stabil dan andal. Namun, dalam operasionalnya, gardu distribusi sering menghadapi berbagai tantangan teknis maupun non-teknis yang dapat mempengaruhi efisiensi dan umur pakai peralatannya.

Pertumbuhan beban listrik, terutama pada beban satu fasa, semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah pelanggan dan perubahan pola konsumsi listrik. Hal ini

berdampak langsung pada pembebanan transformator distribusi, di mana sering terjadi ketidakseimbangan beban antar fasa (Latupeirissa et al., 2023), (Wirawan et al., 2021). Ketidakseimbangan beban terjadi ketika salah satu fasa memiliki arus yang lebih besar atau lebih kecil dibandingkan fasa lainnya, sehingga menimbulkan peningkatan rugi-rugi daya pada transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena distribusi arus yang tidak merata menyebabkan kenaikan rugi-rugi tembaga pada transformator, yang berujung pada hilangnya energi dalam bentuk panas dan menurunkan efisiensi transformator (Wirawan et al., 2021). Selain itu, ketidakseimbangan beban juga berpengaruh terhadap kestabilan tegangan sistem distribusi. Tegangan pada fasa yang memiliki beban lebih besar cenderung mengalami penurunan, sedangkan fasa dengan beban lebih kecil mengalami kenaikan tegangan (Osahenvemwen et al., 2020). PLN memiliki batas ketidakseimbangan arus yang diizinkan, yaitu maksimum 20% sedangkan untuk ketidakseimbangan tegangan, maksimum kurang lebih 2% berdasarkan SPLN D5.004-1:2012. Jika nilai ketidakseimbangan tegangan melebihi batas ini, maka kualitas daya listrik akan terganggu dan dapat mempengaruhi performa peralatan listrik pelanggan serta meningkatkan risiko gangguan pada sistem distribusi (Ridwan et al., 2024), (Soedjarwanto et al., 2024).

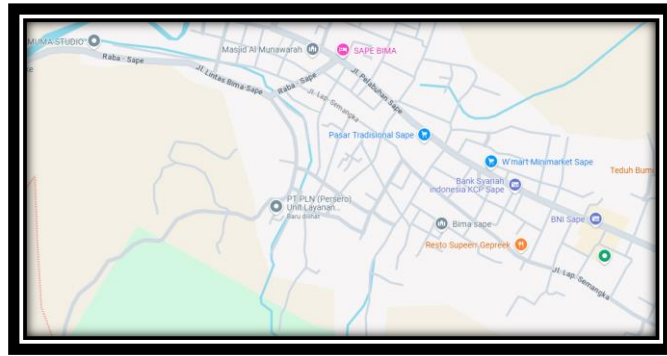
Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi serta mengevaluasi dampaknya terhadap rugi-rugi daya dan susut energi listrik. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi strategi untuk mengurangi ketidakseimbangan beban guna meningkatkan efisiensi transformator distribusi serta menjaga kestabilan tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode analisis data kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari.

Objek Penelitian

Tempat : Kecamatan Sape, Kabupaten Bima, Nusa Tenggara Barat
Waktu : 2 bulan (November – Desember)
Penelitian
Detail Lokasi :



Gambar 1. Peta lokasi penelitian
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

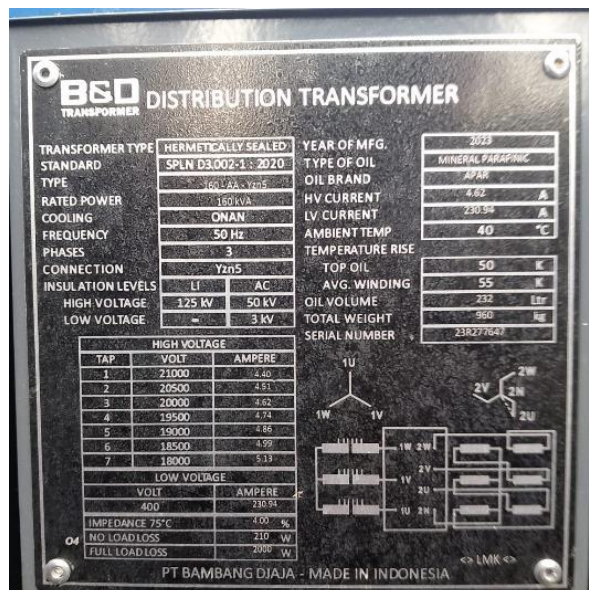
Data-data Penelitian

Detail Gardu : No. Gardu SP22 UP3 Bima, ULP Sape, Feeder Sari

Section 1 (PLTD Sape – LBS Mot Masjid Raya – Recloser Serbaguna)

