

Efisiensi Penyeimbangan Beban pada Gardu Distribusi PY094 untuk Mengurangi Susut Energi PLN ULP Pringgabaya

Salma Ashila Firdaus^{1*}, Eka Nuryanto Budisusila²

¹⁻² Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia
Email: salmaashila88@gmail.com^{1*}

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

*Penulis Korespondensi

Abstract. *This study aims to analyze the operational condition of the distribution transformer at substation PY094, PLN ULP Pringgabaya, with a primary focus on identifying and calculating the level of load imbalance on the consumer side. Data were collected through direct measurements of electrical parameters, including voltage and current in each phase, followed by a detailed analysis of energy losses. The measurement results indicated a significant load imbalance. In Feeder B, the average phase currents were recorded at 103.8 A for phase R, 130.2 A for phase S, and 90.4 A for phase T. Meanwhile, in Feeder D, the average phase currents were 47.4 A for phase R, 18 A for phase S, and 20.4 A for phase T. This imbalance caused notable power losses in the distribution system, with an estimated daily energy loss of 28.94 kWh, assuming the system operates 12 hours per day. To address this issue, load balancing simulations were carried out using ETAP software. The simulation involved redistributing load values across each phase in the two main feeders. Feeder B was simulated at 46.82% of the transformer's full capacity, while Feeder D was simulated at 12.38% of the total 160 kVA capacity. The simulation results demonstrated that redistributing the load significantly reduced the current imbalance, thereby minimizing power losses and improving the operational efficiency of the distribution substation. Therefore, load balancing strategies are essential for enhancing energy efficiency and ensuring the reliability of electricity supply in distribution networks.*

Keywords: ETAP; PY094 Substation; Load Imbalance; Power Loss; Energy Shrinkage.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi operasional trafo distribusi pada gardu PY094 PLN ULP Pringgabaya dengan fokus utama pada identifikasi dan perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban yang terjadi di sisi konsumen atau pelanggan. Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung parameter listrik berupa tegangan dan arus pada masing-masing fasa, kemudian dilanjutkan dengan analisis perhitungan susut energi. Hasil pengukuran menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban yang cukup signifikan. Pada jurusan B, rata-rata arus fasa tercatat sebesar 103,8 A untuk fasa R, 130,2 A untuk fasa S, dan 90,4 A untuk fasa T. Sementara itu, pada jurusan D, rata-rata arus fasa sebesar 47,4 A untuk fasa R, 18 A untuk fasa S, dan 20,4 A untuk fasa T. Ketimpangan distribusi arus tersebut menyebabkan terjadinya rugi daya pada sistem distribusi, dengan estimasi susut energi harian mencapai 28,94 kWh apabila sistem diasumsikan beroperasi selama 12 jam per hari. Untuk mengatasi permasalahan ini, dilakukan simulasi penyeimbangan beban menggunakan perangkat lunak ETAP. Simulasi dilakukan dengan mengatur ulang distribusi beban pada masing-masing fasa di dua jurusan utama. Jurusan B disimulasikan dengan pembebanan sebesar 46,82% dari kapasitas penuh transformator, sementara Jurusan D hanya sebesar 12,38% dari kapasitas total 160 kVA. Hasil simulasi menunjukkan bahwa redistribusi beban mampu menurunkan ketidakseimbangan arus secara signifikan, sehingga berpotensi mengurangi rugi daya dan meningkatkan efisiensi operasional gardu distribusi. Dengan demikian, strategi penyeimbangan beban menjadi langkah penting dalam mendukung efisiensi energi dan keandalan pasokan listrik.

Kata kunci: ETAP; Gardu PY094; Ketidakseimbangan Beban; Rugi-Rugi Daya; Susut Energi.

1. LATAR BELAKANG

Gardu distribusi merupakan salah satu elemen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara sistem Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan konsumen (Yuntyansyah et al., 2014), (Haris et al., 2017). 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 memengaruhi efisiensi dan umur pakai peralatannya.

Salah satu tantangan utama adalah tingginya tingkat susut energi (energy losses), yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor (Yuntyansyah et al., 2014), (Ashari et al., 2021). Susut teknis biasanya terjadi akibat arus bocor pada isolator, panas berlebih pada transformator, penurunan kualitas komponen seperti kabel, switchgear, dan proteksi lainnya, serta ketidakseimbangan beban. Di sisi lain, susut non-teknis dapat disebabkan oleh faktor eksternal seperti pencurian listrik atau kesalahan pengukuran (Nixon et al., 2015), (Novfowan et al., 2020). Selain itu, keandalan gardu distribusi juga dipengaruhi oleh usia peralatan, kondisi lingkungan sekitar, dan pola pemeliharaan yang diterapkan.

