

Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral, Rugi-Rugi Daya, dan Profil Tegangan pada Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan ETAP

Handi Riswanto^{*1}

^{*1}Program Studi Sistem Kelistrikan, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia
Email: ^{*1}handiriswanto8@gmail.com

Abstrak—Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa dapat menyebabkan munculnya arus netral, peningkatan rugi-rugi daya, serta penurunan kualitas tegangan yang berdampak terhadap efisiensi dan keandalan sistem distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP). Penelitian dilakukan melalui simulasi *Unbalanced Load Flow* pada sistem distribusi radial 20 kV dengan dua kondisi pembebanan, yaitu kondisi tidak seimbang (*unbalanced load*) dan kondisi seimbang (*balanced load*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi *unbalanced load*, sistem menghasilkan arus netral sebesar 74,58 A, rugi-rugi daya aktif sebesar 0,906 kW, rugi-rugi daya reaktif sebesar 6,34 kvar, serta tegangan aktual Bus2 sebesar 0,3977 kV. Setelah dilakukan redistribusi beban sehingga daya pada setiap fasa menjadi relatif sama, arus netral berhasil diturunkan menjadi 0 A, rugi-rugi daya aktif menurun menjadi 0,885 kW, rugi-rugi daya reaktif menjadi 6,20 kvar, dan tegangan Bus2 meningkat menjadi 0,3978 kV. Penurunan rugi-rugi daya aktif dan reaktif masing-masing sebesar 2,32% dan 2,21% menunjukkan bahwa penyeimbangan beban mampu meningkatkan efisiensi sistem distribusi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban berpengaruh signifikan terhadap arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan, sehingga penyeimbangan beban perlu dilakukan secara berkala untuk menjaga keandalan dan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik.

Kata Kunci—Ketidakseimbangan Beban, Arus Netral, Rugi-rugi Daya, Profil Tegangan, ETAP

I. PENDAHULUAN

SISTEM distribusi tenaga listrik merupakan bagian penting dalam sistem ketenagalistrikan yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari sistem transmisi menuju pelanggan akhir, baik sektor rumah tangga, komersial, maupun industri. Keandalan sistem distribusi sangat menentukan kualitas pelayanan tenaga listrik karena berkaitan langsung dengan kontinuitas pasokan, kualitas tegangan, dan efisiensi penyaluran energi. Pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV yang banyak

diterapkan di Indonesia, pertumbuhan jumlah pelanggan dan perubahan pola konsumsi energi menyebabkan kondisi pembebanan jaringan menjadi semakin dinamis sehingga diperlukan pengelolaan pembebanan yang optimal [1].

Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada sistem distribusi tiga fasa adalah ketidakseimbangan beban antar fasa. Ketidakseimbangan beban umumnya disebabkan oleh distribusi pelanggan satu fasa yang tidak merata, pertumbuhan beban yang berbeda pada setiap wilayah, serta kurang optimalnya proses redistribusi beban pada jaringan distribusi [2]. Kondisi tersebut menyebabkan arus pada masing-masing fasa menjadi tidak sama sehingga menimbulkan arus netral pada penghantar netral. Selain itu, ketidakseimbangan beban juga dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, penurunan kualitas tegangan, dan berkurangnya efisiensi sistem distribusi [3].

Penelitian yang dilakukan oleh [2] menunjukkan bahwa peningkatan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi berbanding lurus dengan kenaikan arus netral dan rugi-rugi daya. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tingkat ketidakseimbangan beban, maka semakin besar pula arus netral yang mengalir pada penghantar netral. Kondisi ini dapat meningkatkan rugi-rugi daya pada konduktor serta mempercepat kenaikan temperatur transformator distribusi.

Selain memengaruhi arus netral, ketidakseimbangan beban juga berdampak terhadap kualitas tegangan pada sistem distribusi. Menurut [4], ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*) dapat menyebabkan gangguan pada peralatan listrik, terutama motor induksi dan peralatan elektronik sensitif. Penelitian [5] menunjukkan bahwa pembebanan yang tidak merata pada jaringan distribusi 20 kV dapat meningkatkan penurunan tegangan (*voltage drop*) dan rugi-rugi daya pada saluran distribusi. Penelitian [6] juga melaporkan bahwa perubahan pembebanan pada sistem distribusi 20 kV berpengaruh signifikan terhadap profil tegangan pada beberapa titik bus.

Ketidakeimbangan beban juga berkontribusi terhadap peningkatan kerugian teknis (*technical losses*) pada sistem

distribusi. [7] melaporkan bahwa kerugian teknis pada jaringan distribusi 20 kV PT PLN ULP Matang Glumpang Dua dapat mencapai 20,8%, dimana sebagian besar kerugian terjadi pada transformator distribusi akibat pembebanan yang tidak merata antar fasa. Temuan serupa juga dilaporkan oleh [8] menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi 20 kV dapat meningkatkan rugi-rugi daya dan menyebabkan penurunan efisiensi sistem distribusi, terutama pada kondisi pembebanan puncak.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk meminimalkan dampak ketidakseimbangan beban. [9] mengembangkan sistem penyeimbangan beban otomatis berbasis algoritma *Naive Bayes* yang mampu menurunkan arus netral dari 1,20 A menjadi 0,45 A serta menurunkan rugi-rugi daya dari 0,17 W menjadi 0,02 W. Selain itu, perkembangan teknologi smart grid memungkinkan proses pemantauan, pengendalian, dan penyeimbangan beban dilakukan secara real-time sehingga dapat meningkatkan efisiensi, keandalan, dan fleksibilitas sistem distribusi tenaga listrik [10].

