

Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya (*Losses*) Dengan Digsilent Power Factory di PT. PLN (Persero) ULP Ngunut

Arifran Bima Prayoga

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : arifran19038@mhs.unesa.ac.id

Bambang Suprianto

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : bambangsuprianto@unesa.ac.id

Abstrak

Suatu pembebanan yang tidak seimbang merupakan hal yang pasti terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik. Suatu pembebanan pada transformator distribusi yang tidak seimbang tentunya mengakibatkan munculnya arus pada netral transformator. Timbulnya arus netral mengakibatkan bertambahnya nilai rugi daya (*losses*) pada jaringan tersebut. Sehingga daya yang disalurkan oleh PT. PLN (Persero) tidak sebanding dengan daya yang terjual. Nilai rugi daya yang tinggi pastinya akan sangat merugikan pihak penyedia listrik yaitu PT. PLN (Persero). Simulasi dengan *software Digsilent Power Factory* dilakukan untuk mengetahui trafo yang mengalami ketidakseimbangan beban dan bagaimana pengaruhnya terhadap rugi daya. Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) ULP Ngunut pada Penyulang Ngunut. Hasil simulasi ketidakseimbangan beban menunjukkan persentase ketidakseimbangan terbesar terdapat pada trafo ED127 yaitu 42,42% dengan persentase rugi daya mencapai 29,20%. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, persentase ketidakseimbangan beban pada trafo ED127 turun menjadi 4,81% dengan persentase rugi daya pada 0,33%.
Kata Kunci: Ketidakseimbangan Beban, Rugi Daya, *Software Digsilent Power Factory*.

Abstract

An unbalanced loading is a sure thing to happen in an electric power distribution system. A load on an unbalanced distribution transformer will of course result in a current appearing in the neutral of the transformer. The emergence of neutral currents results in an increase in the value of power losses (*losses*) in the network. So that the power supplied by PT. PLN (Persero) is not worth the power sold. The high power loss value will certainly be very detrimental to the electricity provider, namely PT PLN (Persero). Simulations with Digsilent Power Factory software were carried out to find out transformers that experience load imbalance and how they affect power losses. This research was conducted at PT. PLN (Persero) ULP Ngunut on Ngunut Feeders. The load unbalance simulation results show that the largest percentage of unbalance is found in the ED127 transformer, namely 42.42% with a percentage of power loss reaching 29.20%. After load balancing, the percentage of load unbalance on the ED127 transformer dropped to 4.81% with a power loss percentage of 0.33%.

Keywords: Load Imbalance, Losses, *Digsilent Power Factory Software*.

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik juga dapat disebut sebagai gabungan dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi dan beban yang saling berhubungan dan membentuk suatu kesatuan (Sogen, 2018). Sistem pembangkitan adalah tahap pertama dimana tenaga listrik dibangkitkan dan kemudian disalurkan ke sistem transmisi. Setelah ditransmisikan dan disalurkan kepada gardu induk sebagai pusat beban, maka akan diteruskan ke sistem distribusi kepada pelanggan. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, transformator distribusi sangat berperan penting untuk mengubah tegangan transmisi 20KV menjadi 380V untuk pelanggan 3 fasa dan 220V untuk pelanggan 1 fasa yang kemudian didistribusikan kepada pelanggan.

Dalam proses distribusi sistem tenaga listrik tersebut, sering terjadi pembagian beban yang kurang merata sehingga mengakibatkan beban pada fasa R, S, dan T tidak seimbang. Suatu pembebanan yang tidak seimbang merupakan hal yang pasti terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik. Hal ini terjadi karena banyak faktor, selain karena penggunaan listrik oleh konsumen yang berbeda – beda, juga karena penempatan pembebanan yang pincang. Suatu pembebanan pada transformator distribusi yang tidak seimbang tentunya mengakibatkan munculnya arus pada netral transformator (Dwi, 2019).

Timbulnya arus netral mengakibatkan bertambahnya nilai rugi daya (*losses*) pada jaringan tersebut. Sehingga daya yang disalurkan oleh PT. PLN (Persero) tidak sebanding dengan daya yang terjual. Nilai rugi daya yang

tinggi pastinya akan sangat merugikan pihak penyedia listrik yaitu PT.PLN (Persero).

Sehingga diperlukan adanya analisis yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi terhadap rugi daya akibat munculnya arus netral. Hasil dari analisa tersebut tentunya dapat digunakan sebagai solusi untuk menurunkan nilai rugi daya akibat arus netral.

Ketidakseimbangan Beban

Pada semua transformator distribusi, ketidakseimbangan beban pasti terjadi karena beberapa faktor, salah satu yang menjadi faktor utama adalah karena perbedaan penggunaan tenaga listrik oleh konsumen antar jurusan distribusi. Faktor kedua yang menjadi penyebab ketidakseimbangan beban adalah penempatan pembebanan yang pincang antar jurusan distribusi. Suatu pembebanan transformator dinyatakan seimbang yaitu saat :

1. ketiga fasa nilai arus dan tegangannya sama besar.
2. ketiga vektor saling membentuk sudut 120° .

Secara matematis, keadaan pembebanan transformator dalam keadaan seimbang dinyatakan dalam Persamaan (1).

$$I_N = I_R + I_S + I_T = 0 \quad (1)$$

Di mana :

- I_N : Arus netral transformator (A)
- I_R : Arus pada fasa R transformator (A)
- I_S : Arus pada fasa S transformator (A)
- I_T : Arus pada fasa T transformator (A)

Sedangkan, pembebanan transformator dinyatakan tidak seimbang saat dimana salah satu atau kedua syarat tersebut tidak terpenuhi. Beberapa kemungkinan keadaan tidak seimbang yaitu :

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak saling membentuk sudut 120° .
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi saling membentuk sudut 120° .
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak saling membentuk sudut 120° .