Gardu distribusi PY094 PLN, yang dikelola oleh Unit Layanan Pelanggan (ULP) Pringgabaya yang terdapat pada penyulang Anjani, merupakan salah satu gardu distribusi yang memegang peranan strategis dalam menyuplai listrik ke wilayah Bagik Papan. Namun, gardu PY094 ini dihadapkan dengan tantangan beban operasional yg pincang pada setiap fasanya. Hal ini disebabkan kawasan tersebut yang masih berkembang sehingga masih berkembang sehingga masih memungkinkan penambahan pelanggan pada gardu PY094. Ketidakseimbangan beban pada setiap fasanya terjadi karena petugas penyambungan tidak memperhatikan fasa mana yang disambung. Ketidakseimbangan beban ini dapat meningkatkan risiko susut energi (energy losses) dan rusaknya peralatan pada gardu distribusi tersebut Novfowan et al., 2020).

Dalam penelitian ini, penulis berencana untuk melakukan optimasi penyeimbangan beban gardu distribusi PY094 sebagai upaya reduksi susut energi pada PLN ULP Pringgabaya yang erat kaitannya dengan susut distribusi dengan analisa data hasil pengukuran beban puncak gardu distribusi. Data tersebut juga meliputi pengukuran parameter listrik seperti arus dan tegangan. Melalui penelitian ini, diharapkan penyeimbangan beban dapat dilakukan secara efisien dan tepat sasaran, tanpa harus menunggu terjadinya kerugian perusahaan yang secara berkelanjutan, kerusakan fisik dan pengaduan dari masyarakat mengenai kualitas listrik yang

disalurkan. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk merancang penelitian ini dengan harapan tidak hanya menghasilkan solusi teknis untuk gardu distribusi PY094, tetapi juga dapat menjadi referensi bagi pengelola gardu distribusi lainnya dalam merancang strategi penyeimbangan beban yang lebih terukur dan berbasis data.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terintegrasi dan terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi (Haris et al., 2023), (Tharo et al., 2018). Komponen distribusi berperan sebagai penghubung antara sistem transmisi dan konsumen akhir, dengan fungsi utama mendistribusikan energi listrik pada tegangan yang sesuai dengan kebutuhan pengguna. Keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik sangat bergantung pada integritas setiap komponen dalam sistem tersebut, termasuk gardu distribusi yang menjadi titik vital dalam proses distribusi.

Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah fasilitas yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi primer ke tegangan distribusi sekunder, baik itu tegangan menengah (TM) maupun pelanggan tegangan rendah (TR) (Hamma, 2021), (Tobi, 2018). Jaringan distribusi tegangan rendah dimulai dari sumber yang disebut gardu distribusi mulai dari panel hubung bagi TR (Rak TR) keluar didistribusikan. Untuk setiap sirkit keluar melalui pengaman arus disebut “penyulang/ feeder”.



Gambar 1. Gardu PY094 Penyulang Anjani

Komponen utama gardu distribusi meliputi transformator, switchgear, isolator, perangkat proteksi, dan pengukur daya. Dalam operasionalnya, gardu distribusi harus memastikan kontinuitas pasokan listrik, kestabilan tegangan, dan efisiensi sistem. Namun, gardu sering

menghadapi tantangan teknis seperti peningkatan susut energi dan penurunan kinerja komponen.

Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah kondisi di mana distribusi beban listrik di antara ketiga fase pada sistem tenaga listrik tidak merata. Dalam sistem tenaga listrik tiga fase, idealnya beban pada setiap fase harus memiliki arus atau daya yang sama agar sistem dapat beroperasi secara efisien dan stabil. Namun, dalam praktiknya, beban yang tidak merata sering terjadi karena berbagai faktor, seperti perbedaan jenis peralatan listrik yang terhubung ke setiap fase, distribusi pelanggan, atau ketidaksesuaian dalam perencanaan dan pemasangan sistem (Novfowan et al., 2020), (Tobi, 2018), (Ulinuha, 2023):

Ketidakseimbangan beban merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam pengelolaan sistem distribusi listrik. Dengan pengelolaan yang baik, ketidakseimbangan beban dapat diminimalkan, sehingga efisiensi sistem meningkat dan susut energi dapat dikurangi (Setiawan et al., 2020). Pada penelitian ini, dikatakan terjadi ketidakseimbangan beban ketika arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar (didistribusikan) karena adanya penyusutan atau bisa dituliskan dalam persamaan:

$$\text{Unbalance (\%)} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{rata-rata}}} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Dari persamaan diatas, dibandingkan dengan nilai beban yang seimbang, maka dibutuhkan atau perlu diketahui arus beban penuh di sisi trafo dengan rumus:

$$I_{s(FL)} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots(2)$$

Susut Energi (Energy Losses)

Susut energi merupakan kerugian yang terjadi sebagai akibat adanya selisih antara energi yang dikirimkan dengan energi yang diterima atau dapat juga dikatakan dari sisi transfer energi sebagai adanya selisih antara energi yang di salurkan ke pelanggan dengan total energi yang di bayarkan pelanggan (Sutanto et al., 2019). Pada penelitian ini untuk menghitung biaya susut energi (losses) dan total energy yang hilang dilakukan analisa perhitungan menggunakan hasil dari ketidakseimbangan beban yang berdampak pada rugi-rugi trafo (Wijaya et al., 2021). Ketidakseimbangan beban terjadi ketika arus di masing-masing fasa pada sisi sekunder

transformator tidak sama. Untuk rumus perhitungan susut energi akibat dari rugi-rugi trafo sebagai berikut:

$$E_B = I^2_{N(B)} \times R \times t \dots\dots\dots (3)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode analisis data kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada gardu distribusi PY094 PLN, ULP Pringgabaya, Penyulang Anjani.

