

Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 Kilovolt Terhadap Rugi-Rugi Daya Pada Penyulang Toddopuli PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) Unit Layanan Pelanggan Panakukkang Makassar

Wa Ode Sitti Hajriani F.A.¹⁾, Marwan²⁾, Sarma Thaha³⁾.

¹ Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ujung Pandang
fadhilaisah22@gmail.com

² Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ujung Pandang
marwan_energy@yahoo.com

³ Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ujung Pandang
sarmathaha@poliupg.ac.id

Abstrak

Dalam penyaluran tenaga listrik ternyata sukar diperoleh beban yang seimbang, terutama beban-beban satu fasa yang mendapat pelayanan dari sistem tiga fasa. Sehingga keadaan ini dapat mengakibatkan rugi-rugi daya dan bagi konsumen yaitu terjadinya penurunan tegangan. Hal ini terjadi karena adanya arus yang mengalir pada penghantar netral trafo. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui ketidakseimbangan beban yang diakibatkan oleh beban satu fasa sistem distribusi tiga fasa, rugi daya jaringan, dan penghantar netral yang ditimbulkan akibat beban yang tidak seimbang serta melihat pengaruh dari segi kerugian energi yang ditimbulkan. Sehubungan dengan itu, penelitian ini dilakukan di penyulang Toddopuli pada PT. PLN (Persero) ULP Panakukkang dengan menggunakan metode analisis secara deskriptif dan simulasi menggunakan ETAP *Power Station* 16.0. Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa terdapat 4 gardu yang mengalami penyeimbangan beban yaitu GT.PTP037, GT.PTP022, GT.PTP028, dan GT.PTP021. Dengan besar rugi-rugi daya jaringan pada kondisi tidak seimbang adalah sebesar 319 kW dan kerugian energi listrik sebesar Rp. 9.003.860,00. Kemudian setelah penyeimbangan beban, rugi-rugi daya dan kerugian energi listrik mengalami penurunan sebesar 45,48% yaitu 174,12 kW dan Rp. 4.908.429,00. Dengan selisih tertinggi antara hasil simulasi ETAP 16.0 dengan perhitungan manual mengenai rugi-rugi daya jaringan terdapat pada gardu GT.PTP022.

Keywords: Faktor Ketidakseimbangan Beban, Rugi-Rugi Daya, Kerugian Energi Listrik

I. PENDAHULUAN

Dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, kualitas daya merupakan hal yang penting. Untuk menjaga stabilitas tersebut perlu diperhatikan pembebanan pada transformator distribusi. Karena dalam analisis pembebanan tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi beban lebih akibat beban tidak seimbang.

Sehingga perencanaan sistem akan selalu berusaha untuk menyeimbangkan beban-beban satu fasa atau per-fasa sedemikian rupa agar dapat mengalirkan arus seimbang pada salurannya, namun dalam mengalirkan tenaga listrik tersebut terjadi pembagian beban-beban yang pada awalnya merata tetapi karena ketidakserempakan waktu pemakaian atau penyalaan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik, ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S, dan fasa T), inilah yang menyebabkan mengalirnya arus di netralnya transformator, arus netral inilah yang menimbulkan rugi-rugi pada transformator sehingga kemampuannya dalam melayani beban menurun. Oleh karena itu diperlukan data untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-

rugi pada transformator dan dampak lainnya pada segi ekonomi. Karena nantinya akan sangat mempengaruhi biaya investasi [1].

Dalam melakukan penelitian ini objek penelitian akan dilakukan pada transformator di Penyulang Toddopuli. Pemilihan Penyulang Toddopuli berdasarkan data pengukuran beban trafo distribusi pada PT PLN (Persero) ULP Panakukkang yang pernah mengalami gangguan pada tahun 2019.

Berdasarkan permasalahan di atas maka dari itu penulis mengambil judul tentang “Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 kV Terhadap Rugi-Rugi Daya pada Penyulang Toddopuli ULP Panakukkang Makassar”.

II. KAJIAN LITERATUR

A. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen [11]. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV di naikan tegangannya

oleh Gardu Induk (GI) dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula.

