

ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PASANGAN LUAR 20/0,4 KV

REDO FAJRI¹, DEWANTO INDRA K²

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila^{1,2}

Email: redofjr4623005@univpancasila.ac.id¹, dewanto.indra@univpancasila.ac.id²

Abstract: *This study analyzes load imbalance in outdoor 20/0.4 kV distribution substations, a crucial issue in the electrical power infrastructure that can reduce system efficiency and affect the asset's health index according to PT PLN (Persero) standards. Unlike previous studies, this research comprehensively calculates the percentage of load imbalance based on field inspection data, classifies it into the substation's health index, and validates the theoretical neutral current calculations with ETAP software simulations. The main objectives of this study are to determine the percentage of load imbalance and the health index grouping after load balancing, and to measure the error value between theoretical calculations and ETAP simulations for the neutral phase current. The results show that the load balancing strategy is effective in reducing the percentage of imbalance in substations that previously had a "Poor" health index to "Fair" or "Good." Furthermore, the comparison between theoretical calculations and ETAP simulations for the neutral current shows a very small error value (0.49% - 2.09%), confirming the accuracy of the mathematical model and the reliability of ETAP as a precise analysis tool. These findings make a significant contribution to asset management and the optimization of operational efficiency in PLN's distribution system.*

Keywords: *Neutral Current, Load Imbalance, ETAP, Health Index*

Abstrak: Penelitian ini menganalisis ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV, sebuah isu krusial dalam infrastruktur ketenagalistrikan yang dapat menurunkan efisiensi sistem dan mempengaruhi health index aset sesuai standar PT PLN (Persero). Berbeda dengan studi terdahulu, penelitian ini secara komprehensif menghitung persentase ketidakseimbangan beban berdasarkan data inspeksi lapangan, mengklasifikasikannya ke dalam health index gardu, serta memvalidasi hasil perhitungan arus netral secara teoritis dengan simulasi perangkat lunak ETAP. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya persentase ketidakseimbangan beban dan pengelompokan health index pasca-pecah beban, serta mengukur nilai error antara perhitungan teoritis dan simulasi ETAP pada arus fasa netral.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi pecah beban efektif menurunkan persentase ketidakseimbangan pada gardu yang sebelumnya ber-health index "Buruk" menjadi "Cukup" atau "Baik". Lebih lanjut, perbandingan antara perhitungan teoritis dan simulasi ETAP untuk arus netral menunjukkan nilai error yang sangat kecil (0,49% - 2,09%), mengonfirmasi akurasi model matematis dan keandalan ETAP sebagai alat analisis presisi. Temuan ini memberikan kontribusi signifikan dalam manajemen aset dan optimalisasi efisiensi operasional sistem distribusi PLN.

Kata Kunci : Arus Netral, Ketidakseimbangan Beban, ETAP, Health Index

A. Pendahuluan

Dalam meningkatkan infrastruktur ketenagalistrikan di Indonesia, Perusahaan Listrik Negara (PLN) terus berkomitmen untuk memperluas, membangun dan memperbaiki sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pembangunan gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV. Pembangunan yang dilakukan tentu mempertimbangkan kebutuhan beban pelanggan di wilayah tersebut. Dengan perhitungan yang tepat, ketidakseimbangan beban merupakan hal yang harus dihindari. Sesuai dengan Edaran Direksi PT PLN (Persero) Nomor

0017/E/DIR/2014 bahwa persentase ketidakseimbangan beban arus antar fasa yang memperoleh nilai >25% dinyatakan memiliki *health index* buruk dan <10% memiliki *health index* baik [1].

Undang-Undang No. 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan, setiap instalasi yang beroperasi diharuskan memiliki sertifikat laik operasi (SLO) [2], penting untuk melakukan evaluasi yang mendalam terhadap kelayakan suatu instalasi untuk memperoleh sertifikat laik operasi (SLO) yang menjadi bukti nyata bahwa instalasi tersebut telah memenuhi semua persyaratan teknis dan keselamatan yang ditetapkan. Kondisi saat ini proses inspeksi sertifikat laik operasi (SLO) dan ketidakseimbangan beban tidak terjadi di waktu yang sama, artinya kondisi ini terpisah dikarenakan proses inspeksi sertifikat laik operasi umumnya dilakukan sebelum dilakukannya pembebanan 1 x 24 jam atau saat instalasi sudah beroperasi, namun ketidakseimbangan beban sering terjadi pada 1-2 tahun setelah beroperasi. Proses ketidakseimbangan beban ini menjadi penilaian untuk masing-masing unit dalam proses inspeksi dari unit setempat.

Ketidakeimbangan beban terjadi ketika besar beban pada masing-masing fasa tidak sama, hal ini menyebabkan aliran arus pada penghantar netral yang seharusnya nol dalam kondisi seimbang tetapi menyebabkan arus netral yang mengalir sehingga menurunkan efisiensi sistem dan pemanasan berlebih pada penghantar.

Beberapa penelitian relevan telah mengkaji isu ketidakseimbangan beban dan analisis sistem kelistrikan. Muh. Hanif Idris dan Ahmad Rizal Sultan [3], dalam jurnal *Elposys*, melalui penelitiannya yang berjudul "Optimasi Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi Terhadap Penurunan Rugi Energi dengan Metode Seimbang Beban Sehari". Penelitian ini berfokus pada pendekatan penyeimbangan beban untuk menurunkan rugi-rugi daya. Kelebihan penelitian ini adalah keberhasilannya dalam menerapkan metode Seimbang Beban Sehari (SBS) untuk optimasi distribusi beban secara manual, memberikan solusi praktis untuk meminimalkan *losses* akibat ketidakseimbangan. Namun, perbedaan dengan penelitian yang saat ini dilakukan ialah membahas aspek validasi hasil pengukuran teori dengan simulasi perangkat lunak ETAP dan pengklasifikasian kondisi kesehatan aset (*health index*) berdasarkan tingkat ketidakseimbangan beban.

Selanjutnya, Rizky Tambara, Zulfahri, dan Arleny [4] dalam *Jurnal Sain, Teknologi & Industri*, melalui penelitian "Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP". Penelitian ini menggunakan metode simulasi berbasis perangkat lunak ETAP untuk menganalisis besarnya arus netral dan rugi-rugi daya yang ditimbulkan oleh ketidakseimbangan beban. Kelebihan penelitian ini terletak pada pemanfaatan simulasi ETAP untuk memodelkan sistem distribusi dan menganalisis efek *unbalance load* terhadap arus netral serta efisiensi sistem, memberikan wawasan tentang hubungan antara ketidakseimbangan beban, arus netral yang tinggi dan peningkatan *losses*. Meskipun demikian, perbedaan penelitian yang saat ini dilakukan ialah mengelompokkan kondisi gardu berdasarkan standar *health index* yang berlaku.