Persentase ketidakseimbangan beban pada transformator yang diizinkan yaitu sebesar 5% berdasarkan IEC dan sebesar 5% - 20% berdasarkan IEEE std446 - 1995.

Sedangkan berdasarkan SPLN D5 004 - 1 : 2012, standar persentase ketidakseimbangan beban sebesar 2%. Apabila persentase ketidakseimbangan beban melebihi nilai yang diizinkan, maka penyeimbangan beban seharusnya dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi rugi daya (*losses*) pada jaringan distribusi tenaga listrik.

Rugi Daya (*Losses*) Akibat Arus Netral Transformator

Rugi daya atau *Losses* merupakan kerugian yang dialami pada sistem distribusi tenaga listrik. Berdasarkan penyebabnya, rugi daya (*Losses*) terbagi menjadi dua, yaitu rugi daya teknis dan rugi daya non teknis. Rugi daya teknis merupakan rugi daya yang disebabkan oleh kondisi tidak normal pada peralatan di jaringan distribusi. Rugi daya teknis juga bisa terjadi karena karakteristik beban yang induktif dan kapasitif (Syaroni, 2019). Sedangkan, rugi daya non teknis disebabkan oleh beberapa faktor seperti human error, pencurian listrik oleh konsumen, dan bencana alam. Salah satu faktor terjadinya rugi daya adalah akibat dari ketidakseimbangan pembebanan pada transformator. Suatu transformator yang pembebanannya tidak seimbang akan menimbulkan arus di netral transformator. Mengalirnya arus di netral transformator ini menyebabkan rugi daya. Berdasarkan SPLN No. 72 Tahun 1987, rugi daya atau *losses* yang diizinkan dalam suatu sistem distribusi tenaga listrik adalah sebesar 10%.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Tahapan Penelitian

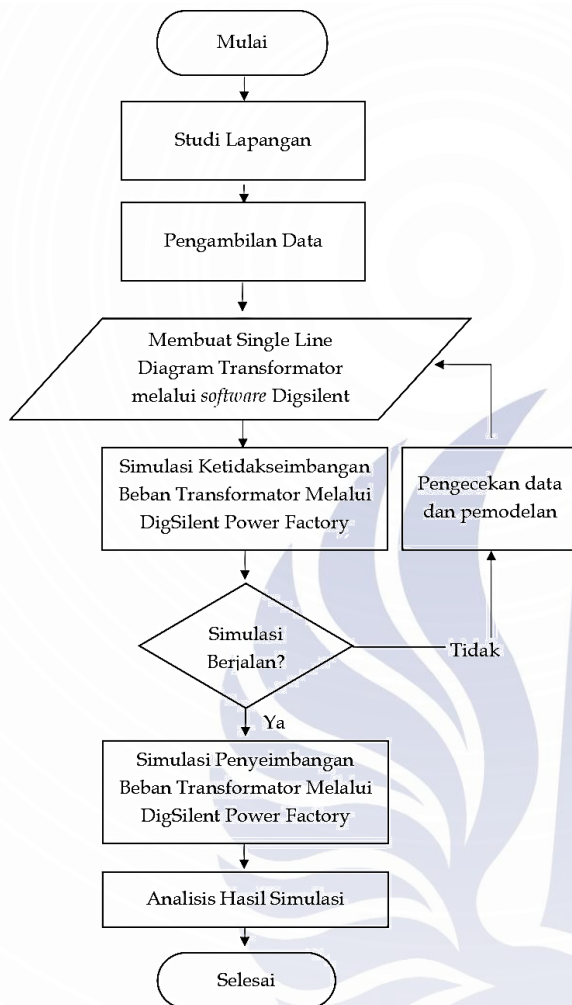
Jenis penelitian ini adalah penelitian studi kasus dengan pendekatan penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang dilakukan dengan melakukan pengamatan dan pengambilan data pada objek dengan data yang akan disajikan dengan angka. Metode yang digunakan yaitu dengan melakukan simulasi melalui *software Digsilent Power Factory* yang bertujuan untuk menghitung parameter – parameter yang dibutuhkan untuk menentukan persentase ketidakseimbangan beban suatu transformator dan persentase nilai rugi daya yang dialami.

Simulasi dilakukan agar proses analisis pada penelitian ini lebih efisien untuk mengolah data dengan jumlah yang banyak dan juga sebagai upaya mengantisipasi adanya human error pada saat perhitungan manual. Simulasi melalui *software Digsilent Power Factory* dilakukan sebanyak dua (2) kali yaitu analisis ketidakseimbangan beban berdasarkan data riil di lapangan dan simulasi penyeimbangan beban berdasarkan data pada simulasi sebelumnya. Hasil dari kedua simulasi tersebut akan dibandingkan dan kemudian dapat ditarik kesimpulan. Secara umum, alur penelitian digambarkan pada diagram alir penelitian pada Gambar 2.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data merupakan metode yang digunakan penulis untuk mengumpulkan data dalam sebuah penelitian. Dari penelitian ini, pengumpulan data dilakukan dengan studi kasus di PT. PLN (Persero) ULP Ngunut dimana, akan dilakukan beberapa metode

pengumpulan data dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

a. Wawancara

Wawancara dilakukan dengan narasumber yang menangani dan menguasai permasalahan yang relevan dengan penelitian ini. Sehingga dapat membantu proses observasi di lapangan dan pada saat proses pengolahan data pada penelitian ini.

b. Observasi

Observasi dilakukan dengan melakukan pengukuran arus dan tegangan pada beberapa transformator distribusi di penyulang Ngunut yang ada di wilayah kerja PT. PLN (Persero) ULP Ngunut secara langsung.