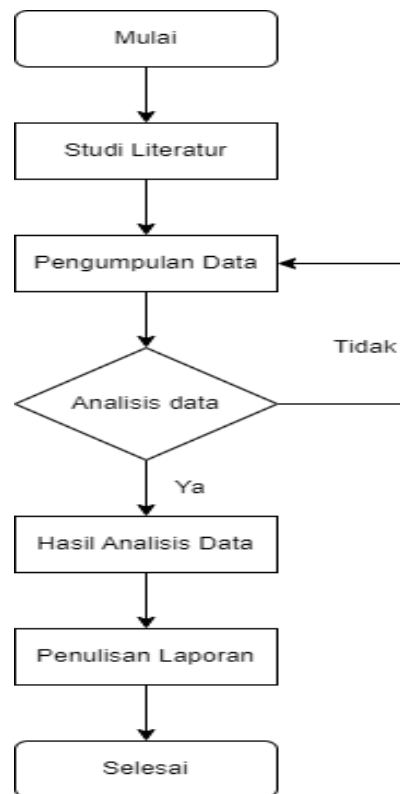
Tabel 1. Spesifikasi Trafo

Type	:	Hermetically Sealed
Standart	:	SPLN D3.002 – 1 : 2020
Rated Power	:	160kVA
Cooling	:	ONAN
Frequency	:	50Hz
Phase	:	3
High Voltage	:	20.000 volt / 4,62 A
Low voltage	:	400 volt / 230,94
Impedance	:	4,00%
No Load Loss	:	210W
Full Load Loss	:	2000W



Gambar 2. Nameplate Trafo
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

Flowchart



Gambar 2. Flowchart

(Sumber: Dokumentasi pribadi)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, menyajikan hasil-hasil penelitian yang diperoleh dari pengukuran dan pengamatan pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari selama periode penelitian. Data yang disajikan meliputi nilai pengukuran tegangan dan arus beban pada saluran distribusi pada waktu siang dan malam. Selain itu, analisis terhadap hasil pengukuran tegangan dan arus dilakukan untuk mengidentifikasi apakah ketidakseimbangan beban pada ULP Sape masih dalam standar PLN atau tidak. Apabila masih dalam standar, penulis tetap akan menganalisa lebih lanjut mengenai dampak dari ketidakseimbangan beban terhadap susut energi. Berikut adalah alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan pengamatan pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari

- a. Voltmeter
- b. Ampere meter

Analisa Pengukuran Tegangan dan Arus

- a. Pengukuran siang hari

Tabel 2. Pengukuran Tegangan dan Arus siang hari

No	Pengukuran	Tegangan (volt)						Arus (Ampere)			
		R-N	S-N	T-N	R-S	R-T	S-T	R	S	T	N
1.	Jurusan A	237	236	236	412	410	409	87,8	105,1	80,8	30,8
2.	Jurusan C	237	236	236	412	411	409	-	-	0,7	0,7
Arus Total							87,8	105,1	81,5	31,5	

b. Pengukuran malam hari

Tabel 3. Pengukuran Tegangan dan Arus malam hari

No	Pengukur an	Tegangan (volt)						Arus (Ampere)			
		R- N	S- N	T- N	R- S	R- T	S- T	R	S	T	N
1.	Jurusan A	23 9	23 8	23 6	41 5	41 2	41 1	100 ,1	144, 1	111, 7	59,6
3.	Jurusan C	23 9	23 8	23 6	41 5	41 2	41 1	-	-	7,6	7,9
Arus Total							100 ,1	144, 1	119, 3	67,5	

Hasil analisa data:

a. Tegangan antar fasa

Tegangan antar fase (R-T, S-T, R-S) tidak sepenuhnya simetris, yang bisa menjadi indikasi beban tidak seimbang.

b. Arus

Jurusan A memiliki arus netral sebesar 59,6 A. Jurusan C memiliki arus netral sebesar 7,9 A. Nilai ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban atau gangguan di sistem distribusi.