Meskipun berbagai penelitian mengenai ketidakseimbangan beban telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis arus netral, rugi-rugi daya, atau profil tegangan secara terpisah pada lokasi tertentu. Evaluasi ketiga parameter tersebut secara simultan menggunakan pendekatan simulasi *unbalanced load flow* pada sistem distribusi 20 kV masih relatif terbatas. Padahal, arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan merupakan parameter yang saling berkaitan dan dapat memengaruhi kinerja sistem distribusi secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian yang mampu menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap ketiga parameter tersebut secara terpadu sehingga diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi dan kinerja sistem distribusi 20 kV.

Pada penelitian ini, analisis dilakukan menggunakan simulasi *unbalanced load flow* pada perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) untuk mengevaluasi kondisi sistem sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan sebagai dasar dalam upaya peningkatan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

II. METODE

A. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai jurnal ilmiah dan literatur terkait ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi 20 kV. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam pemodelan sistem distribusi pada perangkat lunak ETAP, meliputi parameter sistem seperti kapasitas transformator, tegangan sistem, faktor daya, konfigurasi jaringan, serta karakteristik pembebanan pada masing-masing fasa. Penelitian terdahulu juga digunakan sebagai acuan dalam penentuan

parameter sistem, penyusunan skenario pembebanan tidak seimbang dan penyeimbangan beban, serta validasi hasil simulasi. Selanjutnya, sistem distribusi 20 kV dimodelkan pada perangkat lunak ETAP berdasarkan parameter yang diperoleh dari data sekunder untuk mensimulasikan kondisi pembebanan tidak seimbang (*unbalanced load*) dan pembebanan seimbang (*balanced load*). Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral, rugi-rugi daya, profil tegangan, serta efisiensi sistem distribusi 20 kV. Referensi yang digunakan beserta jenis data yang diadopsi dalam penelitian ini disajikan pada Tabel I.

TABLE I
REFERENSI DAN DATA ACUAN PENELITIAN

No.	Referensi	Data yang Digunakan	Kegunaan
1	Listiawati et al. (2023) [2]	Arus netral dan rugi-rugi daya	Acuan pemodelan ETAP
2	Nugraha et al. (2024) [9]	Metode penyeimbangan beban	Acuan redistribusi beban
3	Bachari et al. (2024) [5]	Profil tegangan dan voltage drop	Acuan analisis tegangan
4	dos Santos et al. (2025) [8]	Rugi-rugi daya pada sistem distribusi	Acuan analisis efisiensi
5	Purba et al. (2026) [11]	Pengaruh ketidakseimbangan beban	Acuan validasi hasil simulasi

Berdasarkan referensi yang telah dikumpulkan, penelitian oleh [2] dipilih sebagai sumber data utama dalam pemodelan sistem distribusi pada perangkat lunak ETAP. Sementara itu, penelitian lainnya digunakan sebagai referensi pendukung dalam penyusunan skenario penyeimbangan beban, analisis hasil, dan validasi simulasi.

B. Deskripsi Sistem

Sistem yang digunakan pada penelitian ini merupakan sistem distribusi radial 20 kV yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak ETAP. Sistem terdiri atas sumber tegangan (*power grid*), busbar sisi primer, transformator distribusi, busbar sisi sekunder, dan beban tiga fasa. Simulasi dilakukan pada kondisi sebelum dan sesudah penyeimbangan beban untuk menganalisis arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan.

TABLE II
PARAMETER POWER GRID

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Nominal	20	kV
Frekuensi	50	Hz
Daya Hubung Singkat	50	MVA _{sc}
Rasio X/R	10	-
Konfigurasi	Tiga Fasa	-

Berdasarkan parameter pada Tabel II hingga Tabel VII, simulasi dilakukan pada dua kondisi pembebanan, yaitu kondisi tidak seimbang (*unbalanced load*) dan kondisi seimbang (*balanced load*). Hasil simulasi pada kedua kondisi

TABLE III
PARAMETER BUSBAR SISI PRIMER (Bus1)

Parameter	Nilai	Satuan
Nama Busbar	Bus1	–
Tegangan Nominal	20	kV
Konfigurasi	Tiga Fasa	–

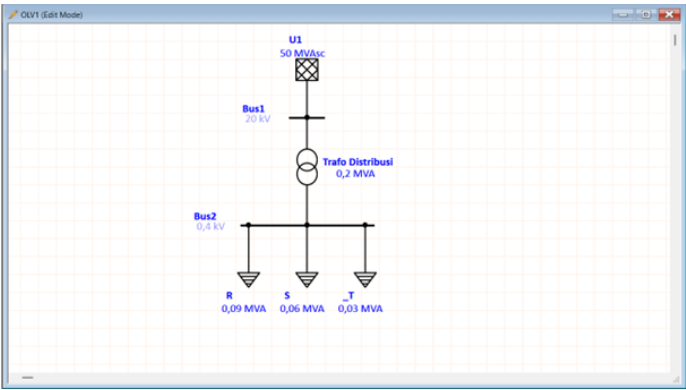
TABLE IV
PARAMETER TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas Transformator	200	kVA
Tegangan Primer	20	kV
Tegangan Sekunder	400	V
Frekuensi	50	Hz
Grup Vektor	Dyn11	-
Impedansi	4	%
Rasio X/R	7	-

tersebut selanjutnya dibandingkan untuk mengevaluasi perubahan arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV.