Adapun rincian data yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Data supply dari GI Tulungagung dan GI Tulungagung New berupa :
 - a. Daya nyata (W)
 - b. Tegangan (V)
 - c. Frekuensi (Hz)

- b. Data transformator distribusi pada Penyulang Ngunut yang ada di wilayah kerja PT. PLN (Persero) ULP Ngunut.

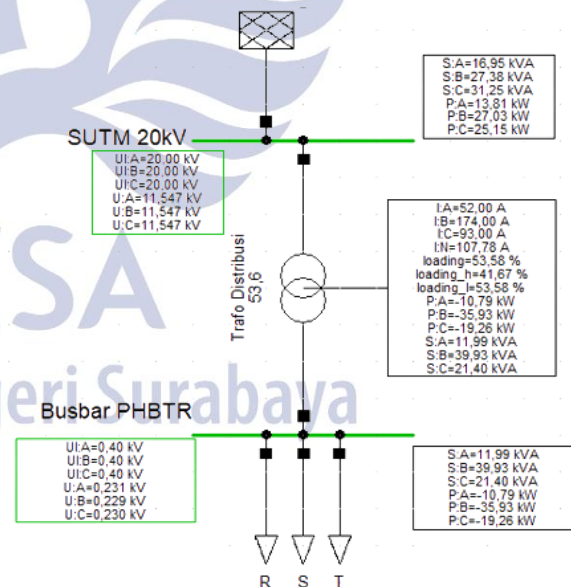
- a. Data Teknis Transformator
- b. Data Beban Transformator

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan *software Digsilent Power Factory*. Setelah semua data parameter yang dibutuhkan terkumpul, maka data akan diolah dengan tahapan sebagai berikut :

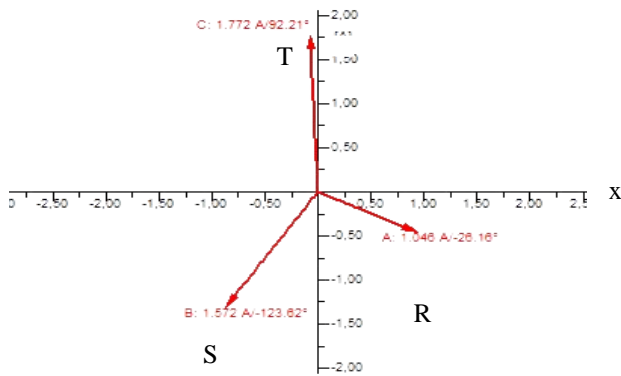
1. Pemodelan Single Line Diagram

Proses analisis pada penelitian ini dimulai dengan membuat pemodelan di dalam *software Digsilent Power Factory* sesuai dengan Single Line Diagram (SLD) pada transformator distribusi. Pemodelan pada *software Digsilent Power Factory* pada penelitian ini mencangkup sumber dari gardu induk, bus pada jaringan distribusi 20kV, dan gardu distribusi beserta beban yang terhubung. Pemodelan dari 39 gardu distribusi yang ada di penyulang Ngunut PT. PLN (Persero) ULP Ngunut diwakilkan dengan 1 pemodelan gardu distribusi yang nantinya data parameternya akan disesuaikan dengan data yang didapatkan saat observasi. Pemodelan dari gardu distribusi pada *software Digsilent Power Factory* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Single Line Diagram Pemodelan Gardu Distribusi.

Digsilent Power Factory juga dapat menampilkan vektor diagram arus pada pemodelan yang sudah dibuat. Vektor diagram arus hasil dari simulasi pada *Digsilent Power Factory* ditunjukkan pada Gambar 4.



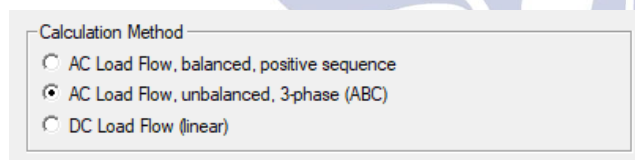
Gambar 4. Vektor Diagram Arus pada Digsilent Power Factory.

2. Memasukkan Data

Setelah mendapatkan semua data parameter dari total 39 transformator distribusi di Penyulang Ngunut PT. PLN (Persero) ULP Ngunut, maka data akan dimasukkan pada pemodelan gardu distribusi di *Digsilent Power Factory*. Data parameter transformator pada transformator di *software Digsilent Power Factory*.

3. Analisis Ketidakseimbangan Beban

Analisis dilakukan menggunakan *software Digsilent Power Factory* dengan menjalankan *Unbalanced Load Flow* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Unbalanced Load Flow Digsilent Power Factory.

Kemudian output parameter data yang ditampulkan dapat dipilih sesuai dengan kebutuhan penulis sebagai berikut :

- Persentase pembebanan transformator
- Daya aktif pada transformator
- Rugi daya pada sisi netral transformator
- Vektor diagram arus transformator

4. Simulasi Penyeimbangan Beban

Setelah dilakukan analisis ketidakseimbangan beban, maka selanjutnya penulis akan melakukan simulasi penyeimbangan beban pada masing – masing transformator sesuai dengan langkah sebelumnya, namun dengan input parameter arus mengacu pada arus rata – rata transformator tersebut. Simulasi penyeimbangan beban ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui apakah jika nilai persentase

ketidakseimbangan beban pada transformatur turun, nilai persentase rugi dayanya juga turun.

5. Penyajian Data dan Menarik Kesimpulan

Setelah semua tahapan dilakukan, maka tahap terakhir adalah penyajian data dan penarikan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Transformator Distribusi Penyulang Ngunut

Pada Tabel 1 menunjukkan data 42 unit transformator distribusi 3 fasa yang aktif beroperasi di Penyulang Ngunut.