Analisa Ketidakseimbangan Beban

a. Analisa Ketidakseimbangan beban Siang Hari

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada siang hari:

$$Unbalance\ per\ fasa\ (X) = \frac{I_{terukur}}{I_{rata-rata}}$$

Arus fase pada siang hari:

- $I_R = 87,8\ A$
- $I_S = 105,1\ A$
- $I_T = 81,5\ A$

Hitung nilai rata-rata arus,

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{87,8+105,1+81,5}{3} = 91,46 \text{ Ampere}$$

Substitusi ke rumus *Unbalance*,

$$Unbalance (R) = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{87,8}{91,46} = 0,959 A$$

$$Unbalance (S) = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{105,1}{91,46} = 1,149 A$$

$$Unbalance (T) = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{81,5}{91,46} = 0,891 A$$

Maka, ketika pada beban seimbang dapat dihitung dengan persamaan (8)

$$Unbalance \text{ total } (\%) = \frac{\{|X_R-1|+|X_S-1|+|X_T-1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance \text{ total } (\%) = \frac{\{0,959-1|+|1,149-1|+|0,891-1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance \text{ total} = 0,09967 = 9,967 \%$$

Persentase ketidakseimbangan beban 9,967 % merupakan nilai yang cukup baik, namun masih perlu untuk diperhatikan lagi untuk kedepannya

b. Analisa Ketidakseimbangan beban Malam Hari

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada siang hari:

$$Unbalance \text{ per fasa } (X) = \frac{I_{terukur}}{I_{rata-rata}}$$

Arus fase pada siang hari:

- $I_R = 100,1 A$
- $I_S = 144,1 A$
- $I_T = 119,3 A$

Hitung nilai rata-rata arus,

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{100,1 + 144,1 + 119,3}{3} = 121,16 \text{ Ampere}$$

Substitusi ke rumus *Unbalance*,

$$Unbalance (R) = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{100,1}{121,16} = 0,826 A$$

$$Unbalance (S) = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{144,1}{121,16} = 1,189 A$$

$$Unbalance (T) = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{119,3}{121,16} = 0,984 A$$

Maka, ketika pada beban seimbang dapat dihitung dengan persamaan (8)

$$Unbalance\ total\ (\%) = \frac{\{|X_R-1|+|X_S-1|+|X_T-1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance\ total\ (\%) = \frac{\{|0,826-1|+|1,189-1|+|0,984-1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance\ total = 0,1263 = 12,63\%$$

Persentase ketidakseimbangan beban 12,63 % merupakan nilai yang baik dan masih dalam nilai toleransi sesuai standar SPLN, namun masih perlu untuk diperhatikan lagi untuk kedepannya

Analisa Pembebanan dan Rugi-rugi Trafo

a. Perhitungan Impedansi Trafo

1) Kumbaran Primer

$$Z_{primer(dasar)} = \frac{V_{primer}^2}{S_{nominal}}$$

$$Z_{primer(dasar)} = \frac{(20/\sqrt{3})^2}{0,16} = 833,333\ ohm$$

$$Z_{primer(actual)} = Z_{primer(dasar)} \times Z_{pu}$$

$$Z_{primer(actual)} = 833,333 \times 0,04 = 33,333\ ohm$$

2) Kumbaran Sekunder

$$Z_{sekunder(dasar)} = \frac{V_{sekunder}^2}{S_{nominal}}$$

$$Z_{sekunder(dasar)} = \frac{(0,4/\sqrt{3})^2}{0,16} = 0,333\ ohm$$

$$Z_{sekunder(actual)} = Z_{sekunder(dasar)} \times Z_{pu}$$

$$Z_{sekunder(actual)} = 0,333 \times 0,04 = 0,01333\ ohm$$

b. Perhitungan Resistansi Trafo

Untuk menghitung nilai resistansi trafo, telah diketahui sebelumnya adalah total dari rugi-rugi beban penuh sama dengan total rugi-rugi tembaga beban penuh. Maka didapatkan persamaan sebagai berikut

$$P_{tembaga} = P_{CU,primer} + P_{CU,sekunder} = 2000\ watt$$

Anggaphlah kedua kumbaran memiliki rugi-rugi tembaga yang seimbang yaitu 1000 watt, maka bisa disubtitusikan ke perhitungan resistansi trafo:

$$P_{cu\ primer} = 3 I_p^2 R_p \rightarrow R_p = \frac{P_{cu\ primer}}{3 I_p^2 (FL)}$$

