



**PERHITUNGAN PERBAIKAN SUSUT PADA GARDU DISTRIBUSI RN 004
DI PT PLN (PERSERO) ULP BIMA KOTA**

Imam Priambudi^{1*}, Desi Maulidyawati², Indra Darmawan³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Universitas Teknologi Sumbawa

email: imampriambudi2@gmail.com^{1*}

Abstrak: Permintaan pasokan energi listrik yang berkelanjutan semakin meningkat seiring dengan pesatnya perkembangan sektor industri dan kebutuhan masyarakat akan listrik yang stabil. Keandalan jaringan distribusi listrik, khususnya gardu distribusi, memegang peranan penting dalam menjamin keberlanjutan pasokan energi. Gardu distribusi sering kali mengalami gangguan yang mengurangi efisiensi operasional dan mengganggu pelayanan. Penelitian ini berfokus pada analisis perbaikan susut energi pada Gardu Distribusi RN004, yang teridentifikasi memiliki potensi beban tidak seimbang tinggi serta risiko gangguan pada transformator, yang menyebabkan kerugian energi dan peningkatan nilai ENS (*Energy Not Served*). Metode penelitian yang digunakan adalah kuantitatif dengan pendekatan analisis deskriptif dan inferensial. Data yang dikumpulkan mencakup pengukuran aliran listrik, beban pada gardu distribusi, serta data sebelum dan sesudah dilakukan pemerataan beban. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai ENS dan biaya ekonomis yang dihasilkan dari perbaikan susut energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setelah perbaikan, total ENS pada Gardu RN004 berkurang menjadi 2.152,8 kWh, yang setara dengan penghematan biaya sebesar Rp 3.158.157,- per bulan. Penurunan ENS ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi operasional PLN, yang mendukung keberlanjutan pasokan energi yang lebih stabil dan ramah lingkungan. Penelitian ini menunjukkan bahwa perbaikan infrastruktur distribusi memiliki dampak signifikan terhadap pengurangan kerugian energi dan keberlanjutan sistem distribusi listrik.

Kata Kunci : ENS, Susut, Beban Tidak Seimbang, Keandalan Jaringan Listrik, Gardu distribusi, PLN

PENDAHULUAN

Sebagai perusahaan milik negara, PT PLN (Persero) memiliki otoritas penuh untuk memastikan pasokan energi listrik yang konsisten kepada pelanggannya. PT PLN (Persero) bertanggung jawab atas semua proses, mulai dari produksi hingga pendistribusian tenaga listrik kepada pelanggan. Fokus utama PLN adalah kepuasan pelanggan dan kinerja keuangan yang sehat. Salah satu tantangan utama yang dihadapi adalah mengurangi kerugian dan meningkatkan efisiensi distribusi listrik. Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi distribusi listrik adalah susut, yang merupakan indikator kinerja utama PLN dalam sektor distribusi.

Susut teknis terjadi ketika peralatan pembangkit dan penyaluran terhalang selama transmisi dan distribusi. Susut energi adalah energi listrik yang hilang atau terbuang dalam proses penyaluran dari pembangkit listrik ke pelanggan dan tidak tercatat sebagai konsumsi pelanggan, sehingga menjadi kerugian bagi perusahaan listrik seperti PLN. Susut ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu susut teknis dan susut non-teknis. Susut teknis terjadi karena faktor teknis, seperti hambatan pada kabel penghantar, transformator, atau peralatan distribusi lainnya, yang menyebabkan rugi daya berupa panas yang dilepaskan ke lingkungan. Akibatnya, energi listrik yang sampai ke pelanggan lebih sedikit dari yang dihasilkan pembangkit. Contoh susut teknis adalah energi yang hilang akibat resistansi kabel listrik atau inefisiensi pada trafo. Sementara itu, susut non-teknis disebabkan oleh faktor non-teknis, seperti pencurian listrik, kesalahan pencatatan meteran, atau pelanggan ilegal, yang menyebabkan energi yang disalurkan tidak tercatat dalam sistem penjualan. Susut energi ini menjadi kerugian besar bagi perusahaan, karena meskipun energi hilang, biaya produksi dan distribusinya tetap harus dikeluarkan. Oleh karena itu, upaya untuk mengelola dan meminimalkan susut energi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan perusahaan listrik.

Gardu Distribusi RN004 di ULP Bima Kota merupakan gardu yang beroperasi pada tegangan distribusi 20 kV dan menghadapi permasalahan susut daya akibat ketidakseimbangan beban antar fasa. Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus netral yang besar, meningkatkan rugi daya, dan menurunkan efisiensi distribusi energi. Masalah ini sering disebabkan oleh distribusi pelanggan yang tidak merata atau fluktuasi beban yang tidak terkendali. Penelitian pada Gardu RN004 bertujuan untuk menganalisis dan mengurangi susut daya melalui langkah pemerataan beban antar fasa. Dengan meminimalkan rugi daya, penelitian ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi distribusi, pengurangan biaya operasional, dan stabilitas pasokan listrik yang lebih andal bagi pelanggan di wilayah Gardu RN004. Hasilnya diharapkan dapat menjadi solusi untuk diterapkan di gardu lain dengan permasalahan serupa. Adapun tujuan penelitian ini secara spesifik adalah :

1. Mengukur Besaran Kerugian Susut Daya: Menilai sejauh mana kerugian akibat susut daya yang terjadi pada gardu distribusi bertegangan rendah, dengan fokus pada aspek teknis yang mempengaruhi efisiensi distribusi energi listrik.
2. Mengurangi Dampak Susut Daya: Melakukan evaluasi untuk menemukan solusi yang efektif dalam meminimalkan susut daya, dengan harapan dapat mengurangi kerugian yang dialami oleh perusahaan distribusi listrik dan meningkatkan kualitas pasokan listrik kepada konsumen.
3. Meningkatkan Efisiensi Jaringan Distribusi: Menyusun rekomendasi teknis yang dapat diterapkan untuk memperbaiki kinerja gardu distribusi dan mengoptimalkan distribusi energi listrik, guna mencapai efisiensi yang lebih baik dalam jangka panjang. Langkah-langkah ini bertujuan untuk mengurangi rugi daya, meningkatkan kinerja gardu distribusi,



dan memastikan energi listrik tersalurkan secara efisien. Dengan pendekatan ini, sistem distribusi dapat beroperasi lebih andal dan hemat energi dalam jangka panjang, sekaligus memenuhi kebutuhan pelanggan dengan kualitas yang lebih baik