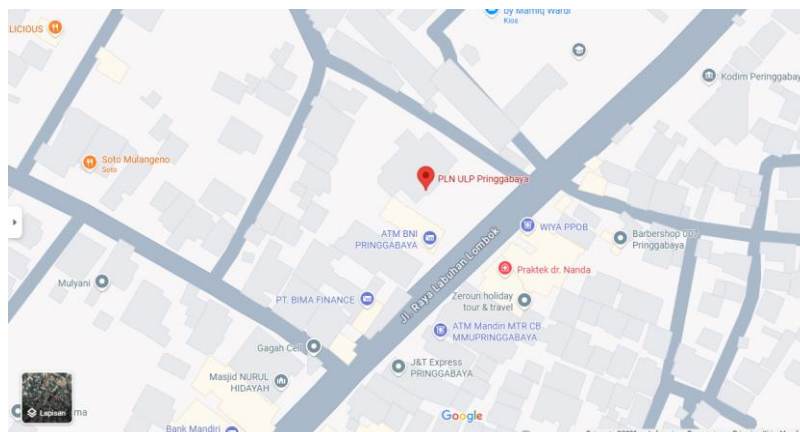
Objek Penelitian

Tempat : Kecamatan Pringgabaya, Kabupaten Lombok Timur,
Nusa Tenggara Barat

Waktu : 3 bulan (Januari - Maret)

Penelitian

Detail Lokasi :

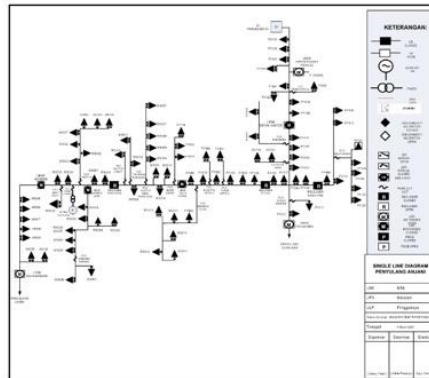


Gambar 2. Peta lokasi penelitian

Data-data Penelitian

a. Detail Gardu : Nomor Gardu PY094, ULP Pringgabaya,
Feeder Anjani
Section Recloser Apitaik – Recloser
Wanasaba

b. Single Line Diagram



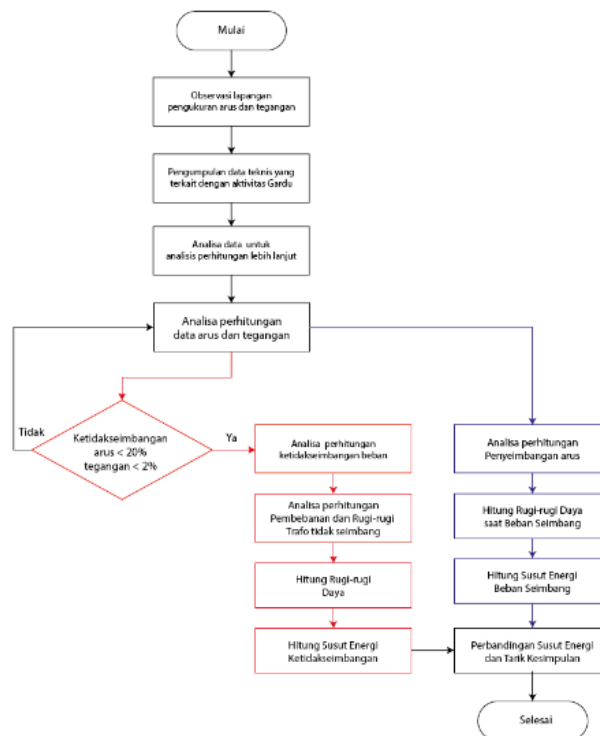
Gambar 3. Single Line Diagram

Tahapan Penelitian

Adapun beberapa tahapan dalam pengambilan data penelitian ini terdiri dari:

- (1) Observasi langsung pada gardu distribusi PY094 untuk mengetahui pengukuran tegangan dan arus pada transformator.
- (2) Wawancara dengan petugas lapangan terkait aktivitas pemeliharaan yang dilakukan serta masalah operasional yang pernah dihadapi.
- (3) Melakukan analisis dokumen teknis dan laporan historis operasi gardu distribusi, termasuk data beban, Single Line Diagram, dan riwayat pengamatan yang sudah ada sebelumnya.
- (4) Melakukan analisa perhitungan tegangan dan arus terkait dengan rugi-rugi trafo pada saat beban puncak yang mengakibatkan adanya ketidakseimbangan beban dan susut energi.
- (5) Membandingkan hasil data rugi-rugi trafo ketika beban tidak seimbang dengan beban seimbang.
- (6) Menghitung rugi-rugi energi dan menghitung selisihnya dibandingkan dengan beban ketika seimbang.