1) Resistansi Sisi Primer

$$R_{Primer} = \frac{P_{cu\ primer}}{3I_p^2(FL)}$$

Substitusi nilai ke rumus,

$$R_{Primer} = \frac{1000}{3(4,62)^2} = 15,61\ ohm$$

2) Resistansi sisi Sekunder

$$R_{Sec} = \frac{P_{cu\ Sec}}{3I_p^2(FL)}$$

Substitusi nilai ke rumus,

$$R_{Sec} = \frac{1000}{3(230,94)^2} = 0,0062\ ohm$$

c. Perhitungan Reaktansi Trafo

1) Reaktansi Primer

$$X_{primer} = \sqrt{Z_{primer}^2 - R_{primer}^2}$$

Substitusi nilai Impedansi dan Resistansi,

$$X_{primer} = \sqrt{33,33^2 - 15,61^2} = 29,44$$

2) Reaktansi Sekunder

$$X_{sekunder} = \sqrt{Z_{sekunder}^2 - R_{sekunder}^2}$$

Substitusi nilai Impedansi dan Resistansi,

$$X_{sekunder} = \sqrt{0,013^2 - 0,0062^2} = 0,0118$$

d. Perhitungan Pembebanan Trafo

1) Beban siang hari

Arus fase pada siang hari:

- $I_{R,sec} = 87,8\ A$
- $I_{S,sec} = 105,1\ A$
- $I_{T,sec} = 81,5\ A$

Persentase pembebanan trafo sisi sekunder :

$$\%I_R = \frac{I_R}{I_{sec(FL)}} = \frac{87,8}{230,9} = 38,025\ \%$$

$$\%I_S = \frac{I_S}{I_{sec(FL)}} = \frac{105,1}{230,9} = 45,517\ \%$$

$$\%I_T = \frac{I_T}{I_{sec(FL)}} = \frac{81,5}{230,9} = 35,296\ \%$$

Arus sisi Primer :

$$I_R = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_R}{100} = \frac{4,62 \times 38,025}{100} = 1,756 \text{ A}$$

$$I_S = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_S}{100} = \frac{4,62 \times 45,517}{100} = 2,102 \text{ A}$$

$$I_T = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_T}{100} = \frac{4,62 \times 35,296}{100} = 1,630 \text{ A}$$

2) Beban malam hari

Arus fase pada siang hari:

- $I_R = 100,1 \text{ A}$
- $I_S = 144,1 \text{ A}$
- $I_T = 119,3 \text{ A}$

Persentase pembebanan trafo :

$$\%I_R = \frac{I_R}{I_{sec(FL)}} = \frac{100,1}{230,9} = 43,352 \%$$

$$\%I_S = \frac{I_S}{I_{sec(FL)}} = \frac{144,1}{230,9} = 62,407 \%$$

$$\%I_T = \frac{I_T}{I_{sec(FL)}} = \frac{119,3}{230,9} = 51,667 \%$$

Arus Primer :

$$I_R = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_R}{100} = \frac{4,62 \times 43,352}{100} = 2,002 \text{ A}$$

$$I_S = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_S}{100} = \frac{4,62 \times 62,407}{100} = 2,883 \text{ A}$$

$$I_T = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_T}{100} = \frac{4,62 \times 51,667}{100} = 2,387 \text{ A}$$