Tabel 1. Tabel Data Transformator Distribusi di Penyulang Ngunut. (Sumber : PT. PLN (Persero) ULP Ngunut, 2023)

Nama Aset	Konstruksi Aset	Kapasitas Trafo (KVA)
ED027	GTT2	160
ED048	GTT1	100
ED049	GTT1	250
ED067	GTT2	200
ED068	GTT2	100
ED069	GTT1	100
ED070	GTT2	100
ED071	GTT2	250
ED072	GTT2	200
ED073	GTT2	160
ED074	GTT2	200
ED075	GTT2	50
ED076	GTT1	100
ED079	GTT2	100
ED108	GTT2	160
ED110	GTT2	250
ED127	GTT2	250
ED137	GTT2	250
ED139	GTT2	200
ED141	GTT2	160
ED168	GTT2	100
ED169	GTT1	100
ED170	GTT1	50
ED171	GTT1	160
ED172	GTT2	100
ED180	GTT2	100
ED181	GTT2	160
ED245	GTT1	50
ED286	GTT2	160
ED287	GTT2	100
ED288	GTT2	250
ED290	GTT2	160
ED300	GTT2	100
ED320	GTT1	160
ED321	GTT2	100
ED322	GTT2	100
ED323	GTT2	100
ED324	GTT2	100
ED325	GTT2	160
ED326	GTT1	160
ED327	GTT2	100
ED328	GTT2	100

Dari Tabel 1, dapat diketahui bahwa kapasitas transformator distribusi 3 fasa yang digunakan pada Penyulang Ngunut berkisar antara 50KVA – 250KVA dengan jenis konstruksi GTT (Gardu Trafo Tiang). Untuk

nilai tegangan operasi yang digunakan yaitu 20kV pada sisi primer dan 0,4kV pada sisi sekunder.

Data Beban Transformator Distribusi Penyulang Ngunut

Pada Tabel 2 menunjukkan data beban yang digunakan di Penyulang Ngunut dengan total beban sebesar 2873,8KVA. Dapat diketahui juga beban tiap trafo (KVA), arus tiap fasa, beserta persentase pembebanan pada masing – masing trafo. Dari data beban di bawah, terlihat bahwa sebagian besar trafo memiliki nilai arus antar fasa yang dalam keadaan tidak seimbang.

Tabel 2. Tabel Data Beban Transformator Distribusi di Penyulang Ngunut. (Sumber : PT. PLN (Persero) ULP Ngunut, 2023)

Nama Aset	Arus (A)			Beban Trafo (KVA)	% Pembebanan
	R	S	T		
ED027	104	171	88	86,487	54,05
ED048	74	51	102	54,873	54,87
ED049	192	160	159	125,132	50,05
ED067	206	218	121	131,526	65,76
ED068	52	49	50	35,431	35,43
ED069	136	95	92	75,085	75,09
ED070	96	66	80	57,9	57,9
ED071	127	105	138	89,225	35,69
ED072	226	201	206	148,72	74,36
ED073	176	231	175	135,773	84,86
ED074	111	140	130	87,949	43,97
ED075	39	48	41	30,099	60,2
ED076	92	34	36	39,226	39,23
ED079	86	93	87	62,861	62,86
ED108	120	201	192	121,8	76,13
ED110	61	49	54	38,305	15,32
ED127	52	174	93	77,238	30,9
ED137	56	63	61	43,685	17,47
ED139	80	97	90	64,53	32,27
ED141	128	101	118	82,161	51,35
ED168	5	12	17	7,926	7,93
ED169	38	24	53	27,054	27,05
ED170	48	39	67	40,59	81,18
ED171	111	149	117	89,644	56,03
ED172	5	4	5	3,232	3,23
ED180	67	104	83	59,628	59,63
ED181	93	124	107	77,599	48,5
ED245	40	45	46	30,783	61,57
ED286	1	2	1	0,937	0,59
ED287	77	125	56	60,893	60,89
ED288	230	188	166	137,986	55,19
ED290	133	172	163	110,333	68,96
ED300	4	3	5	2,853	2,85
ED320	164	206	117	113,392	70,87
ED321	104	66	79	58,4	58,4
ED322	60	50	67	41,962	41,96
ED323	94	67	130	67,784	67,78
ED324	98	29	56	42,118	42,12
ED325	183	163	176	121,56	75,98
ED326	114	125	121	84,97	53,11
ED327	78	117	77	64,577	64,58
ED328	46	85	45	41,564	41,56
Total (KVA) = 2.873,8 KVA					

Hal ini tentunya akan mempengaruhi besaran nilai arus pada penghantar netral trafo tersebut. Terdapat juga beberapa trafo dengan pembebanan yang melebihi 80%.