Kemudian, Bayu Dharma Setiawan, Humaira Salsabila Rusydi Pili, dan Abdullah [5] yang mempresentasikan penelitian mereka dalam Konferensi Nasional Social dan Engineering Politeknik Negeri Medan, dengan judul "Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Trafo Distribusi MH 196 Menggunakan ETAP 19 di ULP Medan Helvetia". Penelitian ini menerapkan studi kasus dengan mengumpulkan data pengukuran arus beban nyata dan memodelkannya dalam perangkat lunak ETAP untuk mengevaluasi arus netral serta menghitung *losses*. Kelebihan dari penelitian ini adalah penggunaan ETAP untuk analisis *losses* serta arus netral dan menekankan pentingnya simulasi untuk efisiensi operasi. Akan tetapi, perbedaan penelitian yang saat ini dilakukan adalah analisis 7 gardu distribusi di suatu wilayah yang lebih luas dan menyertakan klasifikasi *health index* sebagai parameter ukur kondisi aset untuk setelahnya dilakukan kondisi pecah beban.

Berdasarkan tinjauan komprehensif terhadap penelitian-penelitian terdahulu, penelitian ini hadir untuk memberikan kontribusi yang lebih komprehensif dalam analisis ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV di wilayah UP3 Banjarmasin. Penelitian ini secara spesifik menghitung persentase ketidakseimbangan beban berdasarkan data inspeksi lapangan dan mengklasifikasikannya ke dalam *health index* gardu sesuai surat edaran direksi PT PLN (Persero) Nomor 0017/E/DIR/2014. Selain itu, penelitian ini secara eksplisit membandingkan hasil perhitungan arus netral secara teoritis dengan hasil simulasi menggunakan *software* ETAP untuk setiap gardu yang diamati. Perbandingan ini akan membahas seberapa kecil nilai eror yang didapatkan, sehingga dapat memvalidasi akurasi model teoritis dan keandalan ETAP sebagai alat analisis presisi dalam kondisi ketidakseimbangan beban. Dengan melibatkan 7 gardu distribusi di wilayah UP3 Banjarmasin, penelitian ini diharapkan mampu memberikan data dan analisis yang lebih representatif mengenai kondisi ketidakseimbangan beban di area tersebut, yang dapat menjadi dasar rekomendasi strategis yang lebih relevan bagi pihak PT PLN (Persero).

Penelitian pada skripsi ini berbeda dengan laporan observasi atau kerja praktik yang berfokus pada identifikasi masalah dan pengumpulan data dasar, penelitian ini menyajikan analisis yang mendalam dan terstruktur. Hal ini ditunjukkan melalui perhitungan persentase ketidakseimbangan beban yang detail, klasifikasi kondisi aset berdasarkan *health index* PLN, serta validasi model perhitungan teoritis dengan simulasi perangkat lunak ETAP. Pendekatan ini tidak hanya mengidentifikasi masalah, tetapi juga memverifikasi akurasi metodologi analisis, sehingga menghasilkan temuan yang lebih kuat dan relevan untuk pengambilan keputusan strategis dalam manajemen sistem distribusi.

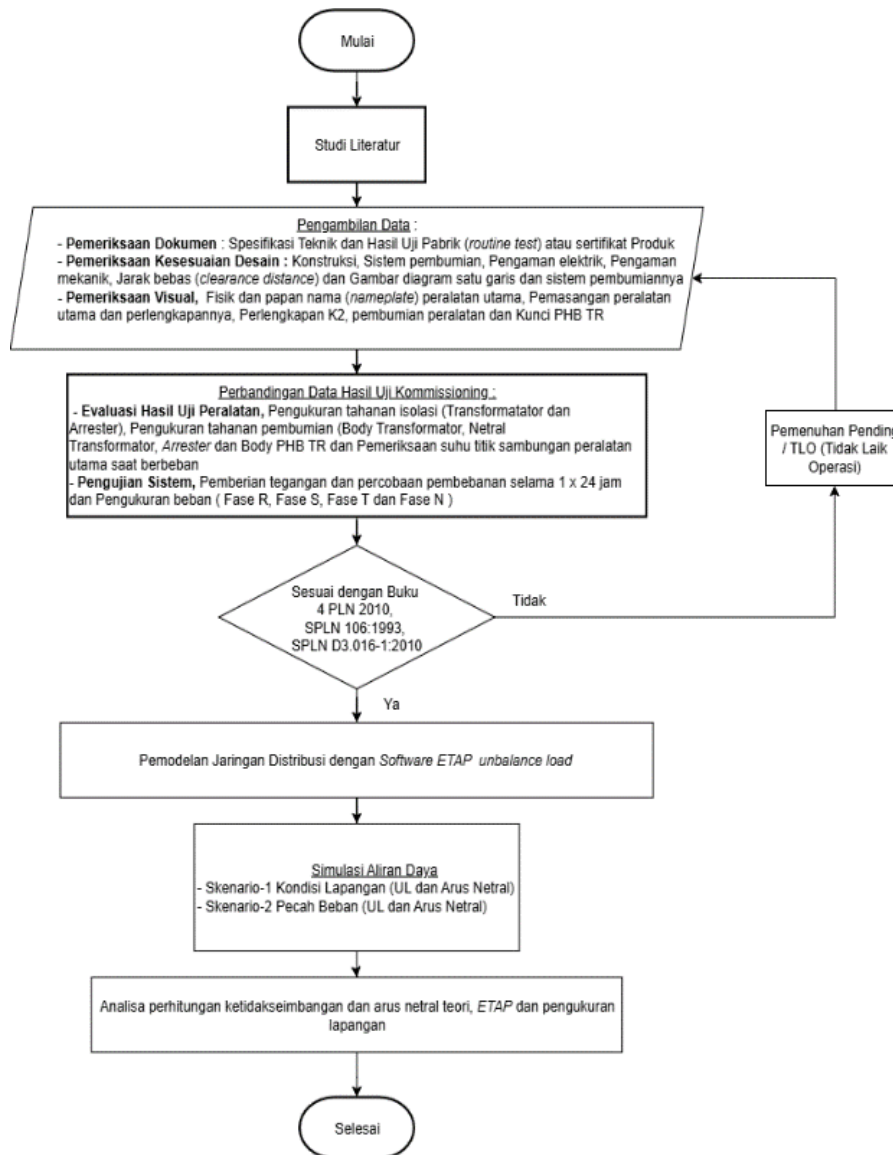
Dengan demikian, penelitian ini diharapkan tidak hanya mengonfirmasi masalah ketidakseimbangan beban dan dampaknya, tetapi juga menyediakan metodologi validasi yang kuat antara teori dan simulasi, serta memberikan informasi *health index* yang berguna untuk manajemen aset di lapangan dan kegiatan perbaikan penyeimbangan beban melalui kondisi pecah beban.[6]

B. Metodologi Penelitian

Pendekatan dan Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan studi kasus yang menganalisis ketidakseimbangan beban gardu distribusi pasangan luar (GDPL) 20/0,4 kV. Metode penelitian yang diterapkan menggunakan data primer sebagai pengukuran lapangan serta data sekunder sebagai spesifikasi peralatan dan hasil uji sebelumnya. Rancangan penelitian dirancang untuk menganalisis persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi 20/0,4 kV berdasarkan pengelompokan *health index* dan mengevaluasi nilai eror arus netral melalui perbandingan perhitungan teoritis dan simulasi menggunakan *software* ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*).