Dengan demikian, untuk menjaga kinerja PLN, memaksimalkan keuntungan perusahaan, dan meminimalkan ENS (*Energy Not Served*), ini menekankan pentingnya mengurangi susut daya untuk menjaga kinerja operasional PLN, meningkatkan keuntungan perusahaan, dan menurunkan ENS (*Energy Not Served*), yaitu energi yang tidak terlayani akibat gangguan atau ketidakseimbangan sistem. Dengan menekan susut daya, PLN dapat meningkatkan efisiensi distribusi energi, mengurangi kerugian finansial, dan memberikan pasokan listrik yang lebih andal serta berkualitas bagi pelanggan. Langkah ini juga memperkuat posisi keuangan perusahaan dalam menghadapi tantangan distribusi energi di masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam hal efisiensi teknis dan pengurangan kerugian finansial bagi PLN. Dengan memperbaiki susut daya dan mengurangi ENS dengan cara pemerataan beban, PLN dapat memberikan pasokan listrik yang lebih stabil dan andal, yang pada gilirannya akan meningkatkan kualitas layanan kepada konsumen dan memperkuat posisi keuangan perusahaan.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Transformator Distribusi

Transformator adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk menyesuaikan tegangan yang sesuai dengan kebutuhan distribusi daya. Dengan desainnya yang sederhana namun andal, transformator memungkinkan penyesuaian tegangan yang efisien untuk berbagai kebutuhan, termasuk transmisi energi listrik dalam jarak yang jauh [1]. Keberadaan transformator sangat penting dalam sistem distribusi tenaga listrik, karena transformator mendistribusikan energi listrik ke konsumen dengan memastikan tegangan yang tepat pada titik penerimaan.

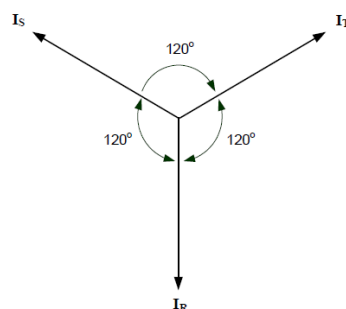
B. Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban pada transformator terjadi ketika beban pada masing-masing fasa tidak sama. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti perbedaan arus pada setiap fasa jaringan tegangan rendah atau sambungan rumah baru yang tidak memperhatikan pembebanan pada trafo. Dalam sistem tiga fasa, ketidakseimbangan beban ini dapat mengarah pada arus netral yang berlebihan, yang mengakibatkan peningkatan kerugian daya (*losses*) dan dampak negatif pada transformator. Jika kita mempertimbangkan transformator tiga fase dengan beban yang tidak seimbang, maka arus pada setiap fasa (I_a , I_b , I_c) akan berbeda-beda. Arus netral (I_n) dapat dihitung sebagai berikut :

$$I_n = \sqrt{(I_a - I_b)^2 + (I_b - I_c)^2 + (I_c - I_a)^2} \dots\dots\dots (1)$$

Rumus ini digunakan untuk mengukur besar arus yang mengalir melalui penghantar netral akibat ketidakseimbangan pada transformator. Semakin besar arus netral, semakin besar pula kerugian daya yang terjadi dalam distribusi energi listrik [2]. Ketidakseimbangan ini dapat meningkatkan kerugian tembaga karena arus netral akan mengalir melalui sistem grounding dan menambah beban pada lilitan transformator. Selain itu, tingginya arus pada fasa netral dapat menyebabkan *overloading* pada netral, panas berlebih, dan masalah keselamatan.

Gambar 1 adalah Diagram Sudut Fasa (Vektor) Arus Seimbang, yang menjelaskan kondisi ideal dari arus pada sistem distribusi tiga fasa. Kondisi Arus Seimbang adalah Arus pada setiap fasa (I_R , I_S , I_T) memiliki besar yang sama dan Sudut fasa antara setiap pasangan fasa adalah 120° , sehingga vektor arus membentuk pola simetris. Pusat Vektor (Netral) adalah Pada kondisi seimbang, jumlah vektor arus pada ketiga fasa adalah nol. Hal ini berarti tidak ada arus yang mengalir pada penghantar netral. Manfaat Kondisi Seimbang adalah Kondisi ini mengurangi rugi daya (*losses*) dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi Listrik dan Transformator dan penghantar bekerja dalam performa optimal, tanpa panas berlebih atau kerugian tambahan. Aplikasi dalam penelitian yaitu Diagram ini relevan untuk menunjukkan pentingnya pemerataan beban pada trafo distribusi, yang bertujuan untuk mendekati kondisi ideal ini. Ketidakseimbangan beban akan menyebabkan munculnya arus netral, yang dapat meningkatkan kerugian daya

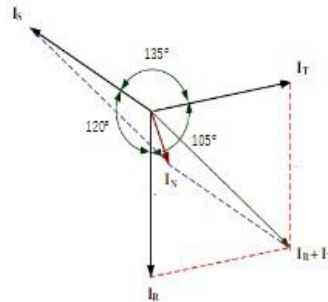


Gambar 1. Diagram sudut fasa (vektor) arus seimbang

Gambar 2 menggambarkan diagram sudut fasa arus dalam kondisi tidak seimbang. Ketika kondisi beban tidak seimbang, vektor arus dari masing-masing fasa (R, S, T) tidak akan saling meniadakan, menghasilkan arus netral (I_N). Gambar ini membantu menjelaskan visualisasi efek ketidakseimbangan beban terhadap arus netral, yang menjadi parameter kunci dalam perhitungan rugi daya.