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurunan tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer [2]. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke pelanggan konsumen.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan *transformator step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan-perengkapannya, selain itu juga tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan *transformator step-down*. Dalam hal ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan. [3].

B. Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator menggunakan prinsip hukum Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dengan arus bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet.

C. Klasifikasi Beban

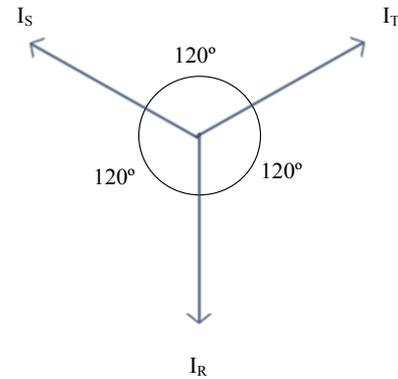
Setelah mengetahui mengenai definisinya, beban listrik itu sendiri kemudian diklasifikasikan atau dikelompokkan kedalam beberapa kelas-kelas. Pengelompokkan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pola konsumsi energi listrik pada tiap sektor yang memiliki beban. Oleh karena itu penyedia energi pada bagian distribusi pun dapat membagi bagian-bagian beban agar seimbang penggunaannya dan tetap memiliki cadangan energi yang cukup. Sehingga pengklasifikasian beban ini dianggap perlu agar dapat diketahui berapa jumlah beban dan berapa jumlah daya yang akan disalurkan untuk menjalankan beban tersebut. Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar, ragam beban dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis seperti di bawah ini.

- 1) Beban rumah tangga,
- 2) beban komersial,
- 3) beban industri,

- 4) beban fasilitas umum (Suswanto, 2009:186). [5] [8]

D. Sistem Distribusi Sekunder dengan Beban Tak Seimbang

Pembebanan tidak seimbang ini terjadi pada transformator yang distribusi akibat karakteristik beban yang terhubung pada transformator berbeda-beda untuk ketiga fasanya. Keadaan seimbang adalah suatu keadaan ketika:

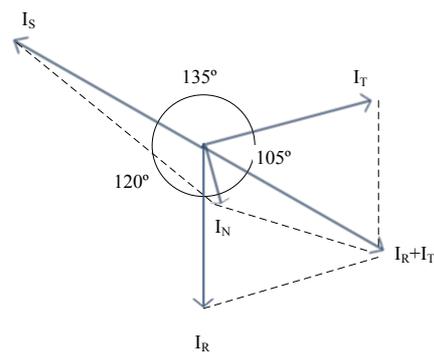


Gambar 1 Vektor Diagram Arus Keadaan Beban Seimbang (Badaruddin, 2012) [6]

- 1) Ketiga vektor arus/tegangan sama besar, 2) ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain (Pursito, 2013:3). [7]

Sedangkan beban dikatakan berada dalam keadaan tidak seimbang adalah ketika berada pada posisi berikut ini.

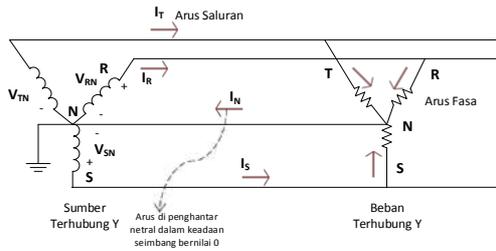
- 2.) Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain, 2) ketiga vektor tidak sama besar dan membentuk sudut 120° satu sama lain, 3) ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain (Badaruddin, 2012:10). [6]



Gambar 2. Vektor Diagram Arus Keadaan Beban Tak Seimbang (Badaruddin, 2012)[6]

E. Arus Netral Akibat Beban Tak Seimbang

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat (R,S,T dan N) [7]. Arus netral ini akan muncul jika kondisi beban tidak seimbang dan karena adanya arus harmonisa akibat beban non linear.