Pendekatan penelitian ini mengikuti diagram alir yang sistematis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dimulai dari membuat rancangan sistem, melakukan tinjauan pustaka, pengumpulan data dan spesifikasi peralatan, menentukan metode analisis data, melakukan perhitungan teori dan penginputan data lapangan pada simulasi *unbalance load* jaringan distribusi gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV dengan *software* ETAP, serta melakukan evaluasi hasil penelitian yaitu nilai persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi dan perhitungan nilai eror arus netral melalui perhitungan teori dan simulasi *software* ETAP serta penyeimbangan beban melalui kondisi pecah beban.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Ruang Lingkup dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan kegiatan inspeksi sertifikat laik operasi (SLO) PT PLN Pusat Sertifikasi yang beralamat di Jl. Laboratorium No.1, RT.7/RW.1, Duren Tiga, Kecamatan Pancoran, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12760. Waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada kondisi luar waktu beban puncak 09.00-11.00 WITA dengan beban perumahan 900 VA di Provinsi Kalimantan Selatan. Objek penelitian yang dikaji meliputi gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV dengan fokus pada analisis ketidakseimbangan beban dan perhitungan arus netral. Ruang lingkup penelitian mencakup pembuatan rancangan sistem, tinjauan pustaka, pengumpulan data dan spesifikasi peralatan, penentuan metode analisis data, perhitungan teori dan penginputan data lapangan pada simulasi *unbalance load*, serta evaluasi hasil penelitian berupa nilai persentase ketidakseimbangan beban dan perhitungan nilai eror arus netral.

Bahan dan Alat Utama

Bahan utama penelitian terdiri dari data primer berupa hasil pengukuran lapangan dan data sekunder berupa spesifikasi peralatan gardu distribusi. Data primer meliputi hasil inspeksi sertifikat laik operasi (SLO), pengukuran beban (Fasa R, Fasa S, Fasa T dan Fasa N), pemberian tegangan dan percobaan pembebanan selama 1 x 24 jam. Data sekunder mencakup spesifikasi teknik peralatan utama seperti transformator distribusi, FCO (*Fuse Cut Out*), *arrester*, dan PHB TR (*Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah*). Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *software* ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) untuk simulasi dan analisis sistem tenaga listrik, terutama dalam kondisi operasi tidak seimbang (*unbalance load*). Peralatan pengukuran lapangan yang digunakan meliputi alat ukur tahanan isolasi, alat ukur tahanan pembumian, dan termometer *infrared* untuk pemeriksaan suhu titik sambungan peralatan utama saat berbeban.

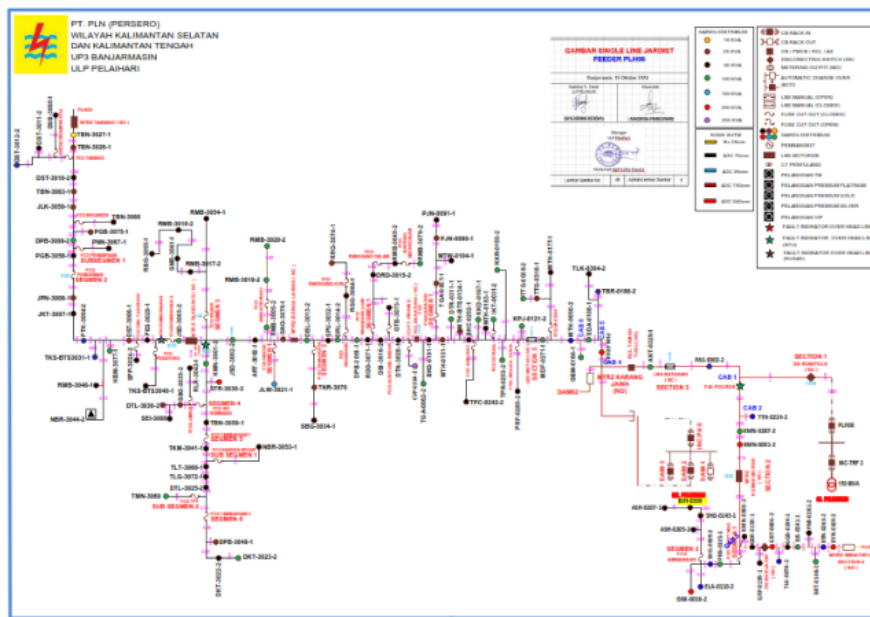
Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui lima tahapan sistematis berdasarkan hasil inspeksi sertifikat laik operasi (SLO) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 diagram alir penelitian. Tahap pertama adalah pengumpulan spesifikasi teknik dan hasil uji pabrik (*routine test*) atau sertifikat produk yang meliputi spesifikasi teknik transformator distribusi (pabrik/merek, tegangan primer, tegangan sekunder, arus primer, arus sekunder, daya, jumlah fase, impedansi, BIL (*Basic Insulation Level*), kelompok vektor, nomor seri, dan tahun pembuatan), spesifikasi teknik FCO, *arrester*, dan PHB TR.

Tabel 1. Papan Nama Peralatan Utama GDPL 20/0,4 kV

No	Peralatan Utama	Keterangan
1.	Transformator Distribusi	Nameplate transformator 50 kVA, 20/0,4 kV
2.	Tiang	Tiang beton/besi dengan spesifikasi beban
3.	FCO (<i>Fuse Cut Out</i>)	Sekring pengaman tegangan menengah
4.	<i>Arrester</i>	Penangkal petir tegangan menengah
5.	PHB TR	Panel hubung bagi tegangan rendah

Tahap kedua adalah pemeriksaan kesesuaian desain untuk memastikan semua peralatan utama telah sesuai dengan standar, meliputi konstruksi, sistem pembumian, pengaman elektrik, pengaman mekanik, jarak bebas, dan gambar diagram satu garis (*single line diagram*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Single Line Diagram Gardu BJK-0339 – PLH/6 (Diagram menunjukkan konfigurasi jaringan distribusi gardu dengan transformator 50 kVA, 20/0,4 kV dan sistem distribusi 2 jurusan)

Tahap ketiga melakukan pemeriksaan visual untuk memastikan semua peralatan utama sesuai dengan standar pemeriksaan kesesuaian desain, mencakup fisik dan papan nama (*nameplate*) peralatan utama, pemasangan peralatan utama dan perlengkapannya, perlengkapan K2, pembumian peralatan dan kunci PHB TR.