Kemungkinan transformator dalam keadaan tidak seimbang yaitu dalam kondisi :

1. Ketiga vektor arus/tegangan memiliki besar yang sama, namun sudut fase antar vektor tidak 120° satu sama lain
2. Ketiga vektor arus/tegangan memiliki besar yang berbeda, namun sudut fase di antara mereka membentuk 120° satu sama lain
3. Ketiga vektor arus/tegangan memiliki besar yang berbeda, dan sudut fase antar vektor juga tidak 120° satu sama lain.



Gambar 2. Diagram sudut fasa (vektor) arus keadaan tidak seimbang

Diagram ini relevan dalam penelitian karena memberikan representasi grafis tentang dampak ketidakseimbangan beban terhadap distribusi arus dalam sistem tiga fasa. Informasi ini digunakan untuk menganalisis dan mengurangi ketidakseimbangan beban yang terjadi di Gardu RN004. Gambar 2 menunjukkan diagram sudut fasa (vektor) pada kondisi ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan terjadi ketika jumlah vektor arus fasa (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol yang menyebabkan munculnya arus netral (I_N). Munculnya arus netral ini disebabkan Karena ketidakseimbangan arus, jumlah vektor arus dari ketiga fasa tidak sama dengan nol, sehingga menghasilkan arus netral (I_N) dan Arus netral ini akan mengalir melalui penghantar netral, meningkatkan kerugian daya (losses) dalam sistem distribusi. Kondisi ini mempengaruhi kerugian daya yang dialami transformator dan menurunkan efisiensi sistem distribusi listrik. [4]

Pengaruh ketidakseimbangan adalah Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh distribusi beban yang tidak merata di antara ketiga fasa, seperti penambahan beban baru tanpa memperhatikan pemerataan dan Arus netral yang besar dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada penghantar netral, mengurangi efisiensi sistem, dan menimbulkan potensi kerusakan pada peralatan . Saat kondisi beban tidak seimbang, jumlah keseluruhan dari ketiga vektor arus (I_R , I_S , I_T) tidak akan bernilai nol (0), yang menyebabkan munculnya arus netral (I_N). Besarnya arus netral ini bergantung pada tingkat ketidakseimbangan beban tersebut. Untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban secara kuantitatif, langkah pertama adalah menghitung arus rata-rata fasa ($I_{rata-rata}$) menggunakan formula berikut:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2)$$

$$I_R = a \times I_{rata-rata} \quad \text{Maka, } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (3)$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata} \quad \text{Maka, } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (4)$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata} \quad \text{Maka, } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (5)$$

$$I_{tidak\ seimbang} = \frac{(|a-1| + |b-1| + |c-1|)}{3} \dots\dots\dots (6)$$

Dengan :

I_R : Arus Fasa R pada Transformator , I_S : Arus Fasa S pada Transformator , I_T : Arus Fasa T pada Transformator
 Relevansi rumus-rumus ini dalam penelitian adalah untuk mengidentifikasi seberapa besar ketidakseimbangan beban yang terjadi pada Gardu RN004, yang kemudian menjadi dasar untuk mengurangi kerugian daya akibat ketidakseimbangan tersebut.

C. Rugi Daya/Losses

Rugi daya merujuk pada kehilangan daya atau energi listrik yang terbuang sepanjang jalur distribusi. Kerugian ini terjadi karena adanya resistansi pada penghantar yang menyebabkan konversi energi listrik menjadi panas. Selain itu, jatuh tegangan juga terjadi ketika tegangan di titik penerima lebih rendah dibandingkan dengan titik pengiriman akibat adanya hambatan di jalur penghantar. Dalam konteks penelitian ini, penting untuk memahami karakteristik penghantar yang digunakan dalam sistem distribusi. Nilai tahanan (R), reaktansi (X), dan impedansi (Z) dari penghantar memengaruhi besarnya rugi daya yang terjadi. Tabel 2 menyajikan parameter teknis penghantar aluminium yang relevan untuk menghitung kerugian daya pada Gardu Distribusi RN004.



Tabel 1. Berikut adalah daftar nilai tahanan (R), reaktansi (X), dan impedansi (Z) dari berbagai ukuran penghantar

No	Luas Penampang	Tahanan R (ohm/km)	Reaktansi X (ohm/km)	Impedansi Z (Ohm/km)
1	16	1,807	0,354	1,841
2	25	1,187	0,341	1,234
3	35	0,835	0,336	0,898
4	50	0,595	0,319	0,663
5	70	0,437	0,309	0,535
6	95	0,308	0,298	0,429
7	120	0,246	0,291	0,381

Tabel 1 memberikan nilai tahanan (R), reaktansi (X), dan impedansi (Z) penghantar aluminium untuk berbagai ukuran luas penampang. Nilai-nilai ini digunakan untuk menghitung rugi daya pada penghantar netral transformator, yang relevan dengan analisis susut daya di Gardu RN004. Dalam penelitian ini, ukuran penghantar netral yang digunakan gardu RN004 yaitu 70 mm yang berarti tahanan (RN) yang digunakan yaitu 0,437 Ohm.