Flowchart



Gambar 4. Flowchart

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran arus dan tegangan pada sisi sekunder trafo serta pada masing-masing jurusan beban, yaitu Jurusan B (Timur) dan Jurusan D (Barat). Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali pada periode waktu yang berbeda, mencerminkan kondisi beban yang bervariasi berdasarkan aktivitas pelanggan dan jam beban puncak (Rahman et al., 2022).

Data pengukuran yang diperoleh kemudian diolah dengan cara mengambil nilai rata-rata dari masing-masing parameter (arus dan tegangan tiap fasa), sebagai gambaran nilai umum dari beban dalam jangka waktu tertentu. Meskipun terdapat selisih waktu antar pengukuran, rata-rata dianggap relevan untuk memberikan gambaran umum kondisi beban secara menyeluruh. Selain itu, analisis terhadap hasil pengukuran tegangan dan arus dilakukan untuk mengidentifikasi apakah ketidakseimbangan beban pada ULP Pringgabaya 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 PY094 PLN, ULP Pringgabaya, penyulang Anjani

- a. Voltmeter
- b. Ampere meter

Analisa Pengukuran Tegangan dan Arus

a) Pengukuran Jurusan B

Tabel 1. Pengukuran Tegangan dan Arus Jurusan B

Tanggal	Arus Fasa R	Arus Fasa S	Arus Fasa T	Teg. Ujung R	Teg. Ujung S	Teg. Ujung T	Arus Netral
12 Mar 2025	163	78	123	211	205	204	70
2 Mar 2025	121	123	95	211	205	204	52
29 Juli 2024	121	123	95	211	205	204	52
25 Dec 2024	94	185	59	211	205	204	87
18 Agust 2023	20	142	80	211	205	204	56
Average	103,8	130,2	90,4	211	205	204	63,4

b) Pengukuran Jurusan D

Tabel 2. Pengukuran Tegangan dan Arus Jurusan D

Tanggal	Arus Fasa R	Arus Fasa S	Arus Fasa T	Teg. Ujung R	Teg. Ujung S	Teg. Ujung T	Arus Netral
12 Mar 2025	51	23	25	210	212	213	27
2 Mar 2025	33	18	13	210	212	213	23
29 Juli 2024	33	18	13	210	212	213	23
25 Dec 2024	25	22	21	210	212	213	7
18 Agust 2023	95	9	30	210	212	213	56
Average	47,4	18	20,4	210	212	213	27,2

c) Pengukuran Sisi Beban Sekunder

Tabel 3. Pengukuran Tegangan dan Arus Sisi Sekunder Trafo

Tanggal	Arus Fasa R	Arus Fasa S	Arus Fasa T	Tegangan R-S	Tegangan R-T	Tegangan S-T	Tegangan R-N	Tegangan S-N	Tegangan T-N	Arus Netral
12 Mar 2025	223	149	113	407	404	404	229	230	230	89
2 Mar 2025	158	141	106	409	407	409	232	230	231	63
29 Juli 2024	146	141	122	409	407	409	232	230	231	52
25 Dec 2024	124	220	81	409	412	410	233	230	234	103
18 Agust 2023	113	153	112	414	411	414	235	233	234	53
Average	152,8	160,8	106,8	409,6	408,2	409,2	232,2	230,6	232	72

Analisa Data Pengukuran

Setelah dilakukan observasi pengukuran dan pengamatan yang terkait dengan nilai tegangan dan arus pada titik sambung, selanjutnya dilakukan analisa perhitungan ketidakseimbangan beban untuk mengidentifikasi penyebab susut energi.

Analisa Data Tegangan dan Arus

a) Tegangan Jurusan B dan D

Tegangan ujung (R, S, T) relatif konstan sekitar 204–213 V

b) Arus Jurusan B

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada Jurusan B (Timur), diperoleh rata-rata arus fasa sebesar 103,8 A untuk fasa R, 130,2 A untuk fasa S, dan 90,4 A untuk fasa T. Nilai rata-rata arus netral tercatat sebesar 63,4 A, yang menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban antar fasa. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan signifikan antara arus maksimum dan minimum antar fasa, di mana fasa S memiliki beban paling tinggi, sementara fasa T merupakan yang paling

rendah. Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus mengalir pada penghantar netral, yang berdampak pada peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi sistem distribusi.

c) Arus jurusan D

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada Jurusan D (Barat), diperoleh rata-rata arus fasa sebesar 47,4 A untuk fasa R, 18 A untuk fasa S, dan 20,4 A untuk fasa T. Sementara itu, arus netral tercatat rata-rata 27,2 A, menunjukkan ketidakseimbangan beban yang cukup signifikan di antara ketiga fasa. Ketimpangan ini diperkuat oleh dominasi beban pada fasa R, yang secara konsisten menunjukkan nilai arus tertinggi dibanding fasa lainnya. Meskipun tegangan antar fasa relatif stabil dengan rata-rata 210 V – 213 V, distribusi arus yang tidak merata menyebabkan arus netral cukup tinggi. Ketidakseimbangan ini dapat menimbulkan rugi-rugi energi dan berdampak negatif terhadap efisiensi trafo distribusi.