Tabel 2. Perlengkapan K2K3 Gardu Distribusi

No	Keterangan	Spesifikasi
1.	Tanda bahaya gardu	Papan peringatan bahaya listrik
2.	Penghalang panjat	Pelindung anti panjat pada tiang
3.	Pembumian	Sistem pembumian netral trafo, <i>body</i> PHB TR, <i>body</i> trafo dan <i>arrester</i>

Tahap keempat adalah evaluasi hasil uji peralatan yang meliputi pengukuran tahanan isolasi transformator (*primer-ground*, *sekunder-ground*, *primer-sekunder*), pengukuran tahanan isolasi *arrester* (R atas – R bawah, S atas – S bawah, T atas – T bawah), pengukuran tahanan pembumian (*netral trafo*, *body* PHB TR, *body* trafo dan *arrester*), dan pemeriksaan suhu titik sambungan peralatan utama saat berbeban. Tahap kelima adalah pengujian sistem yang mencakup pemberian tegangan dan percobaan pembebanan selama 1 x 24 jam serta pengukuran beban pada masing-masing fasa.

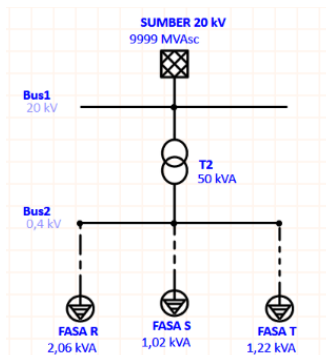
Definisi Operasional Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan meliputi variabel independen berupa beban pada masing-masing fasa (Fasa R, Fasa S, Fasa T) dan variabel dependen berupa arus netral dan persentase ketidakseimbangan beban. Arus netral didefinisikan sebagai arus yang mengalir pada konduktor netral akibat adanya ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa. Persentase ketidakseimbangan beban didefinisikan sebagai ukuran ketidakseimbangan distribusi beban pada ketiga fasa yang dinyatakan dalam persentase. Data asumsi yang

digunakan dalam penelitian ini meliputi faktor daya pelanggan yang diasumsikan 0,85 untuk seluruh pelanggan gardu perumahan pada kondisi beban rata-rata, karakteristik beban listrik di instalasi pelanggan didominasi pada area perumahan dengan 80% beban dengan daya konstan (*constant power loads*) dan 20% beban dengan impedansi konstan (*constant impedance loads*), serta simulasi pemodelan gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV diasumsikan mengabaikan faktor harmonisa karena data sumber harmonisa di jaringan tidak tersedia.

Pemodelan dan Simulasi Sistem

Pemodelan jaringan distribusi GDPL 20/0,4 kV dilakukan menggunakan *software* ETAP dengan komponen model yang mencakup *grid* 20 kV sebagai sumber pasokan daya listrik, transformator distribusi sebagai objek utama penelitian untuk menurunkan tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 0,4 kV, kabel *single-core* TR yang menghubungkan antara sisi tegangan menengah transformator ke PHB TR, PHB TR yang terdiri dari peralatan pemutus (*Load Breaking Switch/LBS*), busbars dan peralatan proteksi berupa *NH-Fuse*, serta beban/pelanggan perumahan 900 VA. Pemodelan pada simulasi ETAP dilakukan dengan model beban tidak seimbang (*unbalance load*) untuk mendapatkan nilai arus netral yang mengalir pada masing-masing gardu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Model ini dirancang khusus untuk menganalisis kondisi ketidakseimbangan beban gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV.



Gambar 3. Pemodelan *Unbalance Load* pada *Software* ETAP (*Model simulasi menunjukkan konfigurasi gardu distribusi dengan beban tidak seimbang pada ketiga fasa R, S, dan T*)

Tabel 3. Data Konfigurasi *Power Grid Editor* Simulasi ETAP

No	Data	Keterangan
1.	Info → ID	Sumber 20 kV
2.	Info → Bus	Bus 1
3.	Connection	3 Phase
4.	Condition → Service	In
5.	Configuration → Operating Mode	Swing
6.	Rating → Rated kV	20
7.	Rating → Rated kV Status	Balance

Tabel 4. Data Konfigurasi *Winding Transformer Editor* Simulasi ETAP

No	Data	Keterangan
1.	Info → ID	T2
2.	Info → Prim	Bus 1
3.	Info → Sec	Bus 5
4.	Standard	IEC

5.	Rating → Voltage Rating → Prim.	20 kV
6.	Rating → Voltage Rating → Sec.	0,4 kV
7.	Rating → Power Rating → kVA	50
8.	Type / Class → Type	Liquid Fill
9.	Grounding → Secondary	Solid – TN-C

Konfigurasi data yang dimasukkan ke dalam *software* ETAP meliputi *Power Grid Editor* sebagai sumber tegangan 20 kV, *Winding Transformer Editor* dengan spesifikasi transformator distribusi 50 kVA, konfigurasi kabel dengan berbagai jenis sesuai aplikasi lapangan, *NH Fuse* sebagai pengaman arus lebih, dan konfigurasi beban *lumped load* dengan karakteristik beban perumahan.

Tabel 5. Data Konfigurasi Beban (*Lumped Load*) Simulasi ETAP

No	Data	Keterangan
1.	Info → ID	R/S/T/Pelanggan
2.	Info → Bus	Tiang
3.	Connection → 1 or 3 Phase	1 Phase / Fasa
4.	Nameplate → Model type	Conventional
5.	Nameplate → Rated kV	0,231
6.	Nameplate → Ratings → kVA	Load Amp
7.	Load Type	80% Constants