Ketidakseimbangan beban pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) menghasilkan arus netral yang mengalir melalui penghantar netral transformator. Arus ini berkontribusi pada kerugian daya yang semakin besar apabila ketidakseimbangan beban semakin tinggi. Untuk menghitung besarnya kerugian daya/losses akibat aliran arus netral, digunakan rumus sebagai berikut:

$$PN = IN^2 \times RN \dots\dots\dots (7)$$

Dengan Keterangan: PN = losses pada penghantar netral transformator (watt), IN = arus yang mengalir pada netral transformator (A), RN = tahanan penghantar netral transformator (Ω). Rumus ini digunakan untuk menghitung rugi daya yang terjadi akibat arus netral yang mengalir melalui penghantar netral. Nilai RN diperoleh dari Tabel 1, sesuai dengan spesifikasi penghantar yang digunakan pada Gardu RN004. Semakin tinggi nilai IN atau RN, semakin besar kerugian daya yang terjadi. Analisis ini penting untuk mengidentifikasi penyebab utama kerugian daya dan merancang strategi perbaikan untuk mengurangi susut teknis pada gardu distribusi.

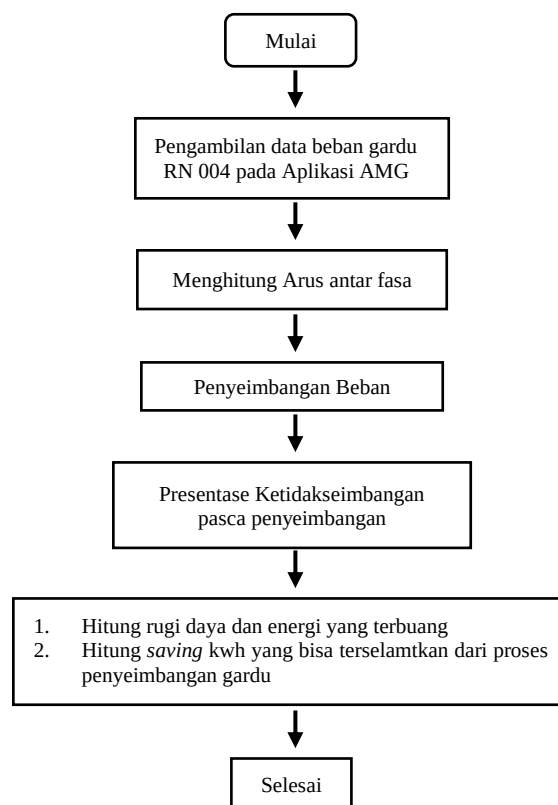
METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif untuk mengukur beban pada gardu distribusi RN004 dan menganalisis ketidakseimbangan arus antara setiap fasa. Data teknis gardu RN004 dikumpulkan melalui Aplikasi Monitoring Gardu (AMG) dan laporan pemerataan beban gardu, yang mencakup arus primer, arus sekunder, tegangan sekunder, impedansi, dan parameter operasional lainnya. Untuk menganalisis ketidakseimbangan beban, data arus setiap fasa (R, S, T) digunakan untuk menghitung ketidakseimbangan berdasarkan rumus yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu rumus (2). Selanjutnya, perhitungan kerugian daya dilakukan dengan menggunakan persamaan (7), di mana PN adalah rugi daya (Watt), IN adalah arus netral (Ampere), dan RN adalah tahanan penghantar netral (Ohm). Data yang dikumpulkan sebelum dan sesudah proses pemerataan beban kemudian dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi efektivitas proses penyeimbangan beban, dengan menggunakan perangkat lunak seperti Microsoft Excel untuk pengolahan data.

Lokasi penelitian ini dilakukan di PT PLN (Persero) ULP Bima Kota pada Gardu RN 004. Gardu RN 004 dipilih sebagai lokasi penelitian karena memiliki tingkat ketidakseimbangan beban yang cukup tinggi. Data historis dari Aplikasi AMG menunjukkan adanya peningkatan arus netral yang signifikan pada gardu ini, yang mengakibatkan kerugian daya (losses) yang tinggi. Selain itu, gardu ini melayani wilayah dengan beban listrik yang fluktuatif, sehingga menjadi objek yang relevan untuk penelitian ini.

1. Diagram Alur Penelitian

Proses penelitian dimulai dengan pengambilan data beban gardu RN 004 melalui Aplikasi Monitoring Gardu (AMG). Data yang dikumpulkan meliputi arus primer, sekunder, tegangan, dan impedansi. Selanjutnya, dilakukan perhitungan arus antar fasa untuk mengevaluasi ketidakseimbangan. Jika ditemukan ketidakseimbangan, dilakukan penyeimbangan beban untuk meratakan distribusi daya. Setelah itu, presentase ketidakseimbangan diukur untuk menilai efektivitas penyeimbangan. Terakhir, dihitung rugi daya dan energi yang terbuang, serta potensi penghematan energi dari proses penyeimbangan gardu. Setelah semua langkah selesai, proses penelitian dianggap selesai..



Gambar 3. Diagram alur penelitian

2. Tahap Awal

Peneliti mengajukan permohonan izin kepada manajer PLN (Persero) ULP Bima Kota untuk melakukan pengambilan data di Gardu RN 004. Proses ini melibatkan penyediaan dokumen administrasi seperti surat permohonan penelitian dan daftar rencana aktivitas penelitian. Pihak yang terlibat dalam proses ini termasuk manajer ULP dan teknisi PLN yang bertanggung jawab atas gardu distribusi.