Analisa Data Beban Sekunder Trafo

Pengukuran pada sisi sekunder trafo dilakukan untuk mengetahui karakteristik beban total yang ditanggung oleh transformator distribusi. Parameter yang diamati mencakup arus tiap fasa (R, S, T), arus netral, serta tegangan antar fasa dan tegangan fasa terhadap netral. Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.4, dapat disimpulkan bahwa terdapat variasi nilai arus antar fasa yang cukup signifikan. Rata-rata arus fasa yang diperoleh adalah:

- a. Arus fasa R: 152,8 A
- b. Arus fasa S: 160,8 A
- c. Arus fasa T: 106,8 A
- d. Arus netral: 72 A

Perbedaan signifikan pada arus ketiga fasa menunjukkan adanya beban tidak seimbang yang cukup tinggi. Arus fasa S lebih besar dibandingkan fasa R dan T, sementara fasa T memiliki arus paling kecil. Hal ini menyebabkan arus netral cukup besar, yakni **72 A**, yang seharusnya mendekati nol apabila sistem benar-benar seimbang.

Analisa Ketidakseimbangan Beban

Dari data Tabel pengukuran dan pengamatan tegangan arus, perlu dilakukan analisa perhitungan ketidakseimbangan beban guna mengetahui total rugi-rugi. Definisi dari ketidakseimbangan adalah ketika arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar (didistribusikan) karena adanya penyusutan. Analisis ketidakseimbangan arus beban pada Jurusan B dilakukan dengan menggunakan nilai rata-rata dari lima kali pengukuran yang dilakukan pada waktu yang berbeda. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran

umum mengenai pola distribusi beban antar fasa dalam jangka waktu tertentu, tanpa terpengaruh oleh fluktuasi beban. Nilai rata-rata arus untuk fasa R, S, dan T kemudian dijadikan dasar dalam perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban menggunakan metode deviasi terhadap rata-rata arus. Untuk menghitung persentase ketidakseimbangan bisa dicari menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Unbalance total (\%)} = \frac{I_{\max} - I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{rata-rata}}} \times 100\%$$

a) Analisa Ketidakseimbangan beban Jurusan B

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan B:

$$\text{Unbalance (\%)} = \frac{I_{B\max} - I_{B\text{rata-rata}}}{I_{B\text{rata-rata}}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{103,8 + 130,2 + 90,4}{3} = 108,13 \text{ A}$$

Unbalance :

$$\text{Unbalance (\%)} = \frac{130,2 - 108,13}{108,13} \times 100 = \mathbf{20,41 \%}$$

Ketidakseimbangan sebesar 20,4% tergolong tinggi dan dapat menimbulkan dampak teknis, seperti meningkatnya arus netral, kerugian daya tambahan, serta pemanasan berlebih pada kabel dan transformator.

b) Analisa Ketidakseimbangan beban Jurusan D

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan D:

$$\text{Unbalance (\%)} = \frac{I_{D\max} - I_{D\text{rata-rata}}}{I_{D\text{rata-rata}}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{47,4 + 18 + 20,4}{3} = 28,6 \text{ A}$$

Unbalance :

$$\text{Unbalance (\%)} = \frac{47,4 - 28,6}{28,6} \times 100 = \mathbf{65,7 \%}$$

Nilai ini menunjukkan ketidakseimbangan arus beban yang sangat tinggi, bahkan lebih besar dibandingkan jurusan B yang hanya mencapai 20,4%. Ketimpangan distribusi beban ini berpotensi menyebabkan peningkatan arus netral, rugi daya, serta mempercepat kerusakan peralatan distribusi, khususnya pada jalur-jalur yang terbebani berat.

Analisa Susut Energi

Ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan arus netral yang cukup besar, yang pada akhirnya akan menimbulkan rugi-rugi daya (power loss) pada penghantar. Rugi daya ini dapat dihitung dengan rumus:

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

Dimana,

E_B = Susut energi per hari

P_{loss} = rugi daya (watt)

R = resistansi penghantar

t = waktu

a) Susut Jurusan B

- Rata-rata arus netral : 63,4 A
- R = asumsikan 0,6 ohm
- Waktu : 12 jam beban puncak

Substitusi,

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

$$E_B = 63,4^2 \times 0,6 \times 12$$

$$E_B = 28.940,8 \text{ Wh} = 28,94 \text{ kWh/hari}$$

b) Susut Jurusan D

- Rata-rata arus netral : 27,2 A
- R = asumsikan 0,6 ohm
- Waktu : 12 jam beban puncak

Substitusi,

$$E_B = I_{N(D)}^2 \times R \times t$$

$$E_B = 27,2^2 \times 0,6 \times 12$$

$$E_B = 5.326,8 \text{ Wh} = 5,32 \text{ kWh/hari}$$

Untuk Jurusan B, arus netral sebesar 63,4 A menghasilkan rugi energi sebesar 28,94 kWh per hari, sedangkan untuk Jurusan D dengan arus netral 27,2 A menghasilkan rugi energi sebesar 5,32 kWh per hari. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban berkontribusi signifikan terhadap susut energi harian pada gardu distribusi.