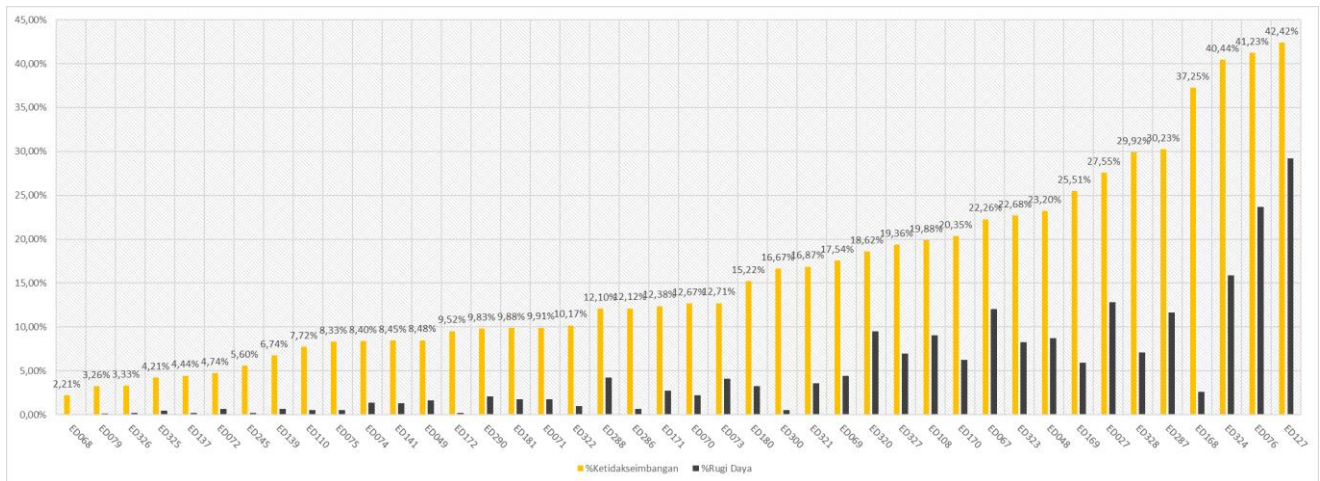
Berdasarkan SPLN no.17 tahun 1979, pembebanan trafo distribusi yaitu maksimal sebesar 90%.

Hasil Simulasi Ketidakseimbangan Beban Pada Digsilent Power Factory

Setelah dilakukan pengambilan data dan membuat pemodelan single line diagram trafo pada *software Digsilent Power Factory*, didapatkan hasil simulasi *unbalanced load flow* seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Ketidakseimbangan Beban

Nama Aset	Arus (A)				% Ketidakseimbangan	% Rugi Daya
	R	S	T	N		
ED068	104	171	88	2,64	2,21%	0,04%
ED079	74	51	102	6,52	3,26%	0,13%
ED326	192	160	159	9,56	3,33%	0,20%
ED325	206	218	121	17,35	4,21%	0,46%
ED137	52	49	50	6,22	4,44%	0,17%
ED072	136	95	92	22,55	4,74%	0,64%
ED245	96	66	80	5,55	5,60%	0,19%
ED139	127	105	138	14,71	6,74%	0,65%
ED110	226	201	206	10,40	7,72%	0,53%
ED075	176	231	175	8,86	8,33%	0,49%
ED074	111	140	130	25,30	8,40%	1,35%
ED141	39	48	41	23,44	8,45%	1,27%
ED049	92	34	36	32,10	8,48%	1,62%
ED172	86	93	87	1,93	9,52%	0,21%
ED290	120	201	192	35,00	9,83%	2,10%
ED181	61	49	54	26,70	9,88%	1,76%
ED071	52	174	93	28,70	9,91%	1,78%
ED322	56	63	61	14,47	10,17%	0,95%
ED288	80	97	90	55,57	12,10%	4,24%
ED286	128	101	118	2,93	12,12%	0,63%
ED171	5	12	17	35,90	12,38%	2,74%
ED070	38	24	53	25,83	12,67%	2,21%
ED073	48	39	67	54,68	12,71%	4,12%
ED180	111	149	117	31,97	15,22%	3,23%
ED300	5	4	5	2,73	16,67%	0,50%
ED321	67	104	83	33,22	16,87%	3,55%
ED069	93	124	107	42,23	17,54%	4,43%
ED320	40	45	46	76,07	18,62%	9,53%
ED327	1	2	1	48,58	19,36%	6,96%
ED108	77	125	56	76,05	19,88%	9,04%
ED170	230	188	166	34,68	20,35%	6,26%
ED067	133	172	163	90,41	22,26%	12,02%
ED323	4	3	5	54,83	22,68%	8,28%
ED048	164	206	117	49,60	23,20%	8,69%
ED169	104	66	79	29,14	25,51%	5,92%
ED027	60	50	67	76,18	27,55%	12,82%
ED328	94	67	130	39,51	29,92%	7,11%
ED287	98	29	56	61,19	30,23%	11,64%
ED168	183	163	176	10,44	37,25%	2,57%
ED324	114	125	121	60,13	40,44%	15,84%
ED076	78	117	77	67,02	41,23%	23,69%
ED127	46	85	45	107,79	42,42%	29,20%

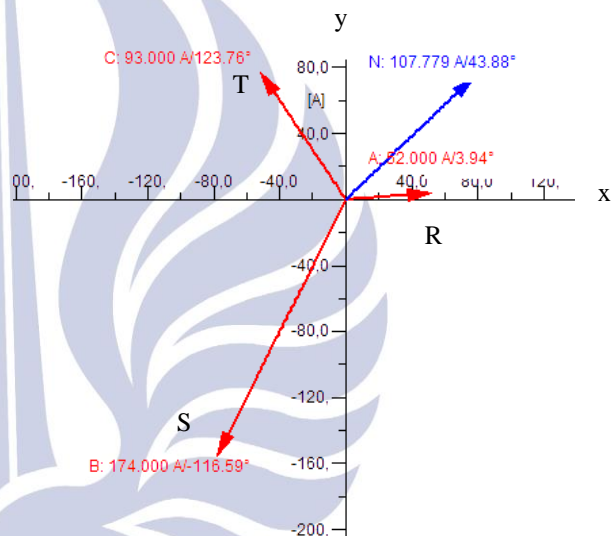


Gambar 6. Grafik Bar Ketidakseimbangan Beban dan Rugi Daya.