3. Pengumpulan Data Awal

a. Pengumpulan Spesifikasi Gardu

Tabel 2 menampilkan Data Spesifikasi Gardu RN 004, yang berisi informasi teknis penting terkait dengan gardu distribusi yang digunakan untuk menghitung distribusi beban pada masing-masing fasa. Beberapa spesifikasi yang tertera dalam tabel ini meliputi merk gardu yang diproduksi oleh Trafindo, kapasitas daya gardu sebesar 100 kVA, serta tegangan primer sebesar 20.000 V dan tegangan sekunder 400 V. Selain itu, tercatat juga arus primer sebesar 4,62 A dan arus sekunder 230,95 A, yang menggambarkan arus pada sisi input dan output gardu. Impedansi gardu tercatat 4%, yang mempengaruhi seberapa banyak daya yang hilang dalam proses distribusi karena hambatan. Parameter Junsuan menunjukkan nilai 4, yang mungkin berhubungan dengan kapasitas atau nilai teknis lainnya, sementara tahun produksi gardu ini adalah 2006. Data spesifikasi ini memberikan gambaran teknis lengkap yang diperlukan untuk perencanaan, pemeliharaan, dan pemantauan kinerja operasional gardu distribusi, serta untuk analisis terkait pengurangan susut daya dan efisiensi distribusi energi listrik. Berikut Tabel Data Spesifikasi Gardu RN 004 :

Tabel 2. Data Spesifikasi Gardu RN 004

No	Item	Spesifikasi
1	Merk	Trafindo
2	Daya (kVA)	100
3	Tegangan Primer (V)	20000
4	Tegangan Sekunder (V)	400
5	Arus Primer (A)	4,62
6	Arus Sekunder (A)	230,95
7	Impedansi	4 %
8	Jurusan	4
9	Tahun Produksi	2006



b. Pengumpulan Data Operasional

Data ini dilengkapi dengan nilai pengukuran arus fasa dari Aplikasi AMG untuk memastikan akurasi. Pada Aplikasi AMG (Aplikasi Manajemen Gardu) akan diperoleh nilai dari pembebanan trafo distribusi hasil dari pengukuran beban yang dilaksanakan rutin oleh petugas pemeliharaan gardu distribusi. Berikut merupakan data pengukuran yang diambil dari aplikasi AMG tersebut :

Tabel 3. Data Pengukuran dari Aplikasi AMG

No	Tanggal	Waktu	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	Arus N (A)	Unbalanced Arus (%)
1	22-05-24	18:43	194	99	208	113	27
2	09-10-24	18:43	158	145	152	77	3

Hasil pengukuran arus listrik pada tabel menunjukkan kondisi sebelum dan sesudah pemerataan beban di gardu RN 004. Sebelum pemerataan (22-05-24), arus pada fasa R tercatat sebesar 194 A, yang jauh lebih tinggi dibandingkan fasa S sebesar 99 A dan fasa T sebesar 208 A. Ketidakseimbangan beban ini menghasilkan arus netral sebesar 113 Ampere dengan tingkat ketidakseimbangan (unbalanced arus) mencapai 27%. Setelah dilakukan pemerataan beban (09-10-24), arus pada ketiga fasa menjadi lebih merata, dengan fasa R sebesar 158 A, fasa S sebesar 145 A, dan fasa T sebesar 152 A. Arus netral turun signifikan menjadi 77 A, dan tingkat ketidakseimbangan berkurang drastis dari 27% menjadi 3%. Perubahan ini menunjukkan keberhasilan pemerataan beban dalam mengurangi ketidakseimbangan dan meningkatkan efisiensi distribusi energi listrik.

4. Analisis Data Awal

Data dari pengukuran awal dianalisis untuk menghitung tingkat ketidakseimbangan beban. Perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban listrik pada transformator dilakukan menggunakan data pengukuran arus pada masing-masing fasa (R, S, T). Rumus yang digunakan adalah menggunakan persamaan (2) . Rasio ini dihitung dengan membagi nilai arus pada setiap fasa dengan arus rata-rata. Selisih absolut ($|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|$) menggambarkan seberapa jauh arus pada fasa tertentu berbeda dari kondisi ideal (nilai 1), yang menunjukkan distribusi beban yang seimbang. Setelah menjumlahkan semua selisih absolut, hasilnya dibagi tiga untuk mendapatkan nilai rata-rata ketidakseimbangan. Nilai akhir menunjukkan seberapa jauh distribusi beban pada ketiga fasa berbeda dari kondisi ideal. Semakin kecil nilai ketidakseimbangan, semakin merata distribusi beban antar fasa, yang berarti efisiensi distribusi energi semakin tinggi. Misalnya, jika nilai ketidakseimbangan dihitung sebesar 27%, ini menunjukkan bahwa pemerataan beban diperlukan untuk meningkatkan efisiensi sistem.

5. Penyeimbangan Beban

Rekomendasi Pemerataan Beban: Berdasarkan hasil analisis data awal, beban yang terlalu tinggi pada salah satu fasa dipindahkan ke fasa lain yang lebih ringan untuk mencapai distribusi yang lebih merata. Misalnya, jika fasa R memiliki beban yang berlebih dibandingkan fasa S dan T, maka sebagian pelanggan atau beban pada fasa R dipindahkan ke fasa S atau T. Hal ini bertujuan untuk mengurangi ketidakseimbangan dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi listrik. Pelaksanaan Pemerataan Beban: Pemerataan beban dilakukan oleh teknisi PLN yang bertugas. Proses ini mencakup dokumentasi yang rinci, termasuk waktu pelaksanaan, nama teknisi, dan peralatan yang digunakan untuk memastikan prosedur dilakukan dengan tepat. Dokumentasi ini penting untuk memastikan proses penyeimbangan sesuai dengan standar operasional dan hasilnya dapat dipantau atau dianalisis di masa mendatang.

Proses ini bertujuan untuk memastikan beban pada setiap fasa dalam sistem distribusi listrik menjadi lebih merata, sehingga arus netral yang muncul dapat diminimalkan. Dengan demikian, rugi daya yang terjadi akibat ketidakseimbangan dapat dikurangi, yang berkontribusi pada efisiensi operasional dan keandalan sistem distribusi listrik.