Perhitungan Rugi-Rugi Daya

Dari perhitungan rugi-rugi tembaga trafo pada sisi primer dan sekunder serta diketahui juga rugi-rugi inti trafo pada nameplate, maka dapat dilakukan perhitungan total rugi-rugi trafo yaitu

a. Siang hari

- Rugi tembaga sekunder:

$$P_{Cu,Sec} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Sec}$$

Substitusi,

$$P_{Cu,Sec} = (87,8^2 + 105,1^2 + 81,5^2) \times 0,0062$$

$$P_{Cu,Sec} = 157,462 \text{ Watt}$$

- Rugi tembaga primer:

$$P_{Cu,Primer} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Primer}$$

Substitusi,

$$P_{Cu,Primer} = (1,756^2 + 2,102^2 + 1,630^2) \times 15,61$$

$$P_{Cu,Primer} = 158,579 \text{ Watt}$$

- Rugi-rugi Total:

$$P_{loss} (siang) = P_{cu} sekunder + rugi inti + P_{cu} primer$$

$$P_{loss} (siang) = 157,462 + 210 + 158,579$$

$$P_{loss} (siang) = 526,041 \text{ Watt}$$

b. Malam hari

- Rugi tembaga sekunder:

$$P_{Cu,Sec} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Sec}$$

Substitusi,

$$P_{Cu,Sec} = (100,1^2 + 144,1^2 + 119,3^2) \times 0,0062$$

$$P_{Cu,Sec} = 279,107 \text{ Watt}$$

- Rugi tembaga primer:

$$P_{Cu,Primer} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Primer}$$

Substitusi,

$$P_{Cu,Primer} = (2,002^2 + 2,883 + 2,387^2) \times 15,61$$

$$P_{Cu,Primer} = 281,252 \text{ Watt}$$

- Rugi-rugi Total:

$$P_{loss} (malam) = P_{cu} sekunder + rugi inti + P_{cu} primer$$

$$P_{loss} (malam) = 279,107 + 210 + 281,252$$

$$P_{loss} (malam) = 770,359 \text{ Watt}$$

c. Analisa Susut Energi

- 1) Susut Energi Siang

$$E_{siang} = P_{loss (siang)} \times 12 \text{ jam}$$

$$E_{siang} = 526,041 \times 12 \text{ jam} = 6312,49 \text{ Watt} \approx 6,312 \text{ kWh}$$

- 2) Susut Energi Malam

$$E_{malam} = P_{loss (malam)} \times 12 \text{ jam}$$

$$E_{malam} = 770,359 \times 12 \text{ jam} = 9244,30 \text{ Watt} \approx 9,244 \text{ kWh}$$

- 3) Susut Energi Perhari

$$E_{hari} = E_{siang} + E_{malam} = 6,312 + 9,244 = 15,556 \text{ kWh}$$

- 4) Susut Energi perbulan

$$E_{bulan} = 30 \times E_{hari} = 30 \times 15,556 = 466,704 \text{ kWh}$$

- 5) Perhitungan Biaya Susut Energi perhari

$$\text{Biaya susut energi perhari} = 1444,70 \times E_{hari}$$

$$\text{Biaya susut energi perhari} = \text{Rp. } 1444,70 \times 15,556 = \text{Rp. } 22.473,7 -$$

- 6) Perhitungan Biaya Susut Energi perbulan

$$\text{Biaya susut energi perbulan} = 1444,70 \times E_{bulan}$$

$$\text{Biaya susut energi perbulan} = 1444,70 \times 466,704 = \text{Rp. } 674.247,26, -$$

Analisa Penyeimbangan Beban

Penyeimbangan arus fasa pada dasarnya bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi pada saluran penghantar khususnya rugi-rugi pada saluran penghantar netral, dan menyeimbangkan pembebanan pada masing-masing fasa agar tidak terjadi salah satu fasa dibebani oleh beban yang lebih tinggi dibandingkan fasa yang lainnya. oleh karena itu dalam penelitian ini akan dianalisa dampak penyeimbangan arus fasa terhadap nilai rugi-rugi trafo, dan biaya susut daya transformator.