Analisa Ketidakseimbangan Arus Menggunakan Simulasi ETAP

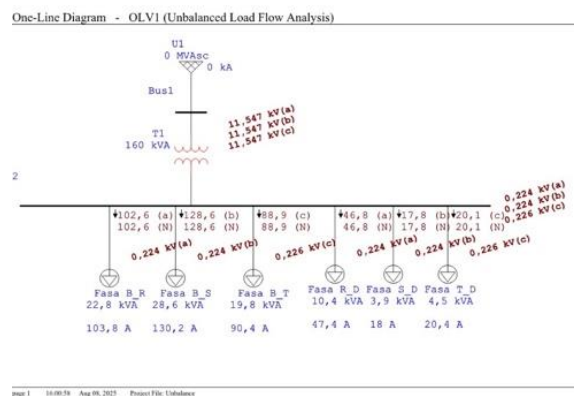
Penyeimbangan arus fasa pada dasarnya bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi pada saluran penghantar khususnya rugi-rugi pada saluran penghantar netral, dan menyeimbangkan pembebanan pada masing-masing fasa agar tidak terjadi salah satu fasa dibebani oleh beban yang lebih tinggi dibandingkan fasa yang lainnya. Upaya penyeimbangan beban pada Gardu Distribusi PY094 dilakukan melalui pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP versi 12.6. Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengevaluasi dampak pembagian beban antar fasa terhadap penurunan ketidakseimbangan arus, arus netral, dan susut energi sistem distribusi.

Pembuatan Model Sistem

Model sistem dibangun berdasarkan konfigurasi aktual gardu distribusi, yang terdiri dari:

- (1) 1 unit transformator kapasitas 160Kv.
- (2) Jurusan utama beban: Jurusan B (Timur) dan Jurusan D (Barat).
- (3) Lumped load (3 untuk tiap jurusan) yang mewakili beban masing-masing fasa.
- (4) Koneksi fasa yang disesuaikan dengan hasil pengukuran lapangan

Berikut model / tampilan sistem yang telah dibuat



Gambar 5. Model sistem gardu pada ETAP

Analisa ketidakseimbangan Arus

Nilai ketidakseimbangan arus yang diperoleh dari simulasi ETAP tidak sepenuhnya identik dengan hasil pengukuran lapangan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kondisi real-time di lapangan yang melibatkan variasi beban seperti sambungan tidak merata antar fasa, serta macam-macam karakteristik beban yang tidak seluruhnya dimodelkan dalam simulasi. Meskipun demikian, pola ketidakseimbangan beban tetap terlihat konsisten, sehingga model

simulasi masih relevan untuk menggambarkan kecenderungan distribusi arus dan mendukung pengambilan keputusan teknis.

a) Jurusan B

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan B:

$$Unbalance (\%) = \frac{I_{Bmax} - I_{Brata-rata}}{I_{Brata-rata}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{105,8 + 132,6 + 91,6}{3} = 110 \text{ A}$$

Unbalance :

$$Unbalance (\%) = \frac{132,6 - 110}{110} \times 100 = \mathbf{20,55\%}$$

b) Jurusan D

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan D:

$$Unbalance (\%) = \frac{I_{Dmax} - I_{Drata-rata}}{I_{Drata-rata}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{48,3 + 18,3 + 20,7}{3} = 29,1 \text{ A}$$

Unbalance :

$$Unbalance (\%) = \frac{48,3 - 29,1}{29,1} \times 100 = \mathbf{65,9 \%}$$

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan, nilai ketidakseimbangan arus pada Jurusan B sebesar 20,41% dan Jurusan D sebesar 65,7%, yang dihitung dari selisih arus antar fasa terhadap rata-rata arus total. Nilai ini mencerminkan kondisi aktual ketidakseimbangan distribusi beban antar fasa pada sistem distribusi Gardu PY094. Sementara itu, hasil simulasi unbalanced load flow menggunakan perangkat lunak ETAP menunjukkan bahwa arus masing-masing fasa di Bus2 adalah 105,8 A (fase A), 132,6 A (fase B), dan 91,6 A (fase C), dengan rata-rata sebesar 110 A. Dari perhitungan, diperoleh nilai ketidakseimbangan arus simulasi sebesar 37,27% di Jurusan B dan 65,9% di Jurusan D.

Perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran terjadi akibat model ETAP yang tidak sepenuhnya mencerminkan seluruh spesifikasi beban di lapangan, seperti faktor daya tiap fasa, sifat beban non-linear, dan koneksi aktual pelanggan (Kusnadi et al., 2018). Namun demikian, kecenderungan ketidakseimbangan tetap terlihat konsisten, dengan fasa B sebagai fasa terberat dan fasa C sebagai fasa teringan, baik dalam pengukuran maupun simulasi.