6. Pengukuran Data Ulang

Setelah proses pemerataan beban selesai, dilakukan pengukuran ulang untuk mendapatkan data terbaru mengenai kondisi arus listrik pada setiap fasa (R, S, T), arus netral (N), dan tegangan sistem distribusi. Pengukuran ini dilakukan menggunakan Aplikasi Monitoring Gardu (AMG) untuk memastikan data yang akurat. Pengukuran arus pada fasa R, S, dan T bertujuan untuk memastikan distribusi beban menjadi lebih merata, sementara pengukuran arus netral dilakukan untuk mengetahui apakah arus netral yang mencerminkan tingkat ketidakseimbangan beban telah menurun secara signifikan setelah pemerataan. Selain itu, pengukuran tegangan dilakukan untuk memverifikasi stabilitas sistem distribusi, mengingat ketidakseimbangan beban sering kali menyebabkan fluktuasi tegangan yang dapat merugikan pelanggan dan peralatan. Data yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan perhitungan tingkat ketidakseimbangan untuk dibandingkan dengan data sebelum pemerataan. Jika hasilnya menunjukkan penurunan ketidakseimbangan yang signifikan, maka pemerataan dianggap berhasil. Pengukuran ulang ini bertujuan untuk memverifikasi keberhasilan



pemerataan, mengurangi rugi daya dengan menurunkan arus netral, memastikan stabilitas sistem distribusi, serta mendukung dokumentasi dan laporan teknis. Data ini menjadi dasar untuk evaluasi keberhasilan pemerataan dan rekomendasi langkah perbaikan lebih lanjut guna meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi energi listrik.

7. Analisis dan Validasi data

Proses analisis dan validasi data dilakukan untuk memastikan keakuratan hasil serta mengevaluasi dampak pemerataan beban terhadap efisiensi distribusi energi listrik. Analisis dimulai dengan membandingkan data pengukuran sebelum dan sesudah pemerataan beban, termasuk arus pada masing-masing fasa (R, S, T), arus netral (N), tingkat ketidakseimbangan, serta rugi daya. Perbandingan ini digunakan untuk menghitung perubahan tingkat ketidakseimbangan beban, yang mencerminkan keberhasilan pemerataan dalam mendistribusikan beban secara lebih merata. Selain itu, analisis juga menghitung pengurangan rugi daya dengan membandingkan arus netral sebelum dan sesudah pemerataan. Validasi data dilakukan dengan mencocokkan hasil pengukuran digital dari Aplikasi Monitoring Gardu (AMG) dengan laporan teknis yang dihasilkan secara manual di lapangan. Data dari AMG menyediakan pengukuran digital yang akurat, seperti arus tiap fasa, arus netral, dan tegangan sistem, sedangkan laporan teknis mencakup hasil pengukuran manual, waktu pelaksanaan, nama teknis, dan alat yang digunakan. Validasi ini memastikan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara data digital dan manual, sehingga keandalan data dapat dipastikan. Proses validasi juga mencakup pengecekan ulang terhadap anomali data untuk menjamin konsistensi hasil. Langkah ini tidak hanya memastikan bahwa pemerataan beban telah mengurangi ketidakseimbangan secara signifikan, tetapi juga memverifikasi pengurangan rugi daya akibat menurunnya arus netral. Dengan melakukan analisis dan validasi ini, penelitian dapat memberikan laporan hasil yang akurat, terpercaya, dan dapat digunakan untuk rekomendasi lebih lanjut dalam meningkatkan efisiensi serta keandalan sistem distribusi listrik di masa mendatang.

8. Pelaporan dan Penyusunan Rekomendasi

Hasil penelitian disusun dalam bentuk laporan teknis yang mencakup tingkat pengurangan ketidakseimbangan beban, pengurangan kerugian daya (losses), rekomendasi teknis untuk pemerataan beban di gardu lain.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perhitungan Ketidakseimbangan Transformator dan Losses Arus Netral

Untuk menghitung besarnya ketidakseimbangan beban pada transformator setelah dilaksanakan pemerataan beban menggunakan persamaan (1), (2), (3), (4), (5), (6), yang data pengukuran trafo RN 004 diperoleh hasil pada tabel 4 berikut :

Tabel 4. Hasil Perhitungan Ketidakseimbangan beban					
No	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	Arus N (A)	Unbalanced Arus (%)
1	194	99	208	113	27

Dengan data dan perhitungan sebagai berikut :

$$I_r = 194 \text{ A}, I_s = 99 \text{ A}, I_t = 208 \text{ A}, I_n = 113 \text{ A}$$

Maka bisa di hitung *unbalance* sebagai berikut :

$$\frac{194+99+208}{3} = 167 \text{ A}, 194 = a \times 167 \text{ maka, } a = \frac{194}{167} = 1,16; 99 = b \times 167 \text{ maka, } b = \frac{99}{167} = 0,59;$$

$$208 = c \times 167 \text{ maka, } c = \frac{208}{167} = 1,24$$

$$I_{\text{tidak seimbang}} = \frac{(|1,16-1|+|0,59-1|+|1-1,24|)}{3} \times 100 \% = \frac{(|0,16|+|0,41|+|0,24|)}{3} \times 100 \% = \frac{(0,81)}{3} \times 100 \% = 27 \%$$

2. Perhitungan Awal Losses Arus Netral Transformator

Untuk menghitung losses yang diakibatkan adanya arus netral pada transformator RN004 sebelum dilaksanakan pemerataan beban menggunakan persamaan (7) yakni sebagai berikut :

$P_{\text{Loesses}} = 113^2 \times 0,437$, $P_{\text{Loesses}} = 12.769 \times 0,437$, $P_{\text{Loesses}} = 5.580,05 = 5,58 \text{ kW}$. Sehingga apabila dihitung selama 1 bulan dengan asumsi beban tetap selama 24 jam saat beban Puncak Malam, dan selama 30 hari maka dapat dihitung nilai sustnya dalam satu bulan adalah sebagai berikut : $= 5,58 \text{ kW} \times 24 \times 30 = 4.017,6 \text{ kWh}$. Sehingga dari hasil perhitungan tersebut, diperoleh nilai losses yang diakibatkan adanya arus tidak seimbang pada transformator RN004 adalah sebesar 5,58 kW, dan jika dihitung dalam satu bulan maka nilai susutnya adalah sebesar 4.017,6 kWh. Apabila dirupiahkan dengan tarif dasar listrik sebesar Rp. 1.467,- maka dapat dihitung besar nominal yang hilang akibat beban tidak seimbang selama 30 hari adalah Rp 5.893.819,00