Teknik Analisis Data

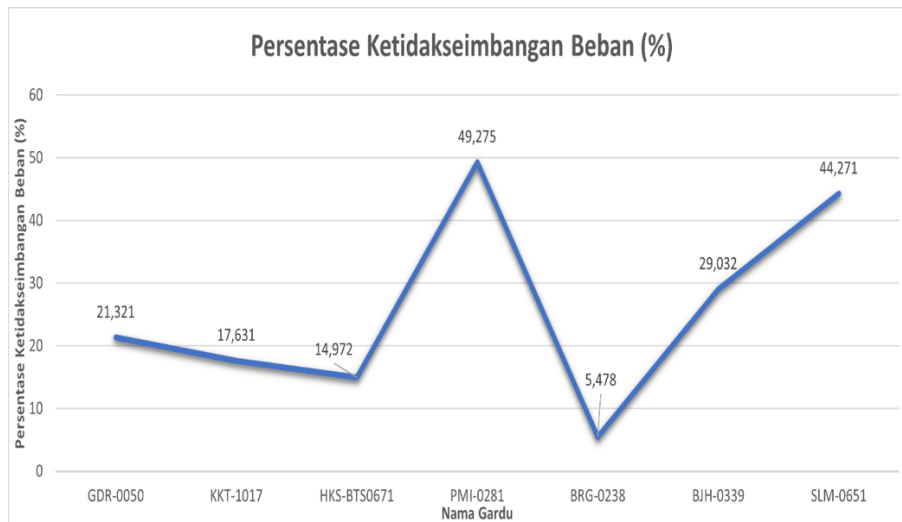
Teknik analisis data yang digunakan adalah analisis perbandingan antara hasil simulasi *software* ETAP dengan perhitungan teoritis menggunakan persamaan matematika yang telah ditetapkan. Analisis dilakukan melalui perhitungan persentase ketidakseimbangan beban menggunakan parameter *health index* dan kondisi pecah beban. Selain itu, dilakukan juga analisis perbandingan nilai arus netral berdasarkan simulasi *software* ETAP dengan perhitungan teoritis untuk mengevaluasi akurasi model simulasi yang telah dibuat. Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk laporan yang terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama menyajikan kondisi ketidakseimbangan beban dalam perhitungan persentase ketidakseimbangan beban menggunakan parameter *health index* dan kondisi pecah beban. Bagian kedua menyajikan kondisi ketidakseimbangan beban dengan perbandingan nilai arus netral berdasarkan simulasi *software* ETAP dan perhitungan teoritis. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan tingkat akurasi antara kedua metode perhitungan untuk memastikan reliabilitas model simulasi yang telah dikembangkan.

C.Pembahasan dan Analisa

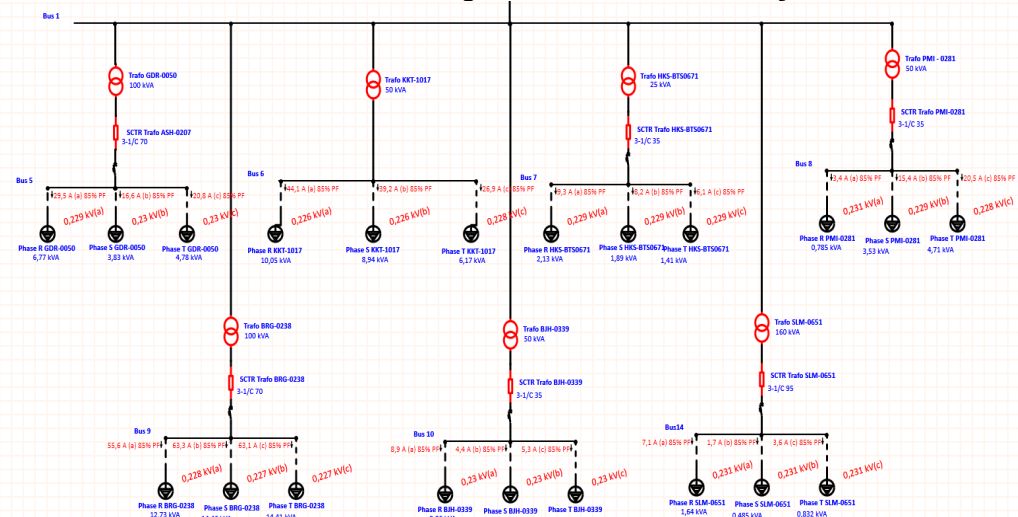
Skenario Simulasi dan Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Kondisi Lapangan (Skenario-1)

Berdasarkan Edaran Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0017/E/DIR/2014, gardu distribusi dengan persentase ketidakseimbangan beban arus antar fasa yang memperoleh nilai >25% dinyatakan memiliki *health index* buruk [8]. Kriteria penilaian *health index* berdasarkan persentase ketidakseimbangan beban disajikan pada Tabel 6.



Gambar 4. Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu UP3 Banjarmasin Skenario-1



Gambar 5. Hasil Simulasi ETAP Kondisi Lapangan

Tabel 6. Nilai *Health Index* Ketidakseimbangan Beban

Persentase Ketidakseimbangan Beban (%)	Health Index	Score
$\% < 10$	Baik	3
$10 \leq \% < 20$	Cukup	2
$20 \leq \% < 25$	Kurang	1
$\% \geq 25$	Buruk	0

Pengukuran beban dilakukan pada tujuh gardu distribusi pemasangan luar 20/0,4 kV di wilayah UP3 Banjarmasin. Data hasil pengukuran beban disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Hasil Pengukuran Beban Skenario-1

No	Nama Gardu	Merk Trafo	Kapasitas Trafo (kVA)	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	Arus N (A)
1	GDR-0050	SINTRA	100	29,3	16,6	20,7	13,2
2	KKT-1017	UNINDO	50	43,5	38,7	26,7	16,9
3	HKS-BTS0671	VOLTRA	25	9,2	8,3	6,1	3,6

4	PMI-0281	SINTRA	50	3,4	15,3	20,4	15,4
5	BRG-0238	MAXIMA	100	55,1	62,6	62,4	10,9
6	BJH-0339	WELTRAF	50	8,9	4,4	5,3	4,6
7	SLM-0651	TRAFINDO	160	7,1	2,1	3,6	5,8

Perhitungan persentase ketidakseimbangan beban menggunakan metode yang telah distandarisasi, dengan langkah-langkah sebagai berikut. Sebagai contoh perhitungan pada gardu HKS-BTS0671:

Menghitung arus rata-rata:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{9.2 + 8.3 + 6.1}{3} = 7.87$$

Menghitung koefisien a, b, dan c:

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{9.2}{7.87} = 1.17$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{8.3}{7.87} = 1.06$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{6.1}{7.87} = 0.78$$

Menghitung persentase ketidakseimbangan beban:

$$UL(\%) = \frac{|a - b| + |b - 1| + |c - 1|}{3} \times 100\% = 14.97\%$$

Hasil perhitungan ketidakseimbangan beban untuk seluruh gardu disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Hasil Pengukuran Ketidakseimbangan Beban Skenario-1

No	Nama Gardu	Merk Trafo	Kapasitas Trafo (kVA)	UL (%)
1	GDR-0050	SINTRA	100	21,321
2	KKT-1017	UNINDO	50	17,631
3	HKS-BTS0671	VOLTRA	25	14,972
4	PMI-0281	SINTRA	50	49,275
5	BRG-0238	MAXIMA	100	5,478
6	BJH-0339	WELTRAF	50	29,032
7	SLM-0651	TRAFINDO	160	44,271

Dari hasil analisis kondisi lapangan, gardu PMI-0281 menunjukkan ketidakseimbangan beban tertinggi dengan nilai 49,275%, yang melebihi ambang batas 25%. Simulasi menggunakan software ETAP menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban ini menyebabkan arus yang mengalir antar fasa tidak sama, sehingga menghasilkan arus netral yang tinggi pada gardu distribusi pasangan luar.