Pada Tabel 3 menunjukkan data hasil simulasi pada *Digsilent Power Factory* yang mencakup nilai arus pada masing – masing fasa dan sisi netral, nilai daya yang aktif pada trafo dan pada sisi netral, persentase pembebanan pada trafo, persentase ketidakseimbangan beban pada trafo, serta persentase rugi daya yang terjadi. Tabel tersebut merupakan data hasil simulasi ketidakseimbangan yang sudah diurutkan berdasarkan nilai persentase ketidakseimbangan dari yang terkecil ke terbesar. Pada tabel tersebut menunjukkan persentase rugi daya yang juga mengalami kenaikan seiring dengan persentase ketidakseimbangan beban pada trafo. Kenaikan nilai persentase tersebut dapat divisualisasikan melalui grafik bar pada Gambar 6.

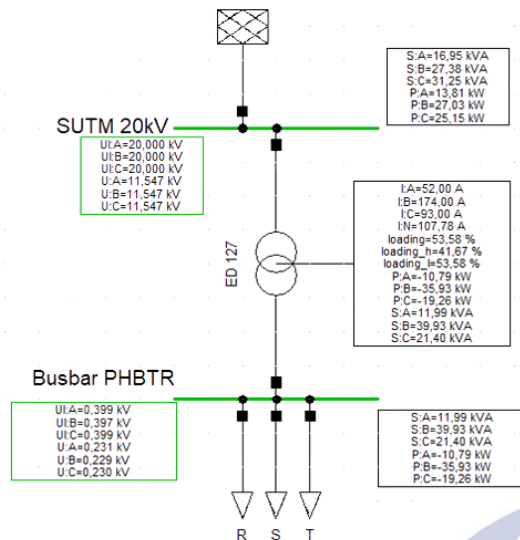
Pada Gambar 6, bar berwarna kuning menunjukkan persentase ketidakseimbangan pada trafo distribusi. Sedangkan bar berwarna hitam menunjukkan persentase rugi daya pada sisi netral trafo. Dari grafik bar tersebut, menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase ketidakseimbangan pada trafo maka persentase rugi daya pada sisi netral trafo juga akan naik. Namun hal itu juga dipengaruhi pada persentase pembebanan pada trafo. Nilai rugi daya juga akan lebih tinggi apabila persentase pembebanan trafo juga semakin tinggi.

Dapat diketahui juga pada Tabel 3 bahwa sebagian besar dari trafo distribusi yang ada di Penyulang Ngunut mengalami ketidakseimbangan beban dengan persentase terbesar pada trafo ED127 mencapai 42,42% dengan nilai arus penghantar netral sebesar 107,79A atau rugi daya sebesar 29,20% dari nilai daya yang terkirim. Hal ini tentunya sudah melebihi standar SPLN No. 72 Tahun 1987 dimana nilai rugi daya atau *losses* tidak diizinkan lebih dari 10%. Ketidakseimbangan beban pada trafo ED127 juga ditunjukkan melalui vektor diagram pada Gambar 7.

Gambar 7. Vektor Diagram Trafo ED127 pada *Digsilent Power Factory*.

Pada Gambar 7, vektor A mewakili fasa R dengan nilai arus sebesar 52A dan sudut fasa 3,94°, vektor B mewakili fasa S dengan nilai arus sebesar 174A dan sudut fasa sebesar -116,59°, vektor C yang mewakili fasa T dengan nilai arus sebesar 93A dan sudut fasa sebesar 123,76°, serta vektor sisi netral dengan nilai arus sebesar 107,78A dan sudut fasa sebesar 43,88°. Untuk nilai tegangan sisi primer dan sekunder, serta daya aktif dan daya semu ditunjukkan pada Gambar 8.

Pada Gambar 8, merupakan hasil run simulasi ketidakseimbangan pada trafo ED127 yang menunjukkan hasil pengukuran tegangan sisi primer dan sekunder beserta daya aktif dan daya semu. Tegangan pada sisi sekunder menunjukkan nilai tegangan fasa S lebih kecil daripada nilai tegangan fasa lainnya. Hal ini disebabkan karena fasa S memiliki beban paling tinggi dibandingkan fasa lainnya. Namun nilai tegangan tersebut masih dalam batas toleransi.



Gambar 8. Hasil Run Simulasi Ketidakseimbangan Pada Digsilent Power Factory

Untuk menemukan persentase kesalahan atau *error* dari hasil simulasi pada *Digsilent Power Factory*, dilakukan perhitungan secara manual menggunakan persamaan yang terdapat pada kajian pustaka sebagai pembandingan. Data perhitungan yang digunakan merupakan data pengukuran dari salah satu trafo yaitu ED 127.

a. Persentase Pembebanan

Besar arus beban penuh (I_{FL}) digunakan Persamaan (2).

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2)$$

Di mana :

I_{FL} = Arus Beban Penuh Transformator (A)

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (kV)

Dengan nilai daya transformator sebesar 250 kVA dan tegangan sisi sekunder sebesar 0,4kV maka nilai arus beban penuh yang didapatkan pada Persamaan (2) sebesar 361,7A. Setelah didapatkan nilai arus beban penuh, kemudian menghitung arus rata – rata digunakan Persamaan (3).

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

Di mana :

$I_{rata-rata}$: Arus rata – rata pada transformator (A)

Dengan besar arus fasa R sebesar 52A, fasa S sebesar 174A, dan fasa T sebesar 92A, maka berdasarkan Persamaan (3) didapatkan arus rata – rata sebesar 106,3A. Kemudian menghitung persentase pembebanan digunakan Persamaan (4).

$$\% \text{Pembelanaan} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (4)$$

Di mana:

$\% \text{Pembelanaan}$ = Persentase Pembebanan Trafo.

Dengan besar arus rata – rata sebesar 106,3A , dan arus beban penuh sebesar 361,7A , maka berdasarkan Persamaan (4) didapatkan persentase pembebanan sebesar 29,4%.

b. Persentase Ketidakseimbangan

Untuk menghitung koefisien ketidakseimbangan beban digunakan persamaan (5), (6), dan (7).