Gamabr 3. Sistem Distribusi dengan Arus Netral Akibat Beban Tak Seimbang (Suhadi,2008) [4]

Berikut adalah persamaanya:

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 \quad (1)$$

$$I_S = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (2)$$

$$I_T = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (3)$$

Dengan tiga langkah yang dijabarkan dalam menentukan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol terlebih dahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga didapatkan juga :

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_R + a I_S + a^2 I_T) \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_R + a^2 I_S + a I_T) \quad (5)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) \quad (6)$$

Dengan:

$$I_1 = \text{Arus urutan positif (A)}$$

$$I_2 = \text{Arus urutan negatif (A)}$$

$$I_0 = \text{Arus urutan nol (A)}$$

$$a = 120^\circ$$

Pada komponen simetris simbol a dipergunakan untuk menunjukkan operator yang menimbulkan suatu perputaran sebesar 120° dengan arah yang berlawanan dengan arah perputaran jarum jam [15]. Operator semacam ini adalah bilangan kompleks yang besarnya satu dan sudutnya 120° dan difenisikan sebagai berikut:

$$a = 1 \angle 120^\circ \text{ atau } a = -0,5 + j0,866$$

Rugi-rugi daya listrik pada sistem distribusi dipengaruhi beberapa faktor yang antara lain faktor konfigurasi dari sistem jaringan distribusi, transformator, kapasitor, isolasi dan rugi – rugi daya listrik. Jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi daya menjadi panas karena pada penghantar tersebut terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat pada ujung saluran distribusi primer dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta V = I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) L \quad (7)$$

$$P = 3 I^2 \cdot R \cdot L \quad (8)$$

Dengan:

I = Arus yang mengalir per fasa (Ampere)

R = Resistansi saluran per fasa (Ohm/km)

X = Reaktansi saluran per fasa (Ohm/km)

$\cos \varphi$ = Faktor daya beban (0,85)

L = Panjang saluran (km)

Pemilihan jenis kabel yang akan digunakan pada jaringan distribusi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan dari suatu sistem tenaga listrik karena dapat memperkecil rugi-rugi daya.

F. Faktor Ketidakseimbangan Beban

Apabila impedansi Z_R , Z_S , dan Z_T tidak sama maka nilai arus-arus I_R , I_S , dan I_T tidak sama, sehingga tegangan V_R , V_S , dan V_T tidak sama pula. Nilai impedansi dapat diperoleh jika nilai tegangan dan arus diketahui dan dapat dirumuskan sebagai berikut: (12)

$$Z = \frac{V}{I} \quad (9)$$

Perbandingan antara nilai komponen urutan negatif dengan komponen urutan positif disebut faktor ketidakseimbangan beban (*unbalance factor*) atau dapat disingkat dengan F [13].

Apabila data yang diketahui merupakan nilai tegangan, maka faktor ketidakseimbangan beban dinyatakan berdasarkan perbandingan antara tegangan urutan negatif dengan tegangan urutan positif, yaitu:

$$F_K = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (10)$$

Apabila data yang diketahui merupakan nilai arus, maka faktor ketidakseimbangan beban dinyatakan dengan berdasarkan perbandingan antara arus urutan negatif dengan arus urutan positif, yaitu:

$$F_K = \frac{|I_2|}{|I_1|} \quad (11)$$

Dengan :

F_K = Faktor ketidakseimbangan beban

V_1 = Tegangan urutan negatif (Volt)

V_2 = Tegangan urutan positif (Volt)

I_1 = Arus urutan positif (Ampere)

I_2 = Arus urutan negatif (Ampere)

Pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat terdapat komponen utama urutan nol, sehingga untuk menentukan faktor ketidakseimbangan beban, maka komponen urutan nol tersebut dihilangkan.

G. Tarif Daya Listrik

Tarif dasar listrik atau biasa disingkat TDL, adalah tarif yang boleh dikenakan oleh pemerintah untuk para pelanggan PLN. Berdasarkan Peraturan Menteri (Permen) Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) nomor 28/2016 [12], berikut adalah tarif tenaga listrik yang berlaku dan tabel tarif tenaga listrik bersubsidi dan non subsidi:

Tabel 1 Tabel Tarif Daya Listrik

No	Gol Tarif	Batas Daya	Reguler		Prabayar (Rp/kWh)
			Biaya Beban (Rp/kVA /Bulan)	Biaya Pemakaian (Rp/kWh)	
1	R-1/TR	900VA-RTM	*)	1.352,00	1.352,00
2	R-1/TR	1.300 VA	*)	1.467,28	1.467,28
3	R-1/TR	2.200 VA	*)	1.467,28	1.467,28
4	R-2/TR	3.500 s.d. 5.500 VA	*)	1.467,28	1.467,28
5	R-3/TR	6.600 VA ke atas	*)	1.467,28	1.467,28
6	B-2/TR	6.600 s.d. 200 kVA	*)	1.467,28	1.467,28
7	B-3/TM	Diatas 200 kVA	**)	Blok WBP = Kx 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78 kVArh = 1.114,74 ****)	-
8	I-3/TM	Diatas 200 kVA	**)	Blok WBP = Kx 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78 kVArh = 1.114,74 ****)	-
9	I-4/TT	30.000 kVA keatas	***)	Blok WBP dan Blok LWBP = 996,74 kVArh = 996,74 ****)	-
10	P-1/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.467,28	1.467,28
11	P-2/TM	Diatas 200 kVA	**)	Blok WBP = Kx 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78 kVArh = 1.114,74 ****)	-
12	P-3/TR		*)	1.467,28	1.467,28
13	L/TR, TM, TT		-	1.644,52	-

Catatan:
 *) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 RM1 = 40 (Jam Nyala) x Daya Tersambung (kVA) x Biaya Pemakaian
 **) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 RM2 = 40 (Jam Nyala) x Daya Tersambung (kVA) x Biaya Pemakaian LWBP.
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
 ***) Diterapkan Rekening Minimum (RM):
 RM3 = 40 (Jam Nyala) x Daya Tersambung (kVA) x Biaya Pemakaian WBP dan LWBP.
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
 ****) Biaya kelebihan pemakaian daya reaktif (kVArh) dikenakan dalam hal faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,85 (delapan puluh lima per seratus)
 K Faktor perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem kelistrikan setempat (1,4 < K < 2), ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara.
 WBP : Waktu Beban Puncak
 LWBP : Luar Waktu Beban Puncak

Sumber :Peraturan Menteri (Permen) Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)

Sehingga dalam perhitungan kerugian energi listrik dapat menggunakan persamaan berikut [10]:

$$W = P \times t \quad (12)$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = \left(\frac{w}{1000} \right) \times TDL \quad (13)$$

Dengan:

- W = Rugi Energi Listrik (Watt Jam)
- P = Rugi – rugi daya listrik (Watt)
- t = Lama pemakaian (jam)
- $\frac{w}{1000}$ = Pemakaian Listrik (kWh)
- TDL = Tarif Dasar Listrik (Rp / kWh)

III. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, penyulang Toddopuli pada GI Panakukkang menjadi salah satu objek dengan terfokus pada data pembebanan trafo didistribusi pada tahun 2019 Berikut *flowchartnya*:



Gambar 4. Flowchart Prosedur Kegiatan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Menentukan Beban Tak Seimbang pada Trafo Distribusi

Karena banyaknya jumlah gardu trafo yang ada pada penyulang Toddopuli maka diambil beberapa gardu trafo saja yang tercatat oleh ULP Panakukkang pernah mengalami gangguan ketidakseimbangan beban selama tahun 2019 yaitu dari bulan Januari – September 2019. Dan diperoleh 4 buah gardu trafo yang mengalami gangguan yaitu GT.PTP037, GT.PTP022, GT.PTP028 dan GT.PTP021. Berikut datanya:

Tabel 2 Data Gardu Penyulang Toddopuli yang Mengalami Gangguan

No	Tanggal Gangguan	Kode Gardu	Alamat/Lokasi Gardu	Kapasitas Trafo/S (kVA)	Arus (A)			V F-F
					I _R	I _S	I _T	
1	Mei 2019	GT.PTP 037	Jl. Pamdang	160	184	192	242	398
2	Mei 2019	GT.PTP 022	Jl. Toddopuli	315	468	281	292	398
3	Mei 2019	GT.PTP 028	Jl. Kanfer	250	313	158	160	398
4	September 2019	GT.PTP 021	Jl. Toddopuli 10	160	76	123	172	398

