

Evaluasi Ketidakseimbangan Beban pada GTT 20kV di Penyulang Plumbungan Surabaya

Gesit Satriyo Wicaksono
Prodi Teknik Elektro
Universitas Negeri Surabaya
Surabaya, Indonesia
gesit.19022@mhs.unesa.ac.id

Tri Wrahatnolo
Prodi Teknik Elektro
Universitas Negeri Surabaya
Surabaya, Indonesia
triwrahatnolo@unesa.ac.id

Diterima : Mei 2023
Disetujui : Juni 2023
Dipublikasi : Juli 2023

Abstrak—Batas ketidakseimbangan pembebanan pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik ditetapkan yakni antara 5 – 20 % terhadap beban per fasa. Hal ini terjadi akibat pertumbuhan beban yang tidak merata sehingga menyebabkan ketimpangan antara masing – masing fasa. Persentase ketidakseimbangan beban ini berpengaruh terhadap besarnya nilai arus yang mengalir pada penghantar netral. Sehingga netral tersebut dapat menyebabkan rugi - rugi daya pada transformator distribusi. Penelitian ini yang dilakukan pada penyulang plumbungan diantaranya transformator distribusi RB877 memiliki persentase 64,1% dan RB876 memiliki persentase 21% terhadap ketidakseimbangan beban. Sehingga persentase tersebut diluar batas yang telah ditetapkan oleh standar. Dalam hal ini, penelitian dilakukan dalam rangka memperbaiki rugi – rugi daya yang timbul pada transformator distribusi RB877 sebesar 0,214 kW dan RB876 sebesar 0,025 kW dengan melakukan penyeimbangan beban terhadap masing – masing fasa. Simulasi Aliran Daya Tak Seimbang pada ETAP 19.0 digunakan dalam menyelesaikan masalah dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil simulasi, persentase ketidakseimbangan beban transformator distribusi RB877 menjadi 1,16% dan RB 876 menjadi 4,2%. Penyeimbangan yang dilakukan dengan membagi ketimpangan yang terjadi pada fasa yang memiliki kapasitas lebih besar ke yang lebih kecil mengakibatkan penurunan pada arus netral yang semula pada transformator distribusi RB877 sebesar 25,05 A menjadi 1,8 A dan pada RB876 yang semula 8,77 A menjadi 0,8 A. Dengan begitu, rugi daya yang timbul pada akan menurun yaitu transformator distribusi RB877 sebesar 0,00021 kW dan RB876 sebesar 0,0011 kW.

Kata Kunci—Transformator Distribusi; Ketidakseimbangan Beban; Rugi Daya

Abstract—The limit of load imbalance in the Electric Power Distribution System is set between 5%-20% of the load per phase. This occurs due to uneven load growth that causes inequality between each phase. The percentage of load imbalance affects the value of the current flowing in the neutral conductor. So that the neutral will cause power loss in the distribution transformer. This research was conducted on the plumbungan extension, including the RB877 distribution transformer which has a percentage of 64.1% and RB876 has a percentage of 21% of the load imbalance. So that the percentage is outside the limit set by the standard. In this case, research was conducted in order to improve the power losses arising in the RB877 distribution transformer of 0.214 kW

and RB876 of 0.025 kW by balancing the load on each phase. Unbalanced Load Flow Simulation in ETAP 19.0 is used in solving the problems in this study. Based on the simulation results, the percentage of load imbalance of distribution transformer RB877 becomes 1.16% and RB 876 becomes 4.2%. Balancing carried out by dividing the imbalance that occurs in the phase that has a larger capacity to the smaller one results in a decrease in the neutral current which was originally in the RB877 distribution transformer of 25.05 A to 1.8 A and in RB876 which was originally 8.77 A to 0.8 A. Thus, the power losses arising will decrease, namely the RB877 distribution transformer of 0.00021 kW and RB876 of 0.0011 kW.