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (5)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (6)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (7)$$

Dengan nilai arus fasa R sebesar 52, fasa S sebesar 174A, fasa T sebesar 92A, dan arus rata – rata sebesar 106,3A, maka berdasarkan Persamaan (5), (6), dan (7) didapatkan nilai koefisien a sebesar 0,48 , koefisien b sebesar 1,63 , dan koefisien c sebesar 0,14. Untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban, digunakan persamaan (8).

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (8)$$

Dengan nilai koefisien a sebesar 0,48 , koefisien b sebesar 1,63 , dan koefisien c sebesar 0,14 , maka berdasarkan Persamaan (8) didapatkan persentase ketidakseimbangan beban sebesar 43%.

c. Persentase Rugi Daya

Sebelum dilakukan perhitungan persentase rugi daya, perlu dilakukan perhitungan nilai arus netral berdasarkan data pengukuran ED127. Perhitungan arus netral menggunakan Persamaan (9).

$$I_{Netral} = I_R + I_S + I_T \quad (9)$$

Dengan besar arus fasa R sebesar 52 A, fasa S sebesar 174(cos 120° + j sin 120°)A, dan fasa T sebesar 92 (cos 240° + j sin 240°), maka berdasarkan Persamaan (9) didapatkan hasil arus netral sebesar - 81 + j 70,38 A. Kemudian untuk merubah besar arus netral dalam bentuk bilangan imajiner ke bilangan desimal, digunakan persamaan (10).

$$|I_{Netral}| = \sqrt{p^2 + q^2} = 107A \quad (10)$$

Dengan nilai p sebesar -81A dan nilai q sebesar j70,38A , maka berdasarkan Persamaan (10) didapatkan nilai arus netral sebesar 107A. Setelah didapatkan nilai arus netral dari perhitungan manual, kemudian dilakukan perhitungan rugi daya pada trafo ED127 menggunakan persamaan (11) untuk mendapatkan nilai daya aktif pada trafo, dan Persamaan (12) untuk mendapatkan nilai rugi daya.

$$P = V \times I_{rata-rata} \quad (11)$$

$$P_N = I^2 \times R_N \quad (12)$$

Di mana :

P = Daya aktif pada transformator (W)

P_N = Rugi daya pada netral transformator (W)

R_N = Tahanan penghantar netral transformator (Ω)

Dengan nilai tegangan sisi sekunder sebesar 0,4kV dan arus rata – rata sebesar 106,3A , maka berdasarkan Persamaan (11) didapatkan nilai daya aktif pada transformator sebesar 42.520W. Kemudian dengan nilai tahanan penghantar netral sebesar 1,069 Ω , maka berdasarkan persamaan (12) didapatkan nilai rugi daya pada netral transformator sebesar 12.238W. Setelah nilai rugi daya didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan persentase rugi daya dengan persamaan (13).

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\% \quad (13)$$

Di mana :

$\%P_N$ = Persentase rugi daya (%)

Dengan nilai rugi daya pada netral transformator sebesar 12.238W dan daya aktif transformator sebesar 42.520W, maka berdasarkan Persamaan (13) didapatkan persentase rugi daya sebesar 28,78%.

d. Persentase Kesalahan (Error)

Berdasarkan hasil perhitungan secara manual, didapatkan hasil yang lebih kecil dari hasil simulasi melalui *DigSilent Power Factory*. Perbedaan nilai tersebut ditunjukkan melalui Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Ketidakseimbangan Beban

	%Pembebanan	%Ketidakseimbangan Beban	%Rugi Daya
Hasil Simulasi	29,4%	42,4%	29,2%
Perhitungan Manual	29,4%	43%	28,7%

Untuk menghitung persentase kesalahan (*error*) dari selisih hasil perhitungan tersebut, digunakan Persamaan (14).

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{(|\text{Nilai Eksperimen} - \text{Nilai Yang Diterima}|)}{\text{Nilai Yang Diterima}} \times 100\% \quad (14)$$

Dengan nilai hasil perhitungan manual sebesar 28,78 dan hasil simulasi sebesar 29,20, maka berdasarkan Persamaan (14) didapatkan nilai persentase kesalahan atau *error* sebesar 1,4%.

Hasil Simulasi Setelah Dilakukan Penyeimbangan beban Pada *Digsilent Power Factory*

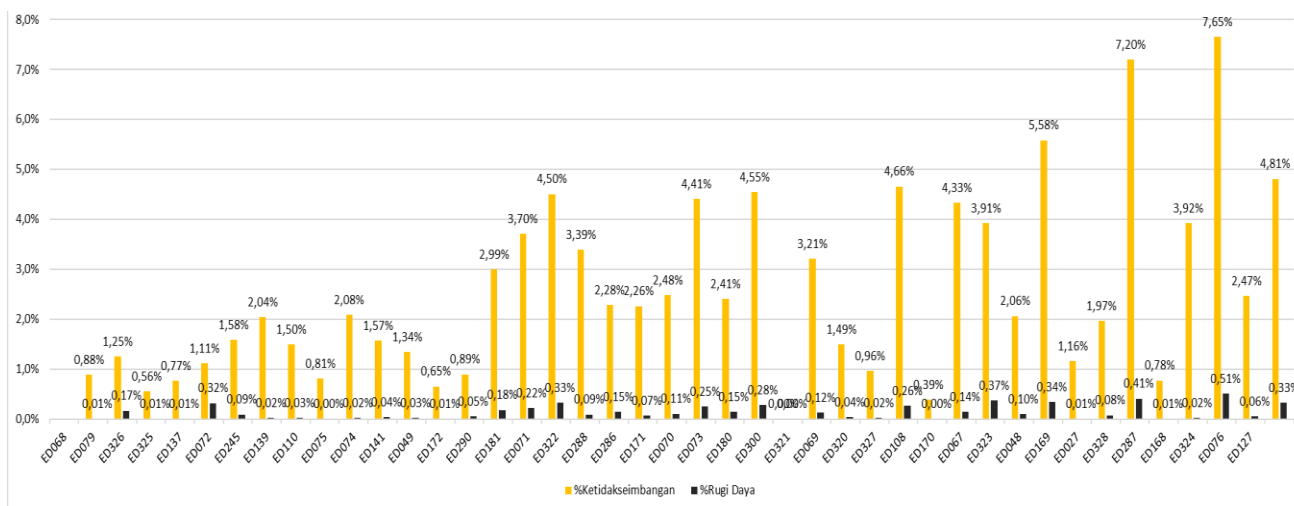
Setelah simulasi ketidakseimbangan beban dilakukan berdasarkan data nyata yang ada di lapangan, maka selanjutnya dilakukan simulasi penyeimbangan beban dengan memindahkan beban pada fasa satu ke fasa lainnya

untuk mendekati nilai arus rata – rata. Hasil dari simulasi penyeimbangan beban ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Ketidakseimbangan Beban

Nama Aset	Arus (A)				% Ketidakseimbangan	% Rugi Daya
	R	S	T	N		
ED068	50	51	50	1,00	0,88%	0,01%
ED079	89	90	87	7,47	1,25%	0,17%
ED326	119	120	121	1,71	0,56%	0,01%
ED325	173	173	176	2,94	0,77%	0,01%
ED137	59	60	61	8,49	1,11%	0,32%
ED072	216	211	206	8,45	1,58%	0,09%
ED245	43	45	43	1,99	2,04%	0,02%
ED139	87	90	90	2,97	1,50%	0,03%
ED110	55	55	54	0,99	0,81%	0,00%
ED075	42	42	44	1,99	2,08%	0,02%
ED074	126	125	130	4,52	1,57%	0,04%
ED141	115	114	118	3,56	1,34%	0,03%
ED049	172	170	169	2,59	0,65%	0,01%
ED172	5	4,9	5	1,00	0,89%	0,05%
ED290	153	152	163	10,35	2,99%	0,18%
ED181	103	114	107	9,35	3,70%	0,22%
ED071	127	115	128	12,36	4,50%	0,33%
ED322	60	56	61	4,55	3,39%	0,09%
ED288	200	188	196	10,43	2,28%	0,15%
ED286	4	4	3,8	1,00	2,26%	0,07%
ED171	121	129	127	7,15	2,48%	0,11%
ED070	86	76	80	8,67	4,41%	0,25%
ED073	191	201	190	10,39	2,41%	0,15%
ED180	87	94	83	9,58	4,55%	0,28%
ED300	4	4	4	0,00	0,00%	0,00%
ED321	84	86	79	6,21	3,21%	0,12%
ED069	106	105	102	3,85	1,49%	0,04%
ED320	164	163	160	3,65	0,96%	0,02%
ED327	88	97	87	9,48	4,66%	0,26%
ED108	170	171	172	1,71	0,39%	0,00%
ED170	48	54	52	5,27	4,33%	0,14%
ED067	186	188	171	15,88	3,91%	0,37%
ED323	94	97	100	6,16	2,06%	0,10%
ED048	74	71	82	9,80	5,58%	0,34%
ED169	38	39	38	1,00	1,16%	0,01%
ED027	124	121	128	6,03	1,97%	0,08%
ED328	56	65	55	9,50	7,20%	0,41%
ED287	87	85	86	1,72	0,78%	0,01%
ED168	11	12	11	1,00	3,92%	0,02%
ED324	63	54	66	10,77	7,65%	0,51%
ED076	52	54	56	3,45	2,47%	0,06%
ED127	102	114	103	11,45	4,81%	0,33%

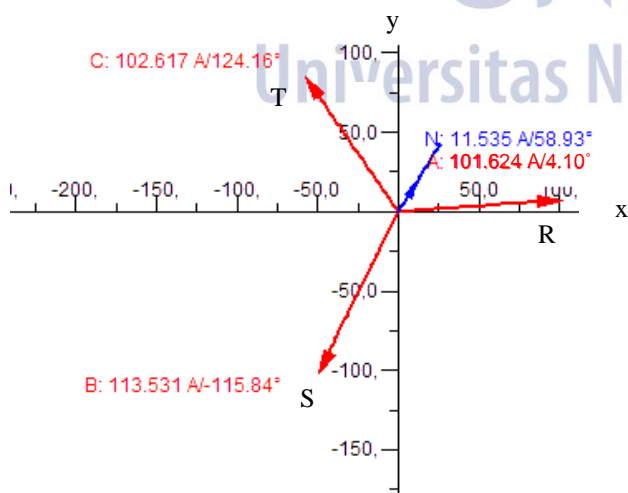
Pada Tabel 5 menunjukkan data hasil simulasi penyeimbangan beban pada *Digsilent Power Factory* yang mencakup nilai arus pada masing – masing fasa dan sisi netral, nilai daya yang aktif pada trafo dan pada sisi netral, persentase pembebanan pada trafo, persentase ketidakseimbangan beban pada trafo, persentase rugi daya, serta keterangan pemindahan beban. Hasil simulasi penyeimbangan di atas menunjukkan persentase ketidakseimbangan beban yang mengalami penurunan dibandingkan sebelum dilakukan penyeimbangan beban. Persentase rugi daya juga mengikuti penurunan hingga nilai paling tinggi hanya 0,51%.



Gambar 9. Grafik Bar Hasil Simulasi Penyeimbangan Beban.