Analisa Penyeimbangan Arus

Penyeimbangan arus antar fasa merupakan langkah penting dalam sistem distribusi tenaga listrik untuk menjaga kestabilan operasi jaringan dan meminimalkan rugi-rugi daya. Berdasarkan hasil analisa ketidakseimbangan beban pa sebelumnya, diketahui bahwa distribusi beban pada Gardu PY094 mengalami ketimpangan yang cukup signifikan, terutama pada jurusan D yang menunjukkan nilai ketidakseimbangan arus mencapai 65,7%. Kondisi ini berkontribusi terhadap tingginya arus netral dan meningkatnya susut energi harian.

a) Penyeimbangan Jurusan B

1. Arus beban penuh

$$I_{s(FL)} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{160.000}{\sqrt{3} \times 400} = 230,9$$

2. Arus Seimbang sisi Sekunder

$$I_{sec} = \frac{103,8 + 130,2 + 90,4}{3} = 108,13 \text{ A}$$

3. Persentase pembebanan tiap fasa

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

$$\%I_{sec} = \frac{108,3}{230,9} \times 100\% = 46,82\%$$

b) Penyeimbangan Jurusan D

1. Arus beban penuh

$$I_{s(FL)} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{160.000}{\sqrt{3} \times 400} = 230,9$$

2. Arus Seimbang sisi Sekunder

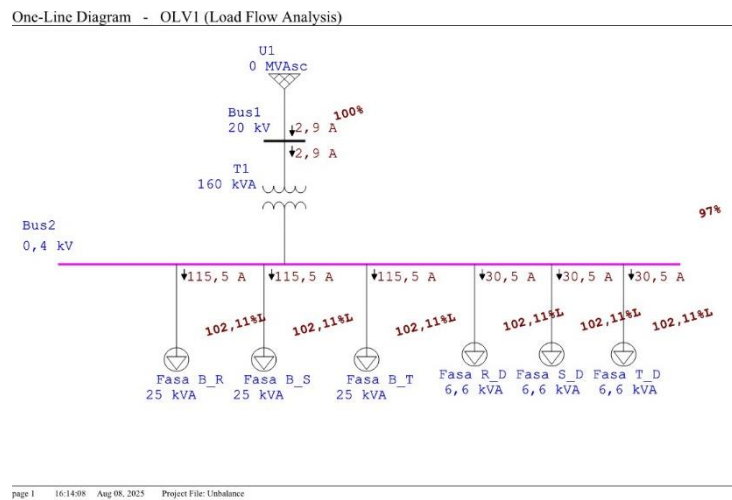
$$I_{sec} = \frac{47,4 + 18 + 20,4}{3} = 28,6 \text{ A}$$

3. Persentase pembebanan tiap fasa

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

$$\%I_{sec} = \frac{28,6}{230,9} \times 100\% = 12,38\%$$

Simulasi penyeimbangan dengan ETAP



Gambar 6. Simulasi Penyeimbangan Beban dengan ETAP

Hitung daya total yang mengalir di tiap fase dengan rumus:

Daya Beban (kVA) = %Pembebanan x Daya Trafo

$$\text{Daya Beban (kVA)} = \frac{\% \text{Pembebanan} \times \text{Daya Trafo}}{100}$$

- Jurusan B

$$\text{Daya Beban (kVA)} = \frac{46,82 \times 160}{100} = 74,91 \text{ kVA}$$

$$\text{Daya Beban tiap fasA (kVA)} = \frac{74,91}{3} = 24,97 \approx 25 \text{ kVA}$$

- Jurusan D

$$\text{Daya Beban (kVA)} = \frac{12,38 \times 160}{100} = 19,81 \text{ kVA}$$

$$\text{Daya Beban tiap fasA (kVA)} = \frac{19,81}{3} = 6,6 \text{ kVA}$$

Berdasarkan hasil simulasi penyeimbangan arus menggunakan perangkat lunak ETAP, dilakukan pengaturan ulang nilai beban pada masing-masing fase untuk dua jurusan utama, yaitu Jurusan B dan Jurusan D, sesuai dengan persentase pembebanan aktual hasil perhitungan. Jurusan B disimulasikan dengan pembebanan sebesar 46,82%, sementara Jurusan D disimulasikan dengan 12,38% dari kapasitas penuh transformator (160 kVA).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengukuran, analisa data, dan simulasi yang telah dilakukan pada gardu distribusi PY094 sebagai objek penelitian, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