Keywords—Distribution Transformer; Load Unbalance; Power Losses

I. PENDAHULUAN

Dalam rangka memenuhi kebutuhan dari energi listrik, sistem distribusi mempunyai peranan penting di beberapa sektor dalam penyaluran tenaga listrik [1]. Karena berkaitan langsung dengan penyebaran beban terhadap konsumen atau pelanggan [2]. Gardu Transformator Tiang (GTT) terdiri dari transformator distribusi merupakan bagian terpenting ketika proses penyebaran beban sistem tenaga listrik pada sistem distribusi sebagai pengubah tegangan menengah 20 kV yang diubah ke tegangan rendah 380/220 V [3][4]. Penyebaran beban ini difokuskan agar kebutuhan energi listrik dapat terjangkau dan merata hingga kepada konsumen sesuai dengan permintaan daya oleh konsumen [5]. Seiring berjalannya waktu, permintaan daya oleh konsumen akan selalu bertambah yang membuat keandalan kualitas daya yang dipasok harus selalu diperhatikan [6]. Namun, pada kenyataannya dalam pendistribusian sistem tenaga listrik tidaklah selalu sempurna [7].

Permintaan daya yang selalu meningkat membuat beberapa permasalahan yang semakin kompleks seperti ketidakseimbangan beban [8]. Ketidakseimbangan beban ini dapat muncul karena adanya konfigurasi yang buruk ataupun pola penyebaran beban tidak merata yang disebabkan oleh pertumbuhan dan penggunaan beban secara alami [9]. Karakteristik dari pembebanan yang variatif membuat permasalahan ketidakseimbangan beban ini seringkali terjadi

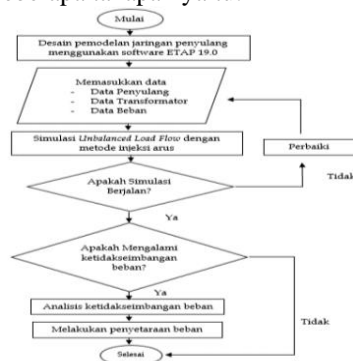
[10]. Sehingga perlunya keandalan dalam distribusi agar terciptanya kualitas daya yang seefisien mungkin [11].

Masalah ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi menyebabkan kualitas daya yang semakin serius akibat perubahan struktur beban yang signifikan[12]. Salah satu penyebabnya karena dominasi pelanggan satu fasa yang beroperasi secara tidak merata[9]. Ketidakseimbangan pembebanan yang terjadi mengakibatkan munculnya arus di konduktor penghantar netral [13]. Besaran nilai dari arus netral dapat mengukur dampak yang terjadi pada jaringan distribusi [14]. Ketidakseimbangan beban ini menyebabkan serangkaian kerugian salah satunya rugi – rugi daya, sehingga perlunya penanganan terhadap ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi [15]. Konfigurasi yang buruk sangat berpengaruh terhadap keandalan dan efisiensi sehingga menyebabkan peningkatan dari rugi-rugi daya [16]. Sehingga meminimisasi kerugian telah menjadi masalah optimisasi yang penting dalam sistem distribusi, mengingat jaringan pada sistem distribusi sebagai bagian yang paling akhir dari totalitas sistem tenaga listrik[17]. Meminimisasi kerugian telah menjadi masalah optimisasi yang penting dalam sistem distribusi [18].

Penelitian ini difokuskan untuk mengurangi besarnya arus netral dan angka rugi daya yang disebabkan dari ketidakseimbangan beban dengan melakukan penyeimbangan teradap arus antar fasa yang memiliki ketimpangan. Penyeimbangan dilakukan hingga memenuhi ketetapan standar untuk mengurangi persentase ketidakseimbangan beban yang terjadi pada Penyulang Plumbungan. Penelitian Terdahulu mengenai ketidakseimbangan beban yang berkaitan dengan analisis ketidakseimbangan beban yang terjadi pada jaringan distribusi menggunakan ETAP membahas tentang ketidakseimbangan beban pada sebuah transformator distribusi [19].