3. Perhitungan Setelah Pemerataan Beban Transformator



Untuk menghitung besarnya ketidakseimbangan beban pada transformator setelah dilaksanakan pemerataan beban menggunakan persamaan (1), (2), (3), (4), (5), (6), yang data pengukuran trafo RN 004 diperoleh hasil pada tabel 5 berikut :

Tabel 5. Hasil Perhitungan Ketidakseimbangan beban

No	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	Arus N (A)	Unbalanced Arus (%)
1	158	145	152	77	3

Berikut data pengukuran trafo RN 004 sebelum pemerataan beban yang diambil dari aplikasi AMG:

$I_r = 158 \text{ A}$, $I_s = 145 \text{ A}$, $I_t = 152 \text{ A}$, $I_n = 77 \text{ A}$

Maka bisa di hitung *unbalance* sebagai berikut :

$$\frac{158+145+152}{3} = 151,67 \text{ A} , 158 = a \times 151,67 \text{ maka, } a = \frac{158}{151,67} = 1,04; 145 = b \times 151,67 \text{ maka, } b = \frac{145}{151,67} = 0,95; 152 = c \times 151,67 \text{ maka, } c = \frac{152}{151,67} = 1,002$$
$$I_{\text{tidak seimbang}} = \frac{(|1,04-1|+|0,95-1|+|1-1,002|)}{3} \times 100 \% = \frac{(|0,04|+|0,05|+|0,002|)}{3} \times 100 \% = \frac{(0,092)}{3} \times 100 \% = 3 \%$$

4. Perhitungan Losses Arus Netral Transformator Setelah Dilaksanakan Pemerataan Beban

Untuk menghitung losses yang diakibatkan adanya arus netral pada transformator RN004 sebelum dilaksanakan pemerataan beban menggunakan persamaan (6) yakni sebagai berikut :

$P_{\text{Loesses}} = 77^2 \times 0,437$, $P_{\text{Loesses}} = 5.929 \times 0,437$, $P_{\text{Loesses}} = 2.590,97 \text{ W} = 2,59 \text{ kW}$. Sehingga apabila dihitung selama 1 bulan dengan asumsi beban tetap selama 24 jam saat beban Puncak Malam, dan selama 30 hari maka dapat dihitung nilai susutnya dalam satu bulan adalah sebagai berikut : $= 2,59 \text{ kW} \times 24 \times 30 = 1.864,8 \text{ kWh}$. Sehingga dari hasil perhitungan tersebut, diperoleh nilai losses yang diakibatkan adanya arus tidak seimbang pada transformator RN004 adalah sebesar 2,59 kW, dan jika dihitung dalam satu bulan maka nilai susutnya adalah sebesar 1.864,8 kWh. Apabila dirupiahkan dengan tarif dasar listrik sebesar Rp. 1.467,- maka dapat dihitung besar nominal yang hilang akibat beban tidak seimbang selama 30 hari adalah Rp 2.735.661,00

5. Perhitungan Saving kWh

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diperoleh data hasil perhitungan ketidakseimbangan sebelum dilaksanakan pemerataan beban dan setelah dilaksanakan pemerataan beban dilihat bahwa total nilai susut selama 1 bulan yang mengalir pada arus tidak seimbang transformator sebelum dilaksanakan pemerataan beban adalah sebesar 4.017,6 kWh sedangkan setelah dilaksanakan pemerataan beban adalah sebesar 1.864,8 kWh. Maka besarnya selisih atau nilai *saving* yang diperoleh adalah : $\text{Saving} = \text{Susut Sebelum} - \text{Susut Setelah} = 4.017,6 \text{ kWh} - 1.864,8 \text{ kWh} = 2.152,8 \text{ kWh}$ / bulan, jika dirupiahkan dengan tarif dasar listrik sebesar Rp. 1.467,- maka dapat dihitung besara nominalnya sebagai berikut: $\text{Rupiah} = \text{Saving 1 Bulan} \times \text{Tarif dasar Listrik} = 2.152,8 \times 1467 = \text{Rp. 3.158.157,- per bulan}$.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pemerataan beban pada Gardu RN004 di ULP Bima Kota berhasil mengurangi tingkat ketidakseimbangan beban dan meningkatkan efisiensi distribusi energi listrik. Sebelum pemerataan, energi yang terbuang akibat ketidakseimbangan beban tercatat sebesar 4.017,6 kWh per bulan, sementara setelah pemerataan, energi yang terbuang berkurang menjadi 1.864,8 kWh per bulan. Dengan demikian, *saving kWh* yang dihasilkan adalah 2.152,8 kWh per bulan. Penghematan energi ini memberikan dampak ekonomis yang signifikan, dengan penghematan biaya sebesar Rp 3.158.157 per bulan, berdasarkan tarif dasar listrik sebesar Rp 1.467 per kWh. Pemerataan beban terbukti efektif dalam menurunkan rugi daya dan menghasilkan distribusi energi yang lebih merata, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi operasional dan stabilitas sistem distribusi listrik. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa langkah pemerataan beban dapat menjadi strategi yang bermanfaat untuk diterapkan pada gardu distribusi lain yang menghadapi permasalahan serupa.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa rekomendasi atau saran yang dapat disampaikan adalah Analisis perbaikan susut akibat ketidakseimbangan beban perlu dilakukan agar dapat diimplementasikan pada unit PLN lain yang menghadapi permasalahan serupa. Dengan memahami dampak ketidakseimbangan beban pada efisiensi sistem distribusi, solusi yang ditemukan bisa diterapkan untuk meningkatkan kinerja unit lain. Untuk meminimalisir ketidakseimbangan beban, diperlukan monitoring yang lebih ketat dalam proses pemasangan pelanggan baru. Ketika pelanggan baru ditambahkan ke dalam sistem distribusi, sering kali terjadi penumpukan beban pada salah satu fasa, yang akhirnya menyebabkan ketidakseimbangan. Untuk mencegah hal ini, monitoring secara real-time bisa dilakukan dengan menggunakan perangkat atau aplikasi seperti Aplikasi Monitoring Gardu (AMG). Dengan pemantauan yang baik, operator dapat memastikan bahwa distribusi pelanggan dilakukan secara merata sejak awal, sehingga ketidakseimbangan beban