Penyeimbangan Arus

- a. Siang Hari

- 1) Arus Seimbang sisi Sekunder (Siang)

$$I_{sec} = \frac{87,8 + 105,1 + 81,5}{3} = 91,46 \text{ A}$$

- 2) Persentase pembebanan

$$\%I_{sec} = \frac{I_{sec}}{I_{s(FL)}} \times 100\%$$

$$\%I_{sec} = \frac{91,46}{230,9} \times 100\% = 39,610 \%$$

3) Arus beban primer

$$I_{pr} = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_{sec}}{100}$$

$$I_{pr} = \frac{4,62 \times 39,610}{100} = 1,829 \text{ A}$$

b. Malam Hari

1) Arus Seimbang sisi Sekunder

$$I_{sec} = \frac{100,1 + 144,1 + 119,3}{3} = 121,16 \text{ A}$$

2) Persentase pembebanan (Malam)

$$\%I_{sec} = \frac{I_{sec}}{I_{s(FL)}} \times 100\%$$

$$\%I_{sec} = \frac{121,16}{230,9} \times 100\% = 52,472 \%$$

3) Arus beban primer

$$I_{pr} = \frac{I_{p(FL)} \times \% I_{sec}}{100}$$

$$I_{pr} = \frac{4,62 \times 52,472}{100} = 2,424 \text{ A}$$

Perhitungan Rugi-rugi Daya Beban Seimbang

a. Siang hari

1) Rugi tembaga Sekunder

$$P_{cu \text{ sekunder}} = 3I_{sec}^2 R_s$$

$$P_{cu \text{ sekunder}} = 3 \times 91,46^2 \times 0,0062 = 155,587 \text{ watt}$$

2) Rugi tembaga primer

$$P_{cu \text{ primer}} = 3I_{pr}^2 R_p$$

$$P_{cu \text{ primer}} = 3 \times 1,829^2 \times 15,61 = 156,827 \text{ watt}$$

3) Rugi Inti = 210 Watt

4) Rugi total Siang hari

$$P_{loss (siang)} = P_{cu \text{ sekunder}} + \text{rugi inti} + P_{cu \text{ primer}}$$

$$P_{loss (siang)} = 155,587 + 210 + 156,827 = 522,415 \text{ watt}$$

b. Malam hari

1) Rugi tembaga Sekunder

$$P_{cu \text{ sekunder}} = 3I_{sec}^2 R_s$$

$$P_{cu \text{ sekunder}} = 3 \times 121,16^2 \times 0,0062 = 273,043 \text{ watt}$$

2) Rugi tembaga primer

$$P_{cu \text{ primer}} = 3I_{pr}^2 R_p$$

$$P_{cu \text{ primer}} = 3 \times 2,424^2 \times 15,61 = 275,162 \text{ watt}$$

3) Rugi Inti = 210 Watt

4) Rugi total Malam hari

$$P_{loss (malam)} = P_{cu \text{ sekunder}} + \text{rugi inti} + P_{cu \text{ primer}}$$

$$P_{loss (malam)} = 273,043 + 210 + 275,162 = 758,205 \text{ watt}$$

Perhitungan Susut Energi

a. Susut energi siang hari

$$E_{siang} = P_{loss (siang)} \times 12 \text{ jam}$$

$$E_{siang} = 522,415 \times 12 = 6268,98 \text{ Wh} \approx 6,268 \text{ kWh}$$

b. Susut energi malam hari

$$E_{malam} = P_{loss (malam)} \times 12 \text{ jam}$$

$$E_{malam} = 758,205 \times 12 = 9098,47 \text{ Wh} \approx 9,098 \text{ kWh}$$

c. Susut energi per hari

$$E_{hari} = E_{siang} + E_{malam}$$

$$E_{hari} = 6,268 + 9,098 = 15,367 \text{ kWh}$$

d. Susut energi per bulan

$$E_{bulan} = 30 \times E_{hari}$$

$$E_{bulan} = 30 \times 15,367 = 461,023 \text{ kWh}$$

Perhitungan Biaya Susut Energi

a. Biaya pemakaian energi listrik = 1444,70 / kWh

b. Biaya susut energi perhari

$$\text{Biaya susut energi perhari} = 1444,70 \times E_{hari}$$

$$\text{Biaya susut energi perhari} = 1444,70 \times 15,367 = \text{Rp. 22.200,7}$$

c. Biaya susut energi perbulan

$$\text{Biaya susut energi perbulan} = 1444,70 \times E_{bulan}$$

$$\text{Biaya susut energi perbulan} = 1444,70 \times 461,023 = \text{Rp. 666.039,9}$$