C. Prosedur Simulasi

1) *Simulasi Kondisi Ketidakseimbangan Beban:* Pada tahap awal, sistem distribusi dimodelkan dalam kondisi pembebanan tidak seimbang (*unbalanced load*) menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0. Simulasi dilakukan menggunakan metode untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus fasa, rugi-rugi daya, dan profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV.



Gambar 1. Single Line Diagram Sistem Distribusi 20 kV pada ETAP

Berdasarkan Gambar 1, sistem distribusi yang dimodelkan terdiri atas *power grid* sebagai sumber tegangan 20

TABLE V
PARAMETER BUSBAR SISI SEKUNDER (Bus2)

Parameter	Nilai	Satuan
Nama Bus	Bus2	-
Tegangan Nominal	400	V
Konfigurasi	3 fasa	-

TABLE VI
KONDISI PEMBEBANAN SEBELUM PENYEIMBANGAN (UNBALANCED LOAD)

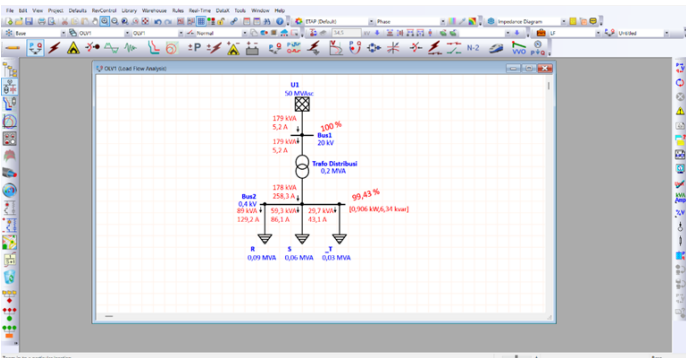
Fasa	Daya Semu (kVA)	Faktor Daya
R	90	0,9
S	60	0,9
T	30	0,9

TABLE VII
KONDISI PEMBEBANAN SETELAH PENYEIMBANGAN (BALANCED LOAD)

Fasa	Daya Semu (kVA)	Faktor Daya
R	60	0,9
S	60	0,9
T	60	0,9

kV, transformator distribusi berkapasitas 200 kVA, busbar sisi primer dan sekunder, serta beban tiga fasa yang dimodelkan dalam kondisi tidak seimbang. Model sistem tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan metode *Unbalanced Load Flow* untuk memperoleh parameter penelitian

Setelah seluruh parameter sistem dimasukkan, simulasi Load Flow dijalankan sehingga diperoleh hasil simulasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Simulasi *Unbalanced Load Flow* pada Kondisi Pembebanan Tidak Seimbang

Berdasarkan Gambar 2, hasil simulasi *Unbalanced Load Flow* ditampilkan secara langsung pada *single line diagram* ETAP. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi pembebanan tidak seimbang, dimana daya pada masing-masing fasa tidak terdistribusi secara merata, yaitu sebesar 89 kVA pada fasa R, 59,3 kVA pada fasa S, dan 29,7 kVA pada fasa T. Kondisi tersebut menyebabkan arus pada masing-masing fasa juga berbeda, yaitu sebesar 129,2 A pada fasa R, 86,1 A pada fasa S, dan 43,1 A pada fasa T.

Untuk mengetahui pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap penghantar netral, dilakukan perhitungan arus netral sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_N &= \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R} \\
 &= \sqrt{(129,2)^2 + (86,1)^2 + (43,1)^2 - (129,2 \times 86,1) - (86,1 \times 43,1) - (43,1 \times 129,2)} \\
 &= 74,58 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban menghasilkan arus netral sebesar 74,58 A. Nilai arus netral yang cukup besar menunjukkan adanya ketidakseimbangan pembebanan antar fasa pada sistem distribusi.

Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan profil tegangan pada setiap bus. Tegangan pada Bus1 tetap berada pada kondisi nominal sebesar 100%, sehingga tegangan aktual pada Bus1 tetap sebesar 20 kV. Sementara itu, tegangan pada Bus2 mengalami penurunan menjadi 99,43%. Dengan tegangan nominal Bus2 sebesar 0,4 kV, maka tegangan aktual pada Bus2 dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{Bus2}} &= 99,43\% \times 0,4 \\
 &= 0,3977 \text{ kV}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

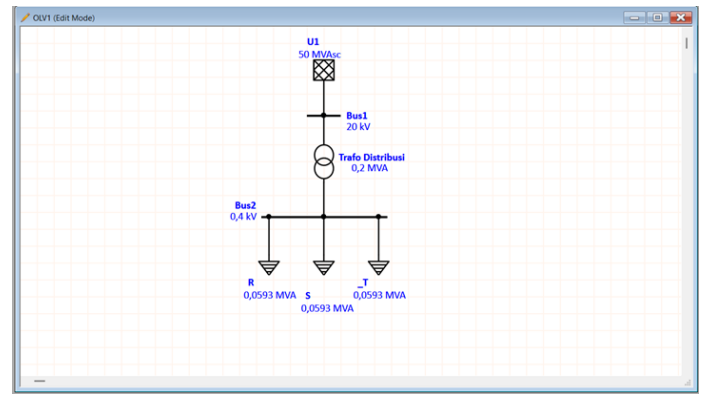
Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan rugi-rugi daya aktif sebesar 0,906 kW dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 6,34 kvar. Untuk mempermudah analisis, hasil simulasi kondisi pembebanan tidak seimbang dirangkum pada Tabel VIII.