dapat diminimalkan. Langkah ini juga mencakup pengawasan rutin terhadap beban pada setiap fasa untuk mendeteksi potensi ketidakseimbangan lebih dini, sehingga kerugian energi yang signifikan dapat dihindari.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wirawan, Aditiya Doni., Junaidi., Arsyad, M Iqbal., 2022, *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura : Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi di Penyulang Pangsuma PT. PLN (Persero) Rayon Mempawah*, Fakultas Tanjungpura.
- [2] Rohmat, Khoirur., Riyadi, Munawar., 2023, *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro: Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) UPDL Pandaan*, Vol 4.
- [3] Irsyam, Muhammad., Alagusri Missyamsu., Marpaung, Linggom Pandapotan., 2023, *Sigma Teknika*, Vol. 6, No.1 : 109-119: *Analisa Rugi-Rugi Daya (Losses Power) pada Jaringan Tegangan Rendah PT. Musimmas Batam* , Universitas Riau Kepulauan.
- [4] Novfowan, Anang Dasa., Mieftah, Mochamad., Kusuma, Wijaya., 2023, *Jurnal Sistem Kelistrikan Vol. 10 No. 1: Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Trafo Distribusi* , Politeknik Negeri Malang.
- [5] Ginting, Rizky Tambara., Zulfahri., Arlenny 2022, *Sainetin (Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri)*, Vol. 6 No. 2: *Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan Etap* , Universitas Lancang Kuning.
- [6] PT PLN (Persero). (2005). *Keputusan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 217-1.K/Dir/2005 Tentang Pedoman Penyusunan Laporan Neraca Energi (kwh) di Lingkungan PT PLN (Persero)*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- [7] Nopianto, A. S., (2021), *Perhitungan Jatuh Tegangan dan Susut Daya Serta Upaya Perbaikan Penyaluran Daya Listrik Pada PT. PLN (Persero) Rayon Sambas*, *Jurnal Teknik Elektro*, Universitas Tanjungpura.
- [8] Dri, A., (2021), *Meminimalkan Rugi-Rugi pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah Dengan Pemasangan Kapasitor*, Skripsi, Universitas Tanjungpura, Pontianak
- [9] Dri, A., 2021, *Meminimalkan Rugi-Rugi pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah Dengan Pemasangan Kapasitor*, Skripsi, Universitas Tanjungpura, Pontianak.
- [10] Hontong, J. N., Tuegeh, M., 2021, *Analisa Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Di Pt. Pln Palu*, *E-Journal Teknik Elektro Dan Komputer*, Universitas Sam Ratulangi.
- [11] Muchyi, A., 2021, *Studi Perkiraan Susut Energi dan Alternatif Perbaikan Pada Penyulang Leci Di Gardu Induk Jababeka*, Skripsi, Universitas Indonesia, Depok.
- [12] Nugroho, B. S., Putra, B. P., 2021, *Analisa Perhitungan Susut Daya Dan Energi Dengan Pendekatan Kurva Beban Di Gardu Induk Payageli Pt. Pln (Persero)*, *Jurnal Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara*.
- [13] Siti, N., 2021, *Analisa Susut Daya Dan Energi Pada Jaringan Distribusi di Gardu Induk*, Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta
- [14] Waluyo, W., Soenarjo, Akbar, A. A., 2021, *Perhitungan Susut Daya pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah Saluran Udara dan Kabel*, *Jurnal Sains Dan Teknologi Emas*, 17(3), 169-182.
- [15] Widian, A., 2021, *Evaluasi Perhitungan Susut Daya Listrik pada Jaringan Distribusi Penyulang JJR-7 Gardu Induk Jajar*, Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta
- [16] Yuntiansyah, P. A., Wibawa, U., 2021, *Studi Perkiraan Susut Teknis dan Alternatif Perbaikan pada Penyulang Kayoman Gardu Induk Sukorejo*, *Jurnal Teknik Elektro Universitas Brawijaya*
- [17] Kandeccing, R. A., Mansur, Hay, S., Jie, S., Koedoes, Y. A., Lolok, A., & Jaya, S. N. (2021). *Analisis Susut Daya dan Energi pada Jaringan Distribusi di Gardu Induk Kendari New Penyulang Brimob Menggunakan Software Etap 19.0.1 pada Waktu Beban Puncak*. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Halu Oleo*.
- [18] Maulana, D. A., & Nugroho, D. (2019). *Susut Daya Jaringan Distribusi Akibat Pengaruh Ukuran Penghantar pada Penyulang Tajung PT. PLN (Persero) Area Padang*. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Negeri Padang*.
- [19] Saputra, Y. M., & Rizkiana, A. F. (2024). *Perbaikan Jatuh Tegangan Dan Rugi Daya Dengan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah Dan Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah Pada Gardu Distribusi Mi-44-150-21 PT PLN ULP Magelang Kota*. *Jurnal Listrik, Instrumentasi, Dan Elektronika Terapan*, 5(1).
- [20] Winarta, I. K., Harun, E. H., & Giu, J. D. (2021). *Studi Susut Daya Jaringan Distribusi Primer Area Luwuk Melalui Simulasi Aliran Daya Menggunakan Metode Newton Raphson*. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 23(4), 125-133.