B. Menghitung Nilai Faktor Ketidakseimbangan Beban

Dengan mengambil satu sampel trafo yaitu GT. PTP028 dan dengan menggunakan persamaan (4), (5) dan (11) maka berikut penyelesaiannya:

Tabel 3. Data Pembebanan Trafo GT.PTP028

No.	Kode Gardu	Alamat/Lokasi Gardu	Kapasitas Trafo/S (kVA)	Arus (A)			Tegangan V (Volt) F-F
				I _R	I _S	I _T	
1	GT.PTP028	Jl. Kanfer Depan Kampus AMKOP	250	313	158	160	398

Diketahui: $I_R = 313 \text{ A}$ $I_N = 160 \text{ A}$
 $I_S = 158 \text{ A}$ $V = 398 \text{ Volt}$
 $I_T = 160 \text{ A}$

Maka $I_1 = \frac{1}{3} (I_R + aI_S + a^2I_T)$
 $I_1 = \frac{1}{3} (313 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 158 \angle 240^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 \cdot 160 \angle 120^\circ) \text{ A}$
 $I_1 = \frac{1}{3} (313 \angle 0^\circ + 158 \angle 360^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 160 \angle 120^\circ) \text{ A}$
 $I_1 = \frac{1}{3} (313 \angle 0^\circ + 158 \angle 360^\circ + 160 \angle 360^\circ) \text{ A}$
 $I_1 = \frac{1}{3} (313 + 158 + 160) \text{ A}$
 $I_1 = \frac{631}{3} \text{ A}$
 $I_1 = 210,33 \text{ A}$
 $I_2 = \frac{1}{3} (I_R + a^2I_S + aI_T) \text{ A}$
 $I_2 = \frac{1}{3} (313 \angle 0^\circ + (1 \angle 120^\circ)^2 \cdot 158 \angle 240^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 160 \angle 120^\circ) \text{ A}$
 $I_2 = \frac{1}{3} (313 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 158 \angle 240^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 160 \angle 120^\circ) \text{ A}$
 $I_2 = \frac{1}{3} (313 \angle 0^\circ + 158 \angle 120^\circ + 160 \angle 240^\circ) \text{ A}$
 $I_2 = \frac{1}{3} (154,01 \angle -0,64^\circ) \text{ A}$
 $I_2 = 51,336 \angle -0,64^\circ \text{ A}$

Dengan menggunakan persamaan (11) halaman. Maka harga faktor ketidakseimbangan (F_K) beban pada GT.PTP028 dapat diketahui:

$$F_K = \frac{[I_2]}{[I_1]}$$

$$F_K = \frac{[51,336]}{[210,33]} \text{ A}$$

$$F_K = 2,44 \text{ A}$$

C. Mengidentifikasi Nilai Jatuh dan Rugi-Rugi Daya pada Keadaan Tak Seimbang

Dengan menggunakan persamaan (7) dan (8) dengan sampel yang sama pada GT.PTP028 maka berikut penyelesaiannya [10]:

a. Nilai Jatuh Tegangan

$$\Delta V = I (R \cos \phi + X \sin \phi) L$$

$$\Delta V = 160 ((0,457 \cdot 0,85) + (0,35 \cdot 0,52)) \cdot 0,6 \text{ Volt}$$

$$\Delta V = 96 (0,38 + 0,18) \text{ Volt}$$

$$\Delta V = 53,76 \text{ Volt}$$

Sesuai SPLN No. 72 Tahun 1987 [14], dimana jatuh tegangan yang diperbolehkan dalam penyaluran distribusi hanya boleh sebesar +5% dan -10%, sehingga nilai standar jatuh tegangan dalam presentase:

$$(\Delta V\%) = \frac{\Delta V}{V} \times 100\%$$

$$(\Delta V\%) = \frac{53,76}{220} \times 100\%$$

$$(\Delta V\%) = 24,43 \%$$

b. Rugi-Rugi Daya pada Penghantar Netral

$$P_n = I_n^2 \cdot R_n \cdot L$$

$$P_n = (160)^2 \cdot 0,599 \cdot 0,6 \text{ watt}$$

$$P_n = 9200 \text{ watt}$$

$$P_n = 9,20 \text{ kW}$$

c. Rugi-Rugi Daya pada Jaringan

$$P = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L$$

$$P = 3 \cdot (210,33)^2 \cdot 0,457 \cdot 0,6 \text{ watt}$$

$$P = 36390,761 \text{ watt}$$

$$P = 36,39 \text{ kW}$$

Tabel 4. Tabel Perhitungan Faktor Ketidakseimbangan dan Rugi-Rugi Daya pada Penyulang Toddopuli sebelum Penyeimbangan Beban