(1) Ketidakseimbangan Beban Teridentifikasi Signifikan: Berdasarkan 5 (lima) data pengukuran arus dan tegangan pada sisi sekunder trafo dengan waktu berbeda, diperoleh nilai rata-rata arus fasa 103,8 A untuk fasa R, 130,2 A untuk fasa S, dan 90,4 A untuk fasa T di jurusan B dan rata-rata arus fasa sebesar 47,4 A untuk fasa R, 18 A untuk fasa S, dan 20,4 A untuk fasa T di jurusan D. Sedangkan nilai rata-rata arus netral tercatat sebesar 63,4 A di jurusan B dan 27,2 A di jurusan D. Ketidakseimbangan arus yang dihitung dari data tersebut menunjukkan nilai unbalance sebesar 20,41% untuk Jurusan B dan 65,7% untuk Jurusan D, yang termasuk dalam kategori tidak seimbang secara operasional. (2) Tingginya Arus Netral dan Rugi Energi: Ketidakseimbangan arus ini menyebabkan arus netral yang secara teknis menunjukkan aliran arus kembali akibat distribusi beban yang tidak merata. Hal ini mengakibatkan rugi daya pada sistem distribusi, dengan estimasi susut energi harian mencapai 28,94 kWh/hari, jika diasumsikan sistem beroperasi selama 12 jam per hari. (3) Simulasi ETAP Menggambarkan Kondisi Aktual Sistem: Model jaringan distribusi yang disimulasikan menggunakan ETAP 12.6 berhasil menampilkan kondisi unbalance secara visual dan numerik. Dari simulasi diperoleh data arus masing-masing fasa pada Bus2 yaitu 105,8 A (a), 132,6 A (b), dan 91,6 A (c), yang menunjukkan kecenderungan beban lebih tinggi pada fasa B, konsisten dengan hasil pengukuran lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan masukan berharga selama proses penelitian hingga penulisan artikel ini. Tidak lupa terima kasih kepada pihak PLN ULP Pringgabaya, khususnya tim lapangan Gardu Distribusi PY094, yang telah memberikan izin, bantuan, serta data teknis yang sangat mendukung pelaksanaan penelitian. Terima kasih juga kepada keluarga, rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang, serta semua pihak yang telah memberikan dukungan moril maupun materil. Semoga segala bantuan dan kontribusi yang telah diberikan mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT.

DAFTAR REFERENSI

- Fath Ashari, D., R. L., & Alimin. (2021). Analisis gangguan gardu distribusi di PT PLN (Persero) ULP Watang Sawitto.
- Hamma, N. I. (2021). Perencanaan gardu distribusi PT. Maccon Indonesia.
- Haris, A., & Agtriadi, H. B. (2017). Analisis sistem penentuan lokasi gangguan jaringan distribusi listrik terintegrasi Google Map. *Jurnal Ilmiah Fifo*, 9(1), 1–4. <https://doi.org/10.22441/fifo.v9i1.1436>
- Haris, M. H., & Sultan, A. R. (2023). Optimasi penyeimbangan beban gardu distribusi terhadap penurunan rugi energi dengan metode seimbang beban seharian. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 7(3), 14–20. <https://doi.org/10.33795/elposys.v7i3.663>
- Kusnadi, A., & Lestari, D. (2018). Analisis kualitas energi listrik pada jaringan distribusi akibat beban tidak linear. *Jurnal Teknologi Elektro*, 9(1), 33–40. <https://doi.org/10.22236/jte.v9i1.251>
- Nixon, N. M., Maickel, T., & Lisi, F. (2015). Penyusutan energi listrik pada penyulang SU2 jaringan distribusi Minahasa Utara. *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*.
- Novfowan, A. D., Mieftah, M., Kusuma, W., & Negeri Malang, P. (2020). Alternatif penanganan losses akibat ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi. *Jurnal Teknik: Ilmu dan Aplikasi*, 8(1).
- Rahman, F., & Yusuf, M. (2022). Optimalisasi penyaluran energi listrik melalui penyeimbangan beban transformator distribusi. *Jurnal Energi dan Sistem Tenaga*, 5(2), 89–97. <https://doi.org/10.20885/jest.vol5.iss2.art4>
- Setiawan, B., & Prabowo, A. (2020). Analisis rugi-rugi daya pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 16(2), 65–72. <https://doi.org/10.17529/jre.v16i2.16200>
- Sutanto, D., & Suharto, R. (2019). Evaluasi kualitas daya listrik pada sistem distribusi menggunakan perangkat lunak ETAP. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 11(1), 45–52. <https://doi.org/10.33322/jek.v11i1.801>
- Tharo, Z., Tarigan, A. D., & Pulungan, R. (2018). Pengaruh pemakaian beban tidak seimbang terhadap umur peralatan listrik. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 1(1), 10–15. <https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.2256>
- Tobi, M. D. (2018). Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada transformator distribusi di PT PLN (Persero) Area Sorong. *Electro Luceat*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.32531/jelekn.v4i1.80>
- Ulinnuha, A. E. (2023). Analisis susut energi listrik pada trafo distribusi 160 KVA di Gardu Distribusi SP022 PLN ULP Sape Penyulang Sari akibat ketidakseimbangan beban. *Jurnal Elektronika dan Teknik Informatika Terapan*, 3(1), 23–40. <https://doi.org/10.59061/jentik.v3i1.950>

- Wijaya, H., & Putra, A. P. (2021). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator distribusi. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 10(3), 123–130. <https://doi.org/10.21009/jtek.v10i3.3312>
- Yuntyansyah, P. A., Wibawa, I. U., & Utomo, I. T. (2014). Studi perkiraan susut teknis dan alternatif perbaikan pada penyulang Kayoman Gardu Induk Sukorejo.