II. METODE

Penelitian ini menggunakan simulasi dengan pendekatan yang bersifat kuantitatif yaitu dengan melakukan pengamatan pada objek terkait suatu fenomena dan mengkaji teori berdasarkan permasalahan yang diambil serta analisa secara matematis yang dapat dihitung secara akurat [20]. Metode yang digunakan simulasi *Unbalanced Load Flow* pada aplikasi ETAP versi 19.0 terkait jaringan distribusi GTT 20kV diagram segaris pada Penyulang Plumbungan yang terletak di Surabaya. Perhitungan dilakukan untuk mengetahui pengaruh besarnya arus netral yang menyebabkan rugi daya ketika mengalami beban tidak seimbang dan beban seimbang. Dalam penelitian ini menggunakan beberapa tahapan yaitu:



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

A. Studi Unbalanced load Flow

Studi *Unbalanced Load Flow* merupakan metode pada *software* ETAP untuk mengetahui kondisi operasi dalam keadaan beban tidak seimbang yang bertujuan untuk melihat efisiensi dari pembebanan yang ditampilkan dari data pada hasil. *Single Line Diagram* merupakan data awal sebagai masukan simulasi yang dilengkapi dengan data spesifikasi dan data beban arus (A) yang terpasang pada transformator distribusi [12]. *Single line diagram* ETAP terdiri dari sejumlah komponen dalam merangkai rangkaian kompleks dan setiap unsur komponen dapat berdiri sendiri, ukuran dan symbol yang ditampilkan menggunakan standar ANSI (*American National Standards Institute*) dan IEC (*International Electrhoncal Commission*)[21].

B. Transformator Distribusi

Transformator distribusi sebagai pengubah taraf tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 380/220 kV pada jaringan sistem distribusi tenaga listrik [3]. Transformator distribusi terdiri dari beberapa bagian seperti kumparan, inti besi dan minyak [4].

C. Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban pada transformator terjadi ketika beban pada arus yang mengalir tidak sama sehingga memiliki ketimpangan antar phasanya[5]. Faktor dari ketidakseimbangan beban ini muncul karena dipengaruhi oleh beban yang dipakai oleh konsumen sangat bervariasi. Sebagai akibat dari ketimpangan nilai arus yang mengalir antar phasanya maka mengalirlah arus pada penghantar netral[2]. Berdasarkan standar untuk ketidakseimbangan beban yang diatur dalam standar IEEE 446-1995 sebesar 5% - 20% [22]. Persentase pembebanan ketika tidak seimbang dapat ditunjukkan dengan koefisien a,b,c yang dimana koefisien tersebut membutuhkan arus pada fasa dan arus rata – rata. Maka arus rata – rata diperoleh dengan persamaan:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (1)$$

Dalam kondisi beban tidak seimbang koefisien a, b dan c digunakan untuk melambangkan fasanya. Koefisien tersebut dijabarkan pada persamaan berikut:

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (3)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (4)$$

Ketika dalam keadaan seimbang koefisien tiap fasa adalah satu. Dengan begitu, persentase dari ketidakseimbangan beban menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\% = \frac{\{|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|\}}{3} \times 100\% \quad (5)$$

Kapasitas daya yang dapat disalurkan transformator distribusi, dijabarkan dengan rumus sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \quad (6)$$

D. Rugi - rugi daya

Beban yang tidak seimbang ketika arus pada masing – masing fasa tidak sama besar, sehingga menyebabkan ada arus pada penghantar netral [16]. Penghantar konduktor

netral yang dialiri arus menyebabkan rugi daya, sehingga dilakukan persamaan dengan rumus sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (7)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sebelum Penyeimbangan Beban

Hasil pengukuran arus yang dilakukan secara langsung, didapatkan arus pembebanan per fasa yaitu:



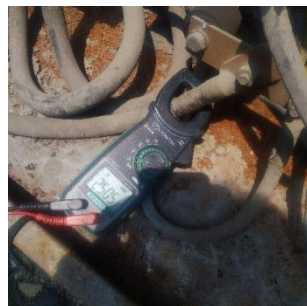
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2. Pengukuran Arus pada GTT RB 877

Pada gambar 2 merupakan hasil pengukuran pada GTT RB 877 dengan kapasitas 200 kVA yang dilakukan di jam 10.00 WIB. Pengukuran tersebut diantaranya dilakukan dengan pengukuran pada gambar 2 (a) yaitu fasa R, gambar 2(b) fasa S, gambar 2 (c) fasa T dan fasa N gambar 2 (d).

TABEL 1. HASIL PENGUKURAN ARUS TRANSFORMATOR DISTRIBUSI SECARA LANGSUNG

GTT	Kapasitas	R	S	T	N
RB 875	200 kVA	27,15 A	22,44 A	22,82 A	16,46 A
RB 876	200 kVA	12,55 A	23,01 A	19,39 A	8,77 A
RB 877	200 kVA	46,47 A	27,44 A	13,67 A	25,05 A
RB 894	200 kVA	25,98 A	23,32 A	36,88 A	11,10 A
RB 895	200 kVA	28,19 A	23,70 A	34,60 A	8,21 A

Hasil pengukuran berupa arus digunakan sebagai perhitungan pembebanan dan analisa untuk ketidakseimbangan pada transformator distribusi. Arus netral yang didapat akan digunakan untuk menghitung *losses* pada penghantar netral. Analisa dilakukan dengan mensimulasikan data pengukuran dengan menggunakan *software* ETAP.

Untuk mendapatkan persentase ketidakseimbangan beban, maka digunakan persamaan (1), (2), (3), (4), (5) dan didapatkan hasil sebagai berikut:

- Pada RB875:

$$I_{rata-rata} = \frac{27,15 + 22,44 + 22,82}{3} = 24,13 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{27,15}{24,13} = 1,125$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{22,44}{24,13} = 0,929$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{22,82}{24,13} = 0,945$$

$$\% = \frac{(|1,125-1|+|0,929-1|+|0,945-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 8,3\%$$

- Pada RB876:

$$I_{rata-rata} = \frac{12,55 + 23,01 + 19,39}{3} = 18,31 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{12,55}{18,31} = 0,685$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{23,01}{18,31} = 1,256$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{19,39}{18,31} = 1,058$$

$$\% = \frac{(|0,685-1|+|1,256-1|+|1,058-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 21\%$$

- Pada RB877

$$I_{rata-rata} = \frac{46,47+27,44+13,67}{3} = 29,19 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{46,47}{29,19} = 2,421$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{27,44}{29,19} = 0,940$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{13,67}{29,19} = 0,468$$

$$\% = \frac{(|2,421-1|+|0,940-1|+|0,468-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 67,1\%$$

- Pada RB894

$$I_{rata-rata} = \frac{25,98 + 23,32 + 36,88}{3} = 28,72 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{25,98}{28,72} = 0,904$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{23,32}{28,72} = 0,811$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{36,88}{28,72} = 1,284$$

$$\% = \frac{(|0,904-1|+|0,811-1|+|1,284-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 18,9\%$$

- Pada RB895

$$I_{rata-rata} = \frac{28,19 + 23,70 + 34,60}{3} = 28,83 \text{ A}$$

$$I_R = a \cdot I = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{28,19}{28,83} = 0,977$$

$$I_S = b \cdot I = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{23,70}{28,83} = 0,822$$

$$I_T = c \cdot I = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{34,60}{28,83} = 1,200$$

$$\% = \frac{(|0,977-1|+|0,822-1|+|1,200-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 10,3\%$$

Sebagaimana diketahui standar dari ketidakseimbangan beban diatur dalam standar IEEE 446 - 1995 sebesar 5% - 20%. Dengan begitu, transformator RB 876 dan RB 877 memiliki persentase melebihi standar sebesar 21% dan 67,1%.