No.	Kode Gardu	Arus (A)			%Ketidakseimbangan Beban	Fk (A)	ΔV (V)	P (kW)	Pn (kW)
		I_R	I_S	I_T					
1	GT.PTP 037	184	192	242	28,16 %	0,88	22,84	34,90	1,66
2	GT.PTP 022	468	281	292	53,89 %	1,74	66,19	99,04	13,94
3	GT.PTP 028	313	158	160	73,69 %	2,44	53,76	36,39	9,20
4	GT.PTP 021	76	123	172	28,10 %	2,24	21,168	12,58	1,42

D. Mengidentifikasi Nilai Jatuh dan Rugi-Rugi Daya pada Keadaan Seimbang

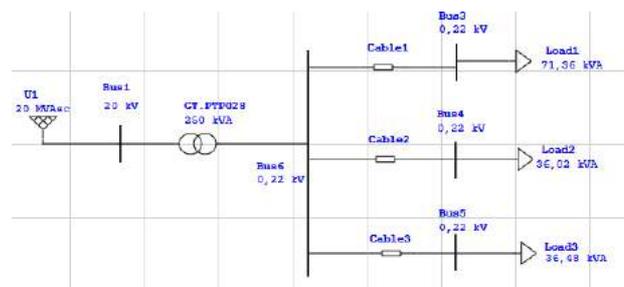
Dengan cara yang sama seperti poin B dan C maka berikut adalah hasil perhitungannya setelah penyeimbangan beban:

Tabel 5. Tabel Perhitungan Faktor Ketidakseimbangan dan Rugi-Rugi Daya pada Penyulang Toddopuli Setelah Penyeimbangan Beban

No.	Kode Gardu	Arus (A)			%Ketidakseimbangan Beban	Fk (A)	ΔV (V)	P (kW)	Pn (kW)
		I_R	I_S	I_T					
1	GT.PTP 037	184	205	210	13,02 %	0,39	8,02	32,79	0,20
2	GT.PTP 022	383	317,3	320	17,06%	0,63	21,63	95,14	1,49
3	GT.PTP 028	240	184,3	193,4	19,05%	0,83	17,38	34,87	0,96
4	GT.PTP 021	120	100	132	18,00%	0,79	9,40	11,32	0,28

E. Mengitung Nilai Rugi-Rugi Daya dengan ETAP 16.0

Dengan menggunakan data pada sampel yang sama seperti sebelumnya maka berikut adalah diagram satu garis yang muncul pada simulasi ETAP 16.0 :



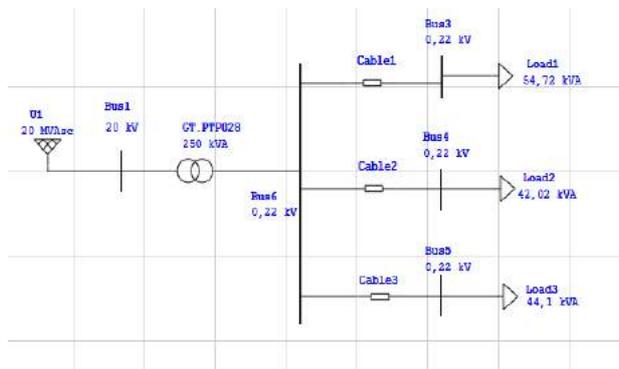
Gambar 5 Single Line Diagram GT.PTP028 sebelum Penyeimbangan