Analisa Penghematan Energi Beban Seimbang dengan Tidak Seimbang

Dari hasil perhitungan rugi-rugi trafo dan ketidak seimbangan arus dengan perbandingan biaya susut energi, didapatkan hasil data sebagai berikut

Tabel 4. Hasil Analisa Rugi-rugi Trafo

Kondisi Beban	Rugi-rugi trafo	
	Siang hari (Watt)	Malam hari (Watt)
Tidak Seimbang	526,041	770,359
Seimbang	522,415	758,205
Selisih	3,626	12,154

Tabel 5. Hasil Analisa Rugi Energi dan Biaya Susut Energi

Kondisi Beban	Rugi Energi		Biaya Susut Energi	
	(kWh/hari)	kWh/bulan)	Per hari	Per bulan
Tidak Seimbang	15,556	466,704	Rp.22.473,7	Rp.674.247,26
Seimbang	15,367	461,023	Rp.22.200,7	Rp.666.039,9
Selisih	0,189	5,681	Rp.273	Rp.8.207,36

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil analisis data pada trafo distribusi, dapat disimpulkan sebagai berikut:

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa ketidakseimbangan pembebanan pada transformator distribusi SP022 PLN, ULP Sape, Penyulang Sari masih dalam batas yang diizinkan oleh PLN. Berdasarkan SPLN D5.004-1:2012, batas maksimum ketidakseimbangan tegangan yang diperbolehkan adalah kurang dari 2%, sedangkan batas maksimum ketidakseimbangan arus yang diperbolehkan adalah hingga 20%. Dari hasil perhitungan, persentase ketidakseimbangan beban pada transformator ini masih berada dalam rentang standar yang diizinkan, sehingga meskipun terdapat ketidakseimbangan, sistem masih dapat beroperasi dengan aman tanpa menyebabkan gangguan tegangan yang signifikan.

Ketidakseimbangan pembebanan memberikan dampak langsung terhadap peningkatan rugi-rugi daya dan susut energi listrik pada transformator distribusi. Pada kondisi beban tidak seimbang, rugi-rugi daya pada trafo meningkat menjadi 526,041 Watt pada siang hari dan 770,359 Watt pada malam hari. Hal ini menyebabkan total susut energi

dalam kondisi tidak seimbang mencapai 466,704 kWh/bulan, yang berdampak pada peningkatan biaya susut energi hingga Rp 674.247,26/bulan. Ketidakseimbangan ini menyebabkan distribusi arus yang tidak merata, yang berdampak pada peningkatan rugi-rugi tembaga akibat kenaikan arus pada salah satu atau lebih fasa, serta berpotensi menurunkan efisiensi operasional transformator dalam jangka panjang.

Jika dilakukan Penyeimbangan Beban, rugi-rugi daya dan susut energi mengalami sedikit penurunan dibandingkan kondisi tidak seimbang. Pada kondisi beban seimbang, rugi-rugi daya trafo berkurang menjadi 522,415 Watt pada siang hari dan 758,205 Watt pada malam hari. Total susut energi dalam kondisi seimbang mencapai 461,023 kWh/bulan, yang berdampak pada sedikit penurunan biaya susut energi menjadi Rp 666.039,9/bulan. Meskipun selisih antara kondisi beban seimbang dan tidak seimbang relatif kecil, penyeimbangan beban tetap penting untuk menjaga stabilitas tegangan, mengoptimalkan efisiensi transformator, serta mengurangi potensi gangguan yang dapat terjadi akibat ketidakseimbangan beban dalam jangka panjang.

Dengan demikian, meskipun sistem ketidakseimbangan pembebanan pada transformator masih dalam batas standar yang diizinkan oleh PLN, tetap diperlukan pemantauan dan upaya penyeimbangan beban secara berkala guna meminimalkan rugi-rugi daya dan menjaga kualitas pasokan listrik bagi pelanggan.