Kabel penghantar transformator distribusi dengan penampang konduktor netral 70mm² memiliki besar resistansi 0,342 Ω dan transformator 200 kVA dengan cos sebesar 0,85. Untuk mendapatkan rugi pada penghantar arus netral digunakan persamaan (6), (7) dan (8) sebagai berikut:

$$P = (200) \cdot (0,85) = 170 \text{ kW}$$

- GTT RB875

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (16,46)^2 \cdot (0,342) = 92,65 \text{ W} = 0,092 \text{ kW}$$

- GTT RB876

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (8,77)^2 \cdot (0,342) = 25,88 \text{ W} = 0,025 \text{ kW}$$

- GTT RB877

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (25,05)^2 \cdot (0,342) = 214 \text{ W} = 0,214 \text{ kW}$$

- GTT RB894

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (11,10)^2 \cdot (0,342) = 42,13 \text{ W} = 0,042 \text{ kW}$$

- GTT RB895

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (8,21)^2 \cdot (0,342) = 23,05 \text{ W} = 0,023 \text{ kW}$$

B. Simulasi

Dari data pengukuran yang dilakukan secara langsung pada masing – masing fasa, didapatkan hasil simulasi dengan menggunakan ETAP yaitu sebagai berikut:

Bus31(TR)	0.400	A	99.00	-60.4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus191	C	0.003	0.002	13.5	0.0	85.1
		B	99.24	179.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		N				0.0	
		C	99.40	59.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		N			13.5		
										Bus192	B	0.005	0.003	27.0	0.0	85.1
										N				27.0		
										Bus193	A	0.009	0.005	45.4	-92.0	85.2
										N				45.4		
										Bus31(TD)	A	-0.009	-0.005	45.4	88.0	85.2
										B	-0.005	-0.003	27.0	-32.0	85.1	
										C	-0.003	-0.002	13.5	-152.0	85.1	
										N				27.7		

Gambar 3. Hasil Simulasi pada GTT RB 877

Pada Gambar 3. Didapatkan hasil arus yang mengalir pada masing – masing fasa GTT RB 875 yang terdapat di BUS 36. Selisih antara pengukuran dan simulasi pada arus netral sebesar 2,65 A. Serta arus pembebanan fasa R yang memiliki selisih sebesar 1,07 A, fasa S dengan selisih 0,44 A dan fasa T selisih 0,17 A. Dengan begitu, hasil pengukuran mendekati hasil dari proses simulasi. Berikut hasil perbandingan antara simulasi dan pengukuran;

TABEL 2. PERBANDINGAN PENGUKURAN DAN SIMULASI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

Pengukuran				
No. GTT	R	S	T	N
RB 875	27,15 A	22,44 A	22,82 A	16,46 A
RB 876	12,55 A	23,01 A	19,39 A	8,77 A
RB 877	46,47 A	27,44 A	13,67 A	25,05 A
RB 894	25,98 A	23,32 A	36,88 A	11,10 A
RB 895	28,19 A	23,70 A	34,60 A	8,21 A
Simulasi				
No. GTT	R	S	T	N
RB 875	26,7 A	22,1 A	22,5 A	4,5 A
RB 876	12,4 A	22,7 A	19,1 A	9 A
RB 877	45,4 A	27 A	13,5 A	27,7 A
RB 894	25,6 A	23 A	36,2 A	12,1 A
RB 895	27,7 A	23,4 A	34 A	9,2 A

Pada Tabel 2. Didapatkan hasil perbandingan keseluruhan GTT pada pengukuran dan simulasi. Hasil dari masing – masing fasa, tidak memiliki perbedaan nilai maupun selisih arus yang cukup signifikan.