TABLE VIII
HASIL SIMULASI KONDISI UNBALANCED LOAD

Parameter	Nilai	Satuan
Daya Fasa R	89	kVA
Daya Fasa S	59,3	kVA
Daya Fasa T	29,7	kVA
Arus Fasa R	129,2	A
Arus Fasa S	86,1	A
Arus Fasa T	43,1	A
Arus Netral	74,58	A
Rugi-rugi daya aktif	0,906	kW
Rugi-rugi daya reaktif	6,34	kvar
Tegangan Aktual Bus1	20	kV
Tegangan Aktual Bus2	0,3977	kV

2) *Simulasi Kondisi Penyeimbangan Beban (Balanced Load)*: Setelah dilakukan simulasi pada kondisi pembebanan tidak seimbang, selanjutnya dilakukan penyeimbangan beban melalui redistribusi daya pada masing-masing fasa. Proses penyeimbangan dilakukan dengan membagi total daya sistem secara merata ke setiap fasa sehingga diperoleh kondisi pembebanan yang seimbang. Total daya sistem pada kondisi awal sebesar 178 kVA dibagi secara merata ke tiga fasa, sehingga masing-masing fasa memiliki daya sebesar 59,3 kVA.

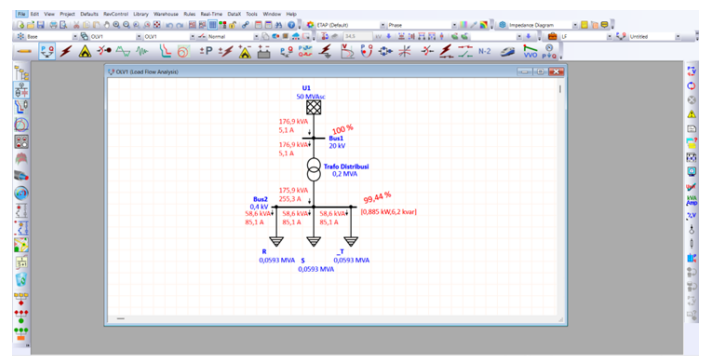
Berdasarkan Gambar 3, sistem distribusi dimodelkan dalam kondisi pembebanan seimbang dengan nilai pem-



Gambar 3. Single Line Diagram Sistem Distribusi pada Kondisi Pembebanan Seimbang

bebanan yang sama pada setiap fasa. Kondisi tersebut diperoleh melalui proses redistribusi beban, sehingga total daya sistem dapat terdistribusi secara merata pada ketiga fasa. Model sistem selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak ETAP untuk mengevaluasi pengaruh penyeimbangan beban terhadap arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan.

Setelah seluruh parameter sistem dimasukkan, simulasi dijalankan sehingga diperoleh hasil simulasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Simulasi pada Kondisi Pembebanan Seimbang

Berdasarkan Gambar 4, hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem telah berada pada kondisi pembebanan seimbang, dimana daya pada masing-masing fasa terdistribusi secara merata, yaitu sebesar 58,6 kVA pada fasa R, 58,6 kVA pada fasa S, dan 58,6 kVA pada fasa T. Kondisi tersebut menyebabkan arus pada masing-masing fasa juga menjadi sama, yaitu sebesar 85,1 A pada setiap fasa. Keseragaman nilai daya dan arus pada ketiga fasa menunjukkan bahwa proses penyeimbangan beban telah berhasil dilakukan.

Untuk mengetahui pengaruh penyeimbangan beban terhadap penghantar netral, dilakukan perhitungan arus netral sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
I_N &= \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_S I_T - I_T I_R} \\
&= \sqrt{(85,1)^2 + (85,1)^2 + (85,1)^2 - (85,1 \times 85,1) - (85,1 \times 85,1) - (85,1 \times 85,1)} \\
&= \sqrt{7242,01 + 7242,01 + 7242,01 - 7242,01 - 7242,01 - 7242,01} \\
&= \sqrt{0} \\
&= 0 \text{ A}
\end{aligned} \tag{3}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kondisi pembebanan seimbang menghasilkan arus netral sebesar 0 A. Nilai tersebut menunjukkan bahwa redistribusi beban secara merata pada setiap fasa mampu menghilangkan arus yang mengalir pada penghantar netral sehingga meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan profil tegangan pada setiap bus. Tegangan pada Bus1 tetap berada pada kondisi nominal sebesar 100%, sehingga tegangan aktual pada Bus1 tetap sebesar 20 kV. Sementara itu, tegangan pada Bus2 mengalami peningkatan menjadi 99,44%. Dengan tegangan nominal Bus2 sebesar 0,4 kV, maka tegangan aktual pada Bus2 dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
V_{\text{Bus2}} &= 99,44\% \times 0,4 \\
&= 0,3978 \text{ kV}
\end{aligned} \tag{4}$$

Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan rugi-rugi daya aktif sebesar 0,885 kW dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 6,2 kvar. Untuk mempermudah analisis, hasil simulasi kondisi pembebanan seimbang dirangkum pada Tabel IX.