Saran

Untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasi trafo distribusi, disarankan langkah-langkah berikut:

Optimasi Ketidakseimbangan Beban

Disarankan untuk melakukan pemerataan beban pada setiap fasa agar ketidakseimbangan beban tetap berada pada batas toleransi atau bahkan lebih kecil dari standar maksimal 15%. Langkah ini dapat dilakukan dengan mengidentifikasi beban-beban tertentu yang menyebabkan ketidakseimbangan dan memindahkan sebagian beban dari fasa yang lebih tinggi ke fasa yang lebih rendah.

Peningkatan Efisiensi Operasional

Evaluasi rugi-rugi daya secara berkala untuk memastikan performa trafo tetap optimal. Jika rugi-rugi cenderung meningkat, dapat dilakukan pemeriksaan teknis pada trafo, seperti pengecekan isolasi, kabel, atau sambungan.

Manajemen Beban pada Malam Hari

Mengingat ketidakseimbangan beban dan rugi-rugi lebih tinggi pada malam hari, disarankan untuk meninjau distribusi beban pelanggan yang aktif pada waktu tersebut, terutama beban rumah tangga atau industri yang menggunakan daya besar.

Sosialisasi Kesadaran Pelanggan

Edukasi kepada pelanggan terkait pentingnya manajemen penggunaan daya yang efisien dan berimbang, sehingga dapat membantu menjaga stabilitas sistem distribusi secara keseluruhan

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian jurnal ini, khususnya tim PLN ULP Sape yang telah memberikan data serta wawasan berharga terkait analisis susut energi listrik pada trafo distribusi 160 kVA di Gardu Distribusi SP022 Penyulang Sari. Dukungan dari rekan-rekan akademisi, serta bimbingan dari para pembimbing dan reviewer, juga sangat membantu dalam penyempurnaan penelitian ini. Kami berharap hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengelolaan sistem distribusi listrik yang lebih efisien dan optimal.

DAFTAR REFERENSI

- Avif, M., Andriawan, A. H., & Prenata, G. D. (2022). Analisis pembebanan transformator daya 300 KVA di instalasi pengolahan air limbah PT. SIER.
- Deeng, A. S., Mangindaan, G. M. C., & Patras, L. S. (2022). Studi kelayakan operasi perencanaan uprating SUTM pada penyulang SK 2 & SK 4 di gardu induk Kawangkoan dengan metode simulasi ETAP 12.6.0.
- Ginting, R. T. (2022). Analisis ketidakseimbangan beban jaringan distribusi tegangan rendah menggunakan ETAP. *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, 6(2), 81–89. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v6i2.9734>
- Latupeirissa, H. L., & Titaley, G. V. (2023). Analysis of the effect of load imbalance on neutral current and power losses in distribution transformer. *Journal Name*, 3(4).
- Osahenvemwen, O. A., & Okhumeode. (2020). The effects of unbalanced load in power distribution sub-station network. *Journal Name*, 3(5), 1–11. Retrieved from www.iajournals.com
- Rachman, A. Y. D., Teknik Elektro, D., & Teknik Elektro, M. (2012). Perencanaan saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV pada kompleks perkebunan AMP (Agra Masang Perkasa) Bawan Lubuk Basung. Retrieved from <http://www.novapdf.com/>

- Ridwan, M., Ridal, Y., & Rauf, R. (2024). Analisa pengaruh pemeliharaan preventif pada penyulang gasan di PT. PLN (Persero) ULP Pariaman. *E-Mail Teknik Jurnal*, 4, 33–37.
- Rohmat, K., & Riyadi, M. (2023). Analisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi di PT. PLN (Persero) UPDL Pandaan. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 25(4), 186–192. <https://doi.org/10.14710/transmisi.25.4.186-192>
- Soedjarwanto, N., Kines, K. E., & Aulia, S. A. (2024). Analisis susut daya (losses) pada penyulang Rayap PT PLN (Persero) UID Lampung berbasis aplikasi ETAP 19.0.1. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(2). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i2.4072>
- Trunojoyo, J., Blok M-K., Baru, K., & Direksi, L. K. (n.d.). *Power quality (regulasi harmonisa, flicker dan ketidakseimbangan tegangan) PT PLN (Persero)*.
- Wirawan, A. D., Junaidi, & Arsyad, M. I. (2021). Analisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada transformator distribusi di penyulang Pangsumah PT. PLN (Persero) Rayon Mempawah.