C. Setelah Penyeimbangan Beban

Penyeimbangan yang dilakukan dengan membagi ketimpangan yang terjadi pada fasa yang memiliki kapasitas lebih besar ke yang lebih kecil. Diperoleh hasil sebagai berikut:

Bus31(TR)	0.400	A	99.21	-60.3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus191	C	0.005	0.003	28.0	0.0	85.1
		B	99.22	179.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		N			28.0		
		C	99.22	59.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		N			28.0		
										Bus192	B	0.006	0.003	28.5	0.0	85.1
										N				28.5		
										Bus193	A	0.006	0.003	29.0	-92.0	85.1
										N				29.0		
										Bus31(TD)	A	-0.006	-0.003	29.0	88.0	85.1
										B	-0.006	-0.003	28.5	-32.0	85.1	
										C	-0.005	-0.003	28.0	-152.0	85.1	
										N				0.8		

Gambar 4. Hasil Arus Setelah Penyeimbangan pada GTT RB 877

TABEL 3. HASIL ARUS SETELAH DILAKUKAN PENYEIMBANGAN

Setelah Penyeimbangan Arus (A)					
BUS	No. GTT	R	S	T	N
BUS36	RB 875	24,5 A	24 A	23,5 A	0,8 A
BUS37	RB 876	17 A	19 A	18,5 A	1,8 A
BUS32	RB 877	29,5 A	29 A	28,5 A	0,8 A
BUS39	RB 894	27,5 A	28 A	29 A	1,3 A
BUS34	RB 895	27 A	28,5 A	29 A	1,8 A

Pada Tabel 3. Menunjukkan penyeimbangan beban GTT pada masing – masing fasa. Penyeimbangan ini dilakukan dengan memindah fasa yang memiliki ketimpangan agar didapatkan hasil dengan mendekati arus rata-rata di masing – masing GTT. Berikut merupakan perhitungan ketidakseimbangan beban dan rugi daya setelah dilakukannya penyeimbangan:

- RB 875

$$I_{rata - rata} = \frac{24,5 + 24 + 23,5}{3} = 24 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata - rata}} = \frac{24,5}{24} = 1,020$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata - rata}} = \frac{24}{24} = 1$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata - rata}} = \frac{23,5}{24} = 0,979$$

$$\% = \frac{(|1,020-1|+|1-1|+|0,979-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 1,36\%$$

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (0,8)^2 \cdot (0,342) = 0,218 \text{ Watt} = 0,00021 \text{ kW}$$

- RB 876

$$I_{rata - rata} = \frac{17 + 19 + 18,5}{3} = 18,16 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata - rata}} = \frac{17}{18,16} = 0,936$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata - rata}} = \frac{19}{18,16} = 1,046$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata - rata}} = \frac{18,5}{18,16} = 1,018$$

$$\% = \frac{(|0,936-1|+|1,046-1|+|1,018-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 4,2\%$$

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (1,8)^2 \cdot (0,342) = 1,108 \text{ Watt} = 0,0011 \text{ kW}$$

- RB 877

$$I_{rata - rata} = \frac{29,5 + 29 + 28,5}{3} = 29 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata - rata}} = \frac{29,5}{29} = 1,017$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata - rata}} = \frac{29}{29} = 1$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata - rata}} = \frac{28,5}{29} = 0,982$$

$$\% = \frac{(|1,017-1|+|1-1|+|0,982-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 1,16\%$$

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (0,8)^2 \cdot (0,342) = 0,218 \text{ Watt} = 0,00021 \text{ kW}$$

- RB 894

$$I_{rata - rata} = \frac{27,5 + 28 + 29}{3} = 28,16 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata - rata}} = \frac{27,5}{28,16} = 0,976$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata - rata}} = \frac{28}{28,16} = 0,994$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata - rata}} = \frac{29}{28,16} = 1,029$$

$$\% = \frac{(|0,976-1|+|0,994-1|+|1,029-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 2,03\%$$