TABLE IX
HASIL SIMULASI KONDISI *BALANCED LOAD*

Parameter	Nilai	Satuan
Daya Fasa R	58,6	kVA
Daya Fasa S	58,6	kVA
Daya Fasa T	58,6	kVA
Arus Fasa R	85,1	A
Arus Fasa S	85,1	A
Arus Fasa T	85,1	A
Arus Netral	0	A
Rugi-rugi daya aktif	0,885	kW
Rugi-rugi daya reaktif	6,2	kvar
Tegangan Aktual Bus1	20	kV
Tegangan Aktual Bus2	0,3978	kV

D. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan parameter sistem distribusi pada kondisi pembebanan tidak seimbang (*unbalanced load*) dan pembebanan seimbang

(*balanced load*). Parameter yang dianalisis meliputi arus netral, rugi-rugi daya, dan profil tegangan. Untuk mengetahui pengaruh penyeimbangan beban terhadap kinerja sistem distribusi, dilakukan perhitungan persentase perubahan setiap parameter menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Perubahan} = \frac{X_{\text{awal}} - X_{\text{akhir}}}{X_{\text{awal}}} \times 100\% \tag{5}$$

Keterangan:

X_{awal} : nilai parameter sebelum penyeimbangan beban (*unbalanced load*).

X_{akhir} : nilai parameter setelah penyeimbangan beban (*balanced load*).

Selanjutnya, hasil simulasi pada kondisi unbalanced load dan balanced load dibandingkan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel X.

TABLE X
PERBANDINGAN HASIL SIMULASI SEBELUM DAN SESUDAH
PENYEIMBANGAN BEBAN

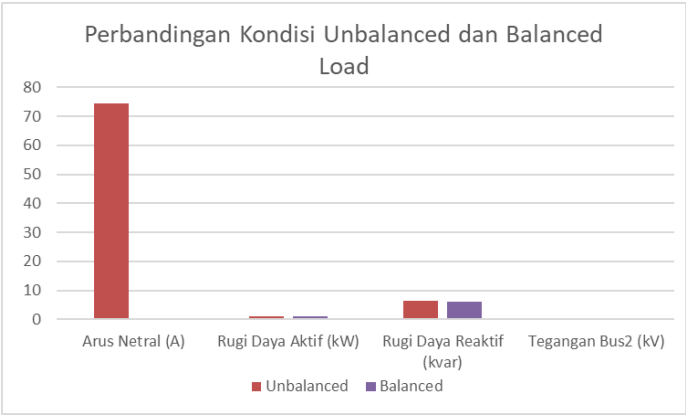
Parameter	Unbalanced Load	Balanced Load	Perubahan
Arus Netral (A)	74,58	0	Turun 100%
Rugi-rugi Daya Aktif (kW)	0,906	0,885	Turun 2,32%
Rugi-rugi Daya Reaktif (kvar)	6,34	6,20	Turun 2,21%
Tegangan Bus1 (kV) Aktual	20	20	Tetap
Tegangan Bus2 (kV) Aktual	0,3977	0,3978	Naik 0,03%

Berdasarkan Tabel X, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara kondisi unbalanced load dan balanced load. Penyeimbangan beban terbukti mampu menurunkan arus netral dari 74,58 A menjadi 0 A, yang menunjukkan bahwa distribusi beban antar fasa telah menjadi lebih merata. Selain itu, rugi-rugi daya aktif dan reaktif juga mengalami penurunan masing-masing sebesar 2,32% dan 2,21%. Dari sisi profil tegangan, tegangan pada Bus2 mengalami peningkatan meskipun relatif kecil, yaitu dari 0,3977 kV menjadi 0,3978 kV. Untuk memperjelas perbedaan kinerja sistem distribusi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban, hasil perbandingan parameter sistem disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral

Berdasarkan hasil simulasi *Unbalanced Load Flow* menggunakan perangkat lunak ETAP, sistem distribusi 20 kV mengalami kondisi pembebanan tidak seimbang dengan daya sebesar 89 kVA pada fasa R, 59,3 kVA pada fasa S, dan 29,7 kVA pada fasa T. Ketidakseimbangan pembebanan tersebut menyebabkan arus pada masing-masing



Gambar 5. Perbandingan Parameter Sistem Distribusi pada Kondisi Unbalanced dan Balanced Load

fasa menjadi tidak merata, yaitu 129,2 A pada fasa R, 86,1 A pada fasa S, dan 43,1 A pada fasa T, sehingga menghasilkan arus netral sebesar 74,58 A. Munculnya arus netral menunjukkan bahwa jumlah vektor arus ketiga fasa tidak saling meniadakan akibat adanya perbedaan pembebanan antar fasa. Hasil penelitian ini sejalan dengan [2] yang menyatakan bahwa peningkatan tingkat ketidakseimbangan beban berbanding lurus dengan kenaikan arus netral pada transformator distribusi. [13] juga melaporkan bahwa semakin besar ketidakseimbangan pembebanan, maka arus yang mengalir pada penghantar netral akan semakin tinggi.

	RN (Ohm)	Ketidak seimbangan	IN (A)	IC (A)	PN (kW)	PN (%)	PC (kW)	PC (%)
Trafo 1	0.0601	5.23%	300	12.5	5.4	0.21%	0.362	0.15%
Trafo 2	0.0601	1.87%	300	13	5.4	0.25%	0.46	0.02%

Gambar 6. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi Daya pada Transformator Distribusi (diadaptasi dari Ruliyanto, 2020).