Branch Losses Summary Report

Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	
GT.PTP028	0.071	0.013	-0.070	-0.013	0.5	0.7	100.0	99.2	0.89
Cable1	-0.016	0.000	0.033	0.007	16.3	7.5	48.0	99.2	51.23
Cable2	-0.010	0.000	0.019	0.003	8.8	2.5	53.5	99.2	45.74
Cable3	-0.010	0.000	0.019	0.003	8.7	2.6	53.1	99.2	46.06
					34.2	13.3			

Gambar 6. Hasil Simulasi pada GT.PTP028 sebelum Penyeimbangan

Kemudian setelah penyeimbangan beban bentuk SLD dan hasilnya adalah sebagai berikut:



Gambar 7. Single Line Diagram GT.PTP028 setelah Penyeimbangan

Branch Losses Summary Report

Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	
GT.PTP028	0.070	0.012	-0.070	-0.012	0.5	0.7	100.0	99.2	0.79
Cable1	-0.016	0.000	0.029	0.006	12.7	5.7	54.5	99.2	44.70
Cable2	-0.010	0.000	0.020	0.003	10.0	3.0	49.7	99.2	49.30
Cable3	-0.010	0.000	0.021	0.003	10.5	3.1	48.5	99.2	50.69
					33.7	12.5			

Gambar 8. Hasil Simulasi pada GT.PTP028 setelah Penyeimbangan

Tabel 6. Tabel Perbandingan Nilai Rugi-Rugi Daya pada Perhitungan Manual dan Simulasi ETAP 16.0

No	Kode Gardu	Alamat/Lokasi Gardu	Sebelum Penyeimbangan		Setelah Penyeimbangan	
			Rugi-Rugi Daya/P (kW)		Rugi-Rugi Daya/P (kW)	
			Manual	ETAP 16.0	Manual	ETAP 16.0
1.	GT.PT P037	Jl. Pandang	34,90	33,90	32,79	32,1
2.	GT.PT P022	Jl.Toddopuli	99,04	97,0	95,14	93,9
3.	GT.PT P028	Jl. Kanfer Depan Kampus AMKOP	36,39	34,2	34,87	33,7
4.	GT.PT P021	Jl.Toddopuli 10	12,58	12,8	11,32	11,3

F. Menghitung Nilai Kerugian Energi Listrik pada Keadaan Tak Seimbang

Dengan menggunakan persamaan (12) dan (13) maka penyelesaiannya adalah sebagai berikut dengan mengambil sampel yang sama yaitu pada GT. PTP028:

$$W = P \times t = 97,04 \text{ kW} \times 24 \text{ jam} = 2328,96 \text{ kWh}$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = \left(\frac{w}{1000} \right) \times TDL$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = 2328,96 \text{ kWh} \times \text{Rp. } 1174,58 / \text{kWh}$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = \text{Rp. } 2.735.549,83$$

Untuk nilai pada gardu lainnya terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 7. Tabel Nilai Kerugian Energi Listrik Sebelum Penyeimbangan Beban pada Penyulang Toddopuli

No.	Kode Gardu	P (kW)	W (kWh)	Kerugian Daya Listrik
1	GT.PT P037	93,08	2233,92	Rp. 2.623.917,75
2	GT.PT P022	95,74	2297,76	Rp. 2.698.902,94
3	GT.PT P028	97,04	2328,96	Rp. 2.735.549,83
4	GT.PT P021	33,54	804,96	Rp. 945.489,91

G. Menghitung Nilai Kerugian Energi Listrik pada Keadaan Seimbang

Dengan menggunakan persamaan (12) dan (13) maka penyelesaiannya adalah sebagai berikut dengan mengambil sampel yang sama yaitu pada GT. PTP028:

$$W = P \times t = 34,87 \text{ kW} \times 24 \text{ jam} = 836,88 \text{ kWh}$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = \left(\frac{w}{1000} \right) \times TDL$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = 836,88 \text{ kWh} \times \text{Rp. } 1174,58 / \text{kWh}$$

$$\text{Kerugian Energi Listrik (Rp)} = \text{Rp. } 982.982,51$$

Untuk nilai pada gardu lainnya terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 8. Tabel Nilai Kerugian Energi Listrik Setelah Penyeimbangan Beban pada Penyulang Toddopuli