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (1,3)^2 \cdot (0,342) = 0,577 \text{ Watt} = 0,0005 \text{ kW}$$

- RB 895

$$I_{rata - rata} = \frac{27 + 28,5 + 29}{3} = 28,16 \text{ A}$$

$$I_R = a.I = \frac{I_R}{I_{rata - rata}} = \frac{27}{28,16} = 0,958$$

$$I_S = b.I = \frac{I_S}{I_{rata - rata}} = \frac{28,5}{28,16} = 1,012$$

$$I_T = c.I = \frac{I_T}{I_{rata - rata}} = \frac{29}{28,16} = 1,029$$

$$\% = \frac{(|0,958-1|+|1,012-1|+|1,029-1|)}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 2,76\%$$

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_N = (1,8)^2 \cdot (0,342) = 1,108 \text{ Watt} = 0,0011 \text{ kW}$$

TABEL 4. HASIL PERBANDINGAN SEBELUM DAN SESUDAH DILAKUKAN PENYEIMBANGAN

Sebelum Penyeimbangan		
No. GTT	Losses	UL (%)
RB 875	0,092 kW	8,3%
RB 876	0,025 kW	21%
RB 877	0,214 kW	67,1%
RB 894	0,042 kW	18,9%
RB 895	0,023 kW	10,3%
Setelah Penyeimbangan		
No. GTT	Losses	% UL
RB 875	0,00021 kW	1,36%
RB 876	0,0011 kW	4,2%
RB 877	0,00021 kW	1,16%
RB 894	0,0005 kW	2,03%
RB 895	0,0011 kW	2,76%

Pada Tabel 4. Didapatkan hasil perbandingan sebelum dan sesudah penyeimbangan. Dari penyeimbangan beban ini berdampak pada penurunan rugi daya dikarenakan berkurangnya arus pada penghantar konduktor netral.

D. Pembahasan

Ketidakseimbangan beban ini berdampak pada pihak penyedia maupun konsumen, terlebih permasalahan ketidakseimbangan beban ini seringkali terjadi karena beban pelanggan yang sangat bervariasi dan tidak menentu. Ketidakseimbangan pembebanan yang terjadi pada GTT RB 877 dan RB 876 diluar batas rentang standar yaitu sebesar 67,1% dan 18,9%. Dengan dilakukannya penyeimbangan beban pada transformator distribusi, gangguan yang terjadi akibat adanya ketidakseimbangan beban dapat mengurangi besarnya arus netral yang mengalir sehingga nilai dari rugi daya dapat diminimalisir sekecil mungkin. Dengan begitu, keandalan dan efisiensi dalam penyaluran distribusi dapat dimaksimalkan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, transformator RB 876 dan RB 877 memiliki persentase ketidakseimbangan beban sebesar 21% dan 67,1 %. Hal ini berada diluar batas ketidakseimbangan beban yang ditetapkan standar IEEE 446-1999. Dengan Skenario penyeimbangan beban, persentase ketidakseimbangan beban menurun menjadi 4,2 % dan 1,16%. Setelah dilakukan penyeimbangan, dari hasil simulasi ETAP arus netral pada RB 876 dan RB 877 mengalami penurunan menjadi 1,8 A dan 0,8 A. Sehingga, rugi daya yang dihasilkan menurun menjadi 0,0011 kW dan 0,00021 kW. Dengan begitu, pengaruh dari penyeimbangan beban yang dilakukan sesuai standar dapat menurunkan nilai dari rugi daya.

REFERENCES

[1] O. Akar, U. K. Terzi, and O. Ozgonenel, "Location of transformers during the extension of an electricity distribution network," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 211, pp. 108–189, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.108189.

[2] S. A. S. Alkadhim, "Three phase Transformer: Connection and Configuration," *SSRN Electron. J.*, 2020, doi: 10.219/ssrn.3647143.