Berdasarkan Gambar 6, ketidakseimbangan beban sebesar 5,23% pada Trafo 1 dan 1,87% pada Trafo 2 menyebabkan munculnya arus netral sebesar 300 A pada kedua transformator. Kondisi tersebut juga menimbulkan arus *ground* sebesar 12,5 A dan 13 A serta rugi-rugi daya pada penghantar netral sebesar 5,4 kW. Hasil penelitian [13] menunjukkan bahwa peningkatan ketidakseimbangan beban berpengaruh langsung terhadap kenaikan arus netral dan kerugian daya pada sistem distribusi. Temuan tersebut mendukung hasil simulasi penelitian ini, dimana kondisi pembebanan tidak seimbang menghasilkan arus netral sebesar 74,58 A sebelum dilakukan penyeimbangan beban.

Nilai arus netral sebesar 74,58 A menunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi tidak seimbang. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian [14] yang menunjukkan bahwa kondisi pembebanan tidak seimbang meningkatkan tekanan termal pada transformator, sehingga efisiensi dan keandalan operasi transformator dapat menurun. Zhou et al. (2023) juga menyatakan bahwa peningkatan arus netral secara terus-menerus berpotensi mempercepat degradasi

isolasi transformator dan menurunkan keandalan sistem distribusi. Setelah dilakukan redistribusi beban sehingga daya pada setiap fasa menjadi relatif sama, yaitu sebesar 58,6 kVA, hasil simulasi menunjukkan bahwa arus netral turun menjadi 0 A. Penurunan arus netral sebesar 100% tersebut menunjukkan bahwa redistribusi beban berhasil menghilangkan ketidakseimbangan arus antar fasa sehingga sistem dapat beroperasi mendekati kondisi ideal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban merupakan metode yang efektif untuk meminimalkan arus netral dan menjaga keandalan operasi transformator pada sistem distribusi 20 kV.

B. Dampak Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Energi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi unbalanced load menghasilkan rugi-rugi daya aktif sebesar 0,906 kW dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 6,34 kvar. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, rugi-rugi daya aktif menurun menjadi 0,885 kW, sedangkan rugi-rugi daya reaktif menurun menjadi 6,20 kvar. Dengan demikian, terjadi penurunan rugi-rugi daya aktif sebesar 2,32% dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 2,21%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa distribusi beban yang lebih merata mampu mengurangi kerugian daya pada sistem distribusi.

Penurunan rugi-rugi daya terjadi akibat berkurangnya arus netral dan semakin meratanya arus pada setiap fasa setelah dilakukan redistribusi beban. Secara teoritis, rugi-rugi daya pada konduktor berbanding lurus dengan kuadrat arus (I^2R losses), sehingga semakin besar ketidakseimbangan beban maka semakin besar pula rugi-rugi daya yang dihasilkan. Hasil penelitian ini sejalan dengan [7] yang menyatakan bahwa kerugian teknis pada sistem distribusi meningkat ketika transformator mengalami pembebanan yang tidak merata antar fasa. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Hasil penelitian [8] menunjukkan bahwa penerapan penyeimbangan beban pada sistem distribusi mampu memperbaiki profil tegangan, menurunkan rugi-rugi daya, dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. [15] menunjukkan bahwa peningkatan rugi-rugi daya pada sistem tenaga berpengaruh terhadap menurunnya efisiensi penyaluran energi listrik, sedangkan [16] melaporkan bahwa kerugian energi pada jaringan distribusi tegangan menengah dipengaruhi oleh kondisi pembebanan, karakteristik kurva beban, serta rugi-rugi pada penghantar jaringan distribusi.

Meskipun penurunan rugi-rugi daya pada penelitian ini relatif kecil, yaitu sekitar 2%, hasil tersebut menunjukkan bahwa proses penyeimbangan beban tetap memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem distribusi. Penurunan rugi-rugi daya setelah redistribusi beban mengindikasikan adanya peningkatan efisiensi energi. Hasil ini juga mendukung penelitian [9], yang menunjukkan bahwa redistribusi beban antar fasa mampu menurunkan rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi. Oleh karena itu, pemerataan beban antar fasa

dapat dijadikan sebagai salah satu strategi untuk mengoptimalkan operasi sistem distribusi tegangan menengah.

C. Pengaruh Ketidakseimbangan terhadap Profil Tegangan dan Kestabilan Sistem

Selain memengaruhi arus netral dan rugi-rugi daya, ketidakseimbangan beban juga berpengaruh terhadap profil tegangan sistem distribusi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi *unbalanced load*, tegangan aktual pada Bus2 sebesar 0,3977 kV atau sekitar 99,43% dari tegangan nominal. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, tegangan Bus2 meningkat menjadi 0,3978 kV atau mengalami kenaikan sebesar 0,03%. Meskipun peningkatan tegangan relatif kecil, hasil tersebut menunjukkan bahwa redistribusi beban mampu memperbaiki profil tegangan pada sistem distribusi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan [5] yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan beban dapat meningkatkan *voltage drop* pada jaringan distribusi sehingga kualitas tegangan yang diterima pelanggan mengalami penurunan. Temuan serupa juga dilaporkan oleh [12], yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan beban berpengaruh terhadap performa transformator dan efisiensi sistem distribusi sehingga perlu dilakukan pengawasan dan penyeimbangan beban secara berkala. Selain itu, temuan serupa juga dilaporkan oleh [18], yang menyatakan bahwa peningkatan pembebanan pada transformator distribusi menyebabkan jatuh tegangan (*voltage drop*) semakin besar sehingga tegangan pada sisi beban cenderung menurun. Kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas daya yang diterima pelanggan apabila tidak dilakukan pengaturan atau pemerataan beban secara berkala. Hasil-hasil penelitian tersebut mendukung hasil simulasi pada penelitian ini, dimana kondisi pembebanan tidak seimbang menghasilkan profil tegangan yang lebih rendah dibandingkan kondisi setelah dilakukan penyeimbangan beban.