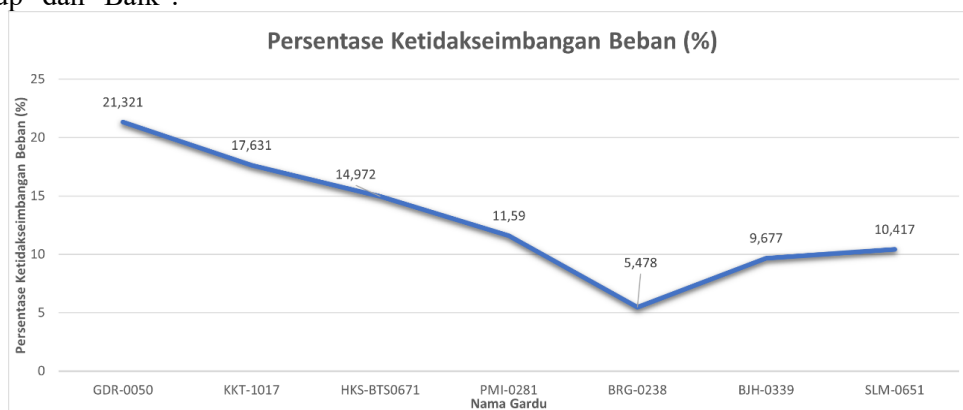
Kondisi Pecah Beban (Skenario-2)

Berdasarkan hasil skenario-1, terdapat 3 dari 7 gardu distribusi yang memiliki persentase ketidakseimbangan beban >25% dengan *health index* buruk. Untuk mengatasi kondisi ini, dilakukan skenario-2 dengan metode pecah beban pada gardu PMI-0281, BJH-0339, dan SLM-0651. Metode pecah beban dilakukan dengan mendistribusikan beban dari fasa tertinggi ke fasa terendah. Sebagai contoh pada gardu PMI-0281: arus tertinggi 20,4 A (fasa T) didistribusikan sebagian ke fasa R (3,4 A) dengan selisih 7,37 A, sehingga diperoleh distribusi beban baru: fasa R = 10,77 A, fasa S = 15,3 A, dan fasa T = 13,03 A.

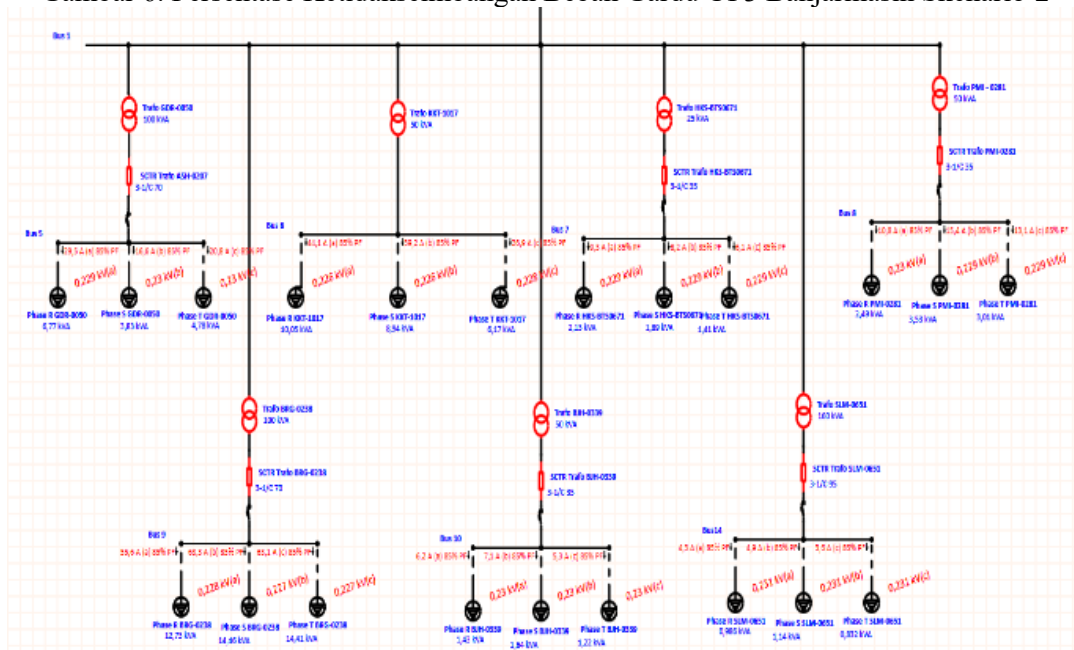
Tabel 9. Data Hasil Pecah Beban Ketidakseimbangan Beban Skenario-2

No	Nama Gardu	Merk Trafo	Kapasitas Trafo (kVA)	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	UL%
1	GDR-0050	SINTRA	100	29,3	16,6	20,7	21,321
2	KKT-1017	UNINDO	50	43,5	38,7	26,7	17,631
3	HKS-BTS0671	VOLTRA	25	9,2	8,3	6,1	14,972
4	PMI-0281	SINTRA	50	10,77	15,3	13,03	11,59
5	BRG-0238	MAXIMA	100	55,1	62,6	62,4	5,478
6	BJH-0339	WELTRAF	50	6,2	7,1	5,3	9,677
7	SLM-0651	TRAFINDO	160	4,27	4,93	3,6	10,417

Hasil pecah beban menunjukkan perbaikan signifikan dimana seluruh gardu memiliki persentase ketidakseimbangan beban di bawah 25%. Gardu PMI-0281, BJH-0339, dan SLM-0651 yang sebelumnya memiliki *health index* "Buruk" kini menunjukkan peningkatan menjadi "Cukup" dan "Baik".