No.	Kode Gardu	P (kW)	W (kWh)	Kerugian Daya Listrik
1	GT.PTP037	31,79	786,96	Rp. 924.347,47
2	GT.PTP022	95,14	2283,36	Rp. 2.681.988,98
3	GT.PTP028	34,87	836,88	Rp. 982.982,51
4	GT.PTP021	11,32	271,68	Rp. 319.109,89



Gambar 9 Perbandingan Nilai Kerugian Energi Listrik pada Penyulang Toddopuli

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis mengenai ketidakseimbangan beban trafo distribusi 20 kV pada Penyulang Toddopuli, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari perhitungan yang telah dilakukan maka diperoleh ada 4 gardu trafo distribusi yang mengalami ketidakseimbangan beban. Hal ini dibuktikan dengan besarnya nilai Fk (Faktor Ketidakseimbangan) yang melebihi standar. Yaitu GT.PTP037 sebesar 0,88, GT.PTP022 sebesar 1,74, GT.PTP028 sebesar 2,44, dan GT.PTP021 sebesar 2,24.
2. Pengaruh dari adanya ketidakseimbangan beban adalah munculnya arus di netral trafo. Sehingga arus yang mengalir ini menyebabkan terjadinya rugi-rugi daya. Dimana nilai rugi-rugi daya terbesar adalah 99,04 kW pada GT.PTP022 dengan rugi daya netral sebesar 13,94 kW.
3. Dari nilai rugi-rugi daya yang telah dihitung maka diperoleh total daya yang timbul adalah sebesar 319,4 kW dengan kerugian energi listrik yang ditimbulkan sebesar Rp.9.003.860,00. Setelah diseimbangkan maka nilainya turun sebesar 45,48% yaitu menjadi 174,12 kW dengan kerugian energi listrik sebesar Rp. 4.908.429,00. Dan selisih rugi-rugi daya terbesar antara perhitungan manual dan simulasi ETAP 16.0 yaitu terdapat di GT.PTP022 dengan nilai sebesar 1,24.

REFERENSI

- [1] Al-Badi, A., A. Elmoudi, I. M., Al-Wahaibi, A., Al-Ajmi, H., & Al-Bulushi, M. (2011). Losses Reduction in Distribution Transformers. International Multi Conference of Engineers and Computer Sciences.
- [2] Badaruddin. 2012. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon. Laporan Penelitian Internal. Jakarta: Universitas Mercu Buana.

- [3] Suhadi dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Buku Ajar SMK. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
- [4] Suhadi dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid III. Buku Ajar SMK. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- [5] Suswanto, Daman. 2009. Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Untuk Mahasiswa Teknik Elektro. Padang: Universitas Negeri Padang.
- [6] Badaruddin. 2012. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon. Laporan Penelitian Internal. Jakarta: Universitas Mercu Buana.
- [7] Pursito, dan Iwa Garniwa MK. 2013. Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Pembebanan di Kawat Netral dan Rugi Daya Transformator. *Jurnal Teknik Elektro*, (Online) (<http://lib.ui.ac.id>) (diakses 07 Oktober 2017).
- [8] Kadir, Abdul. 2006. Distribusi dan Utilasi Tenaga Listrik. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- [9] Khoriyah, Siti. 2018. Analisis Susut Daya dan Energi pada Jaringan Distribusi di Transformator Induk Beringin Penyulang BRG-4 Menggunakan Software ETAP 12.6.0. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [10] SPLN No.64 Tahun 1985.
- [11] Hutauruk, T.S. 1985. Transmisi Daya Listrik. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [12] Peraturan Menteri (Permen) Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) nomor 28.2016.
- [13] Sangli, Yulianus. 2009. Pembebanan Tidak Seimbang pada Transformator. *Jurnal Teknik Elektro*, (Online), Adiwidia Edisi Juli 2009, No.2 (<https://medianeliti.com>) (diakses 12 Maret 2018).
- [14] SPLN No. 72 tahun 1987
- [15] William, D dan Stevenson, Jr. 1983. Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat. Dialih bahasakan oleh Kamal Kadir. Bandung: Penerbit Erlangga.