[3] Y. Igrisa, Y. Mohamad, and A. Tolago Irawati, "Analisis Perkiraan Umur Trafo Tenaga 150kV Di GI Isimu," *JJEE Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 101–108, 2021.

[4] Jumardin, J. Ilham, and S. Salim, "Studi Karakteristik Minyak Nilam Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Transformator," *JJEE Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 9–17, 2019.

[5] M. A. A. Al-jaafreh and G. Mokryani, "Planning and Operation of Low Voltage Distribution Networks : A Comprehensive Review," *IET Energy Syst. Integr.*, pp. 133–146, 2019, doi: 10.1049/iet-esi.2019.0013.

[6] Fauzi, Subhan, Muliadi, Syukri, T. M. Asyadi, and A. S. Budi, "Analisis Tingkat Keandalan Pada Jaringan Express Feeder SUTM A3CS Sebagai Incoming Baru," *JJEE Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 48–54, 2023.

[7] K. Rafał, J. Biskupski, S. Bykuć, and P. Chaja, "Dynamic Voltage Regulation and Unbalance Compensation in a Low-Voltage Distribution Network Using Energy Storage System," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 22, 2022, doi: 10.3390/app122211678.

[8] J. Pan, J. Liu, X. Chen, and K. Zhong, "Three-phase unbalanced load control based on load–electricity transfer index," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 312–318, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.01.064.

[9] Syukri, T. M. Arsyadi, Muliadi, and F. Moesnadi, "Analisa Pembebanan Transformator Distribusi 20 kV Pada Penyulang LS5 Gardu LSA 249," *JJEE Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 202–206, 2022.

[10] N. A. Pratama and Y. Rahmawati, "Evaluation of Unbalanced Load Impacts on Distribution Transformer Performances," vol. 2, no. 1, pp. 28–35, 2020, doi: http://dx.doi.org/10.17977/um048v2i1p28-35.

[11] M. Collan, J. Savolainen, and E. Lilja, "Analyzing the returns and rate of return regulation of Finnish electricity distribution system operators 2015–2019," *Energy Policy* 160, vol. 160, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112677.

[12] E. H. Harun, M. T. Adam, and J. Ilham, "Perbaikan Kualitas Tegangan Distribusi 20 kV di Gardu Hubung Lemito Melalui Studi Aliran Daya," *JJEE Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 143–147, 2022.

[13] R. Mishra and T. K. Saha, "Modelling and analysis of distributed power generation schemes supplying unbalanced and non-linear load," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 119, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105878.

[14] E. P. López, A. L. Vinet, V. L. Martínez, J. M. Romeu, and I. V. Salazar, "Measurement of Power Effects Caused by The Deterioration of The Neutral Conductor in Three - Phase Distribution Networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 215, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.epesr.2022.109014.

[15] B. Pan, Y. Zhang, X. Gui, Y. Wan, and G. Wang, "Analysis and Research of Three-phase Unbalance in Distribution Transformers," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 252, no. 3, pp. 2–7, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/252/3/032196.

[16] A. O. Salau, Y. W. Geburu, and D. Bitew, "Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04233, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04233.

[17] Y. Qu, C. Ching, J. Xu, Y. Sun, S. Liao, and D. Ke, "International Journal of Electrical Power and Energy Systems A global optimum flow pattern for feeder reconfiguration to minimize power losses of unbalanced distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 131, no. 107071, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107071.

[18] A. Routray, K. D. Mistry, and S. R. Arya, "Wake Analysis on Wind Farm Power Generation for Loss Minimization in Radial Distribution System," *Renew. Energy Focus*, vol. 34, pp. 99–108, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.REF.2020.06.001.

[19] R. T. Ginting, "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.

[20] D. Thiel V, *Research Methods for Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. doi: http://doi.org/10.1017/CBO9781139542326.

- [21] Syufrijal and R. Monantun, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. 2014.
- [22] "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications," *ANSI/IEEE Std 446-1987*, pp. 1–272, doi: 10.1109/IEEESTD.1987.120315.