Gambar 6. Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu UP3 Banjarmasin Skenario-2



Gambar 7. Hasil Simulasi ETAP Kondisi Pecah Beban

Normalisasi dan Pembobotan Hasil Skenario

Untuk menentukan model pecah beban yang optimal, dilakukan normalisasi data menggunakan persamaan standar normalisasi. Sebagai contoh perhitungan normalisasi pada gardu BJH-0339 skenario-1:

$$\text{Normalisasi Data} = \frac{\text{Nilai Maksimum} - \text{Nilai Aktual}}{\text{Nilai Maksimum} - \text{Nilai Aktual}}$$

$$\frac{49.275\% - 29.032\%}{49.275\% - 0\%} = 0.410$$

Tabel 10. Normalisasi Nilai Persentase Ketidakseimbangan Beban

No	Nama Gardu	Persentase Ketidakseimbangan Beban (%)		Normalized Ketidakseimbangan Beban	
		Skenario-1	Skenario-2	Skenario-1	Skenario-2
1	GDR-0050	21,321	21,321	0,567	0,567
2	KKT-1017	17,631	17,631	0,642	0,642
3	HKS-BTS0671	14,972	14,972	0,696	0,696
4	PMI-0281	49,275	11,59	0	0,764
5	BRG-0238	5,478	5,478	0,888	0,888
6	BJH-0339	29,032	9,677	0,410	0,803
7	SLM-0651	44,271	10,417	0,101	0,788
Normalized Ketidakseimbangan Beban (Averaged)				0,472	0,735

Tabel 11. Hasil Pembobotan Kriteria Optimasi Pekerjaan Pecah Beban

No	Parameter	Bobot (%)	Skenario-1	Skenario-2
1	Ketidakseimbangan Beban	50	0,472	0,735
2	Scoring Matrix	50	0,380	0,714
Nilai Optimasi Akhir Setiap Model Pecah Beban (Normalized)		100	0,426	0,724

Pembobotan kriteria optimasi menggunakan dua parameter dengan bobot masing-masing 50%: ketidakseimbangan beban dan *scoring matrix*. Hasil pembobotan menunjukkan nilai optimasi akhir skenario-2 (0,724) lebih tinggi dibandingkan skenario-1 (0,426), membuktikan efektivitas metode pecah beban [11].

Perhitungan dan Validasi Arus Netral

Perhitungan Teoritis Arus Netral

Perhitungan arus netral menggunakan persamaan vektor untuk sistem tiga fasa:

$$I_N = I_R + I_S (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) + I_T (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ)$$

Sebagai contoh perhitungan pada gardu HKS-BTS0671:

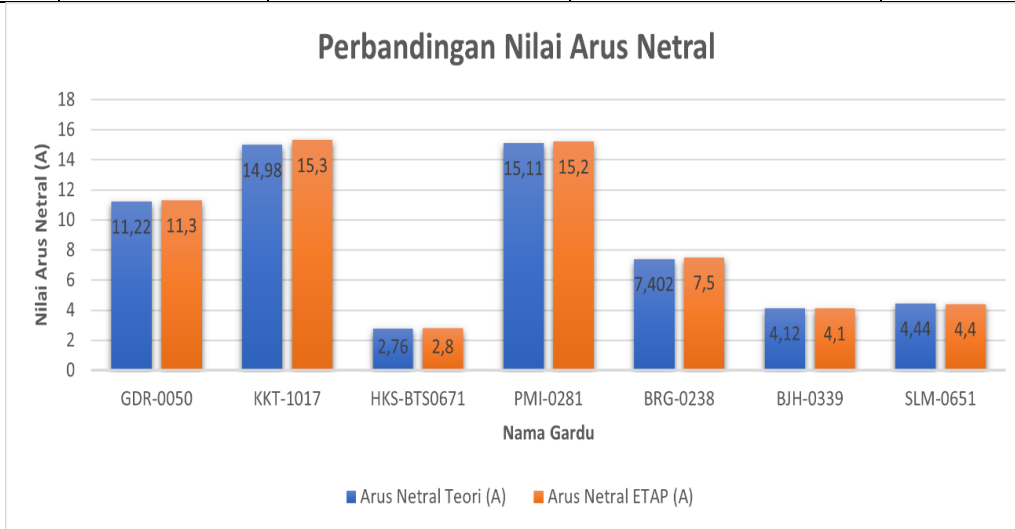
$$I_N = 9,2 + 8,3 (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) + 6,1 (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ)$$

$$I_N = 2 + j1,9052$$

$$I_N \approx 2,76A$$

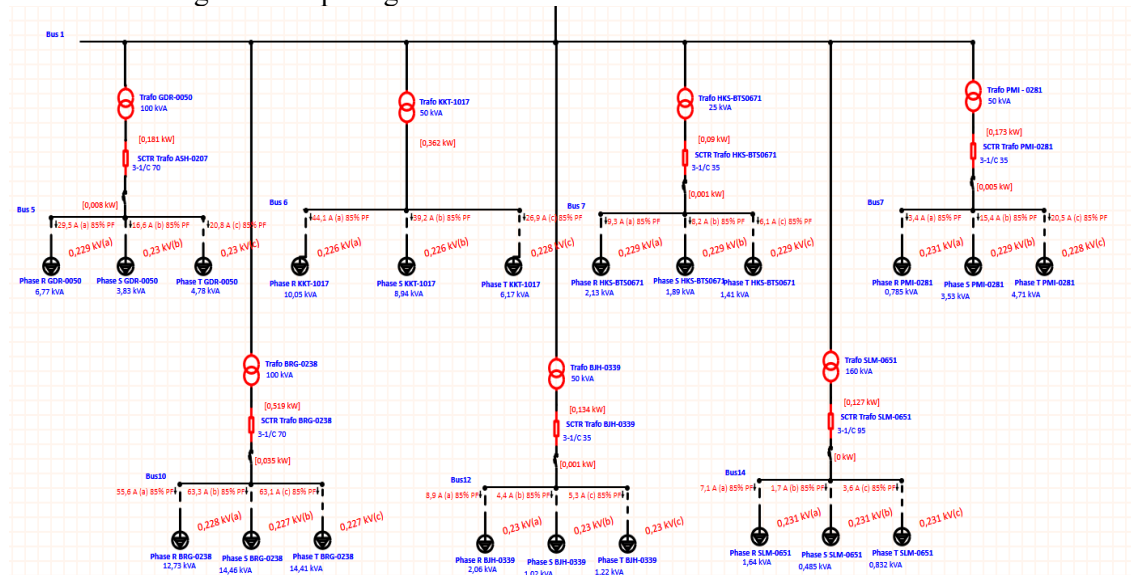
Tabel 12. Hasil Perhitungan Arus Netral Keseluruhan

No	Nama Gardu	Arus Netral Teori (A)	Arus Netral ETAP (A)	Error (%)
1	GDR-0050	11,22	11,3	0,71
2	KKT-1017	14,98	15,3	2,09
3	HKS-BTS0671	2,76	2,8	1,43
4	PMI-0281	15,11	15,2	0,59
5	BRG-0238	7,402	7,5	1,31
6	BJH-0339	4,12	4,1	0,49
7	SLM-0651	4,44	4,4	0,91



Gambar 8. Perbandingan Nilai Arus Netral

Validasi model menunjukkan kesesuaian tinggi antara perhitungan teoritis dan simulasi ETAP dengan *error* maksimal hanya 2,09%. Rendahnya nilai *error* ini mengonfirmasi bahwa *software* ETAP dapat digunakan sebagai alat analisis yang efektif untuk memprediksi kondisi ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi.