Perbaikan profil tegangan setelah redistribusi beban menunjukkan bahwa pemerataan beban antar fasa dapat meningkatkan kondisi operasi sistem distribusi. Profil tegangan yang lebih baik tidak hanya menjaga kualitas daya yang diterima pelanggan, tetapi juga mendukung keandalan operasi transformator dan peralatan proteksi pada sistem distribusi. Dengan demikian, penyeimbangan beban dapat dijadikan sebagai salah satu upaya untuk menjaga kestabilan tegangan dan meningkatkan kinerja sistem distribusi 20 kV.

D. Pengaruh Penyeimbangan Beban terhadap Kinerja Sistem Distribusi

Berdasarkan hasil simulasi ETAP, proses penyeimbangan beban memberikan pengaruh positif terhadap kinerja sistem distribusi 20 kV. Sebelum dilakukan penyeimbangan, sistem mengalami kondisi pembebanan tidak seimbang yang ditandai dengan munculnya arus netral sebesar 74,58 A, rugi-rugi daya aktif sebesar 0,906 kW, dan tegangan Bus2 sebesar 0,3977 kV. Setelah dilakukan

redistribusi beban sehingga daya pada setiap fasa menjadi relatif sama, arus netral berhasil diturunkan menjadi 0 A, rugi-rugi daya aktif menurun menjadi 0,885 kW, dan tegangan Bus2 meningkat menjadi 0,3978 kV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemerataan beban antar fasa mampu memperbaiki kondisi operasi sistem distribusi secara keseluruhan.

Penurunan arus netral setelah penyeimbangan beban menyebabkan berkurangnya rugi-rugi daya pada penghantar netral dan transformator, sehingga efisiensi sistem mengalami peningkatan. Selain itu, distribusi arus yang lebih merata antar fasa juga mampu memperbaiki profil tegangan pada sisi beban. Hasil penelitian ini sejalan dengan [17] menunjukkan bahwa penyeimbangan beban pada transformator distribusi mampu menurunkan arus netral dan rugi-rugi daya secara signifikan, sehingga efisiensi sistem distribusi dapat meningkat. Temuan serupa juga dilaporkan oleh [12], yang menyatakan bahwa pemerataan pembebanan antar fasa diperlukan untuk menjaga performa transformator dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

Pada penelitian ini, sistem yang dianalisis masih berupa sistem distribusi radial sederhana dengan jumlah beban yang terbatas, sehingga peningkatan efisiensi yang diperoleh setelah penyeimbangan beban relatif kecil. Namun, pada sistem distribusi yang lebih besar dan kompleks, seperti penyulang dengan jumlah gardu distribusi dan pelanggan yang lebih banyak, pengaruh ketidakseimbangan beban diperkirakan akan semakin signifikan. [8] melaporkan bahwa pada sistem distribusi dengan tingkat pembebanan yang tinggi, ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan kualitas tegangan yang berdampak pada menurunnya efisiensi sistem distribusi secara keseluruhan. Temuan serupa juga dilaporkan oleh [3] melaporkan bahwa ketidakseimbangan beban menyebabkan deviasi tegangan dan ketidakseimbangan arus yang semakin besar, sehingga kualitas tegangan pada transformator distribusi menjadi menurun. Oleh karena itu, penerapan strategi penyeimbangan beban pada sistem distribusi yang lebih besar berpotensi memberikan peningkatan efisiensi dan kualitas daya yang lebih signifikan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP, dapat disimpulkan bahwa ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi 20 kV berpengaruh terhadap peningkatan arus netral, rugi-rugi daya, dan penurunan profil tegangan sistem. Pada kondisi *unbalanced load*, sistem menghasilkan arus netral sebesar 74,58 A, rugi-rugi daya aktif sebesar 0,906 kW, rugi-rugi daya reaktif sebesar 6,34 kvar, serta tegangan aktual Bus2 sebesar 0,3977 kV.

Setelah dilakukan redistribusi beban sehingga pembebanan pada setiap fasa menjadi relatif seimbang, arus netral berhasil diturunkan menjadi 0 A atau mengalami penurunan sebesar 100%. Selain itu, rugi-rugi daya aktif dan reaktif masing-masing menurun sebesar 2,32% dan

2,21%, sedangkan tegangan aktual Bus2 mengalami peningkatan dari 0,3977 kV menjadi 0,3978 kV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses penyeimbangan beban mampu memperbaiki kinerja sistem distribusi secara keseluruhan.

Secara umum, penelitian ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban merupakan salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan efisiensi energi, memperbaiki profil tegangan, mengurangi rugi-rugi daya, serta menjaga keandalan operasi transformator pada sistem distribusi 20 kV. Pada sistem distribusi yang lebih besar dan kompleks, penerapan strategi penyeimbangan beban diperkirakan akan memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap peningkatan kualitas daya dan efisiensi sistem distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Gönen, C.-W. Ten, and A. Mehrizi-Sani, *Electric Power Distribution Engineering*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2024.
- [2] D. Listiawati, Pawenary, and A. N. Andini, "Analysis of the Influence of Load Unbalance on the Neutral Current Power Loss in Substation KP10 PT. PLN (Persero) UP3 Teluk Naga," *International Journal of Advanced Multidisciplinary*, vol. 2, no. 3, pp. 690–702, 2023, doi: <https://doi.org/10.38035/ijam.v2i3.354>.
- [3] N. A. Pratama and Y. Rahmawati, "Evaluation of Unbalanced Load Impacts on Distribution Transformer Performances," *Frontier Energy System and Power Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 28–35, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.17977/um049v2i1p28-35>.
- [4] IEEE Standards Association, *IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>.
- [5] Y. E. P. Bachari, Y. Mohamad, T. I. Yusuf, and L. M. K. Amali, "Analysis of Voltage Drop and Power Losses on Medium Voltage 20 kV Distribution System Kotamobagu Area Supplied from PLTD Kotamobagu," *JEECS (Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences)*, vol. 9, no. 1, pp. 79–88, 2024. [Online]. Available: <https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jeeecs/article/view/25345>.
- [6] H. A. Muna, Aripriharta, and P. A. Nugraha, "Sensitivity Analysis of 20 kV Distribution System Under Normal and Contingency Conditions in Malang Area," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1148–1156, 2019, doi: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i3.pp1148-1156>.
- [7] R. R. Maulana, S. Salahuddin, E. Ezwarsyah, and A. Hamid, "Analysis of Technical Loss Calculation Using Load Curve Approach on 20 kV Distribution Network," *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 54–60, 2021, doi: <https://doi.org/10.29103/jreece.v1i2.5238>.
- [8] Q. F. dos Santos, J. G. Soares, and R. L. Siband, "Calculation and Analysis of Balanced Loads in 20 kV Distribution System (Feeder 8) in Gleno Distribution Transformer," *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, vol. 10, no. 10, 2025, doi: <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v10i10.62223>.
- [9] A. T. Nugraha, F. A. Pratama, H. A. Widodo, R. A. Sobhita, and W. N. Hidayat, "Design of 3-Phase Load Dividing Automatic System with Naive Bayes Method," *COMPLETE: Journal of Computer Electronics and Telecommunication*, vol. 4, no. 2, 2023, doi: <https://doi.org/10.52435/complete.v4i2.354>.
- [10] J. Powell, N. Nwulu, and X. Xia, "Smart Grids: A Comprehensive Survey of Challenges, Technologies, and Future Trends," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4892–4921, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.010>.
- [11] A. V. Purba, H. Gunawan, and D. Erivianto, "Analysis of the Relationship Between the Percentage of Load Imbalance and Power Losses in Distribution Transformers at PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur," *Jurnal Info Sains: Informatika dan Sains*, vol. 16, no. 2, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal.seaninstitute.or.id/index.php/InfoSains/article/view/8410>.
- [12] R. R. Ammarsaputra and F. H. Rumawan, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi Daya pada Transformator Daya di Gardu Induk Bukuan," *ELECTROPS: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 3, no. 1, 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.30872/electrops.v3i1.19583>.
- [13] R. Ruliyanto, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Arus Ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat," *Jurnal Ilmiah GIGA*, vol. 23, no. 1, pp. 27–34, 2020, doi: <https://doi.org/10.47313/jig.v23i1.867>.
- [14] E. T. Mharakurwa, G. N. Nyakoe, and A. O. Akumu, "Thermal Modeling of Power Transformer with Unbalanced Loading," in *Proc. IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, pp. 539–544, doi: <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2018.8521168>.
- [15] C. I. Cahyadi, K. Atmia, and A. Fitriani, "Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Transmisi 150 kV Menggunakan Software ETAP 12.6," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 126–130, 2022, doi: <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i2.13306>.
- [16] H. R. Podajow, A. B. Rehiara, and J. B. Stepanus, "Analisa Losses Energy pada Konduktor Jaringan Tegangan Menengah Berbasis Kurva Beban PT. PLN (Persero) UP3 Area Manokwari," *Journal of Information Science and Technology (IS-TECH)*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: <https://doi.org/10.30862/jistech.v12i1.210>.
- [17] N. K. Sidabalok, M. Sitorus, and J. Simamora, "Load Distribution to Reduce Power Loss in Distribution Transformers at PT PLN (Persero) ULP Lembayung," *Journal of Information Technology and Computer Science Education (JITCSE)*, vol. 2, no. 2, 2025, doi: <https://doi.org/10.61306/jitcse.v2i2.206>.
- [18] A. Agusutrisno and M. Fadilah, "Study of Analysis and Repair of Drop Voltage with Load Breaking at Distribution Transformer," *Jurnal Teknik Untirta (JU-TEK)*, vol. 7, no. 2, pp. 95–102, 2021. [Online]. Available: <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/ju-tek/article/download/11006/7580>.

BIOGRAFI PENULIS

Handi Riswanto merupakan mahasiswa Program Studi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro di Politeknik Negeri Malang. Fokus penelitiannya meliputi sistem distribusi tenaga listrik, teknologi smart grid, dan efisiensi energi.