Gambar 9. Hasil Simulasi ETAP Model Ketidakseimbangan Beban

Analisis Perbandingan Kinerja Gardu Distribusi

Hasil analisis menunjukkan perbedaan kinerja signifikan antara kondisi eksisting dan setelah pecah beban. Pada kondisi lapangan, gardu PMI-0281 memiliki ketidakseimbangan tertinggi (49,275%) karena distribusi arus yang tidak merata: fasa R (3,4 A), fasa S (15,3 A), dan fasa T (20,4 A). Sebaliknya, gardu BRG-0238 menunjukkan kinerja terbaik (5,478%) dengan distribusi arus yang relatif seimbang: fasa R (55,1 A), fasa S (62,6 A), dan fasa T (62,4 A). Implementasi strategi pecah beban berhasil menurunkan persentase ketidakseimbangan pada tiga gardu bermasalah. Gardu PMI-0281 mengalami penurunan drastis dari 49,275% menjadi 11,59%, BJH-0339 dari 29,032% menjadi 9,677%, dan SLM-0651 dari 44,271% menjadi 10,417%. Perbaikan ini meningkatkan *health index* gardu dari "Buruk" menjadi "Cukup" dan "Baik" sesuai standar PLN [8].

Analisis arus netral menunjukkan korelasi langsung dengan tingkat ketidakseimbangan beban. Gardu dengan ketidakseimbangan tinggi seperti PMI-0281 dan KKT-1017 menghasilkan arus netral besar (15,2 A dan 15,3 A), sedangkan gardu dengan keseimbangan baik seperti HKS-BTS0671 menghasilkan arus netral rendah (2,8 A). Keberadaan arus netral yang tinggi mengindikasikan adanya energi yang terbuang pada penghantar netral, sehingga strategi pecah beban tidak hanya meningkatkan *health index* tetapi juga mengoptimalkan efisiensi operasional sistem distribusi. Temuan penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban berdampak signifikan terhadap kinerja transformator distribusi dan dapat menyebabkan kerugian teknis yang substantial [12]. Metode pecah beban terbukti efektif sebagai solusi praktis untuk mengatasi masalah ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik, dengan tingkat akurasi simulasi yang tinggi menggunakan software ETAP sebagai alat validasi.

D. Penutup

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi kondisi ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi pasangan luar 20/0,4 kV di wilayah UP3 Banjarmasin dengan menggunakan metode kombinasi perhitungan teoritis dan simulasi ETAP. Dari tujuh gardu yang diteliti, tiga gardu menunjukkan kondisi ketidakseimbangan beban yang buruk dengan persentase ketidakseimbangan melebihi 25%, yaitu gardu PMI-0281 (49,275%), BJH-0339 (29,032%), dan SLM-0651 (44,271%). Implementasi strategi pecah beban terbukti efektif dalam mengatasi masalah ketidakseimbangan beban, dimana ketiga gardu bermasalah mengalami penurunan signifikan menjadi 11,59%, 9,677%, dan 10,417% secara berturut-turut, sehingga meningkatkan *health index* dari kategori "Buruk" menjadi "Cukup" dan "Baik" sesuai standar PLN. Validasi model menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi antara perhitungan teoritis arus netral dengan hasil simulasi ETAP, dengan nilai error maksimal hanya 2,09%. Korelasi yang kuat antara tingkat ketidakseimbangan beban dengan besaran arus netral mengkonfirmasi bahwa ketidakseimbangan beban berdampak langsung terhadap efisiensi operasional sistem distribusi. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan software ETAP sebagai alat bantu analisis yang akurat untuk evaluasi ketidakseimbangan beban gardu distribusi, serta implementasi strategi pecah beban sebagai solusi praktis untuk optimalisasi kinerja sistem distribusi tenaga listrik di lingkungan PLN.

Daftar Pustaka

- [1] PT PLN (Persero), "Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset," *Edaran Direksi PT PLN*, pp. 1–11, 2014.
- [2] Ellitan, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2009 Tentang Ketenagalistrikan*, vol. 19, no. 19. 2009. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/9ef73-03.uu-30-2009-tentang-ketenagalistrikan.pdf

- [3] M. Idris Hanif and A. Sultan Rizal, "Optimasi Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi Terhadap Penurunan Rugi Energi Dengan Model Seimbang Beban Sehari," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 7, 2022.
- [4] R. T. Ginting, Zulfahri, and Arlenny, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP.," *Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–89, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.
- [5] B. . Setiawan, H. S. . Pili, and Abdullah, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi MH 196 Menggunakan ETAP 19 di ULP Medan Helvetia," *Konf. Nas. Soc. dan Eng. Politek. Negeri Medan*, pp. 628–636, 2023, doi: 10.5040/9781501365072.7621.
- [6] Mulyadi, M. Mubarakh, A. Hafid, and A. Faharuddin, "Analisis Transformator Distribusi 160 KVA Di PT. PLN (Persero) ULP Panakkukang Berdasarkan Nameplate," *SIBERNETIK J. Pendidik. dan Pembelajaran*, vol. 1, no. 1, pp. 146–157, 2023, doi: 10.59632/sjpp.v1i1.185.
- [7] J. F. Fawwas, S. Abduh, and T. K. Sari, "Analisis Penyeimbangan Beban Transformator Distribusi 400kva 20kv/400v Menggunakan Software ETAP 19.0.1," *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 19, no. 2, pp. 223–236, 2022, doi: 10.25105/jetri.v19i2.12892.
- [8] Asfari Hariz Santoso, Ernanda Rizka, and Harrij Mukti K., "Analisis Pembebanan Terhadap Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 kV Penyulang Lowokwaru di PT. PLN(PERSERO) UP3 Malang," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 121–126, 2023, doi: 10.33795/elposys.v9i3.645.
- [9] M. H. Haris and A. Rizal Sultan, "Optimasi Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi Terhadap Penurunan Rugi Energi dengan Metode Seimbang Beban Sehari," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 7, no. 3, pp. 14–20, 2020, doi: 10.33795/elposys.v7i3.7.
- [10] D. A. S. Siboro, M. I. Arsyad, and Junaidi, "Analysis of Transformer Loading Imbalance at the Faculty of Engineering, Tanjungpura University," *J. Electr. Eng. Energy, Inf. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 385–395, 2024, doi: 10.26418/j3eit.v12i2.77061.
- [11] B. D. Setiawan, H. S. R. Pili, and Abdullah, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRAFODISTRIBUSI MH 196 MENGGUNAKAN ETAP 19 DI ULP MEDAN HELVETIA," *Fairchild Books Dict. Text.*, pp. 628–636, 2022, doi: 10.5040/9781501365072.7621.
- [12] E. S. Wardoyo, A. S. Sinaga2, Ohee Ekawati, and M. A. Reza, "Analisa Rugi-Rugi Daya akibat Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi," *J. Telekomunik.*, pp. 1–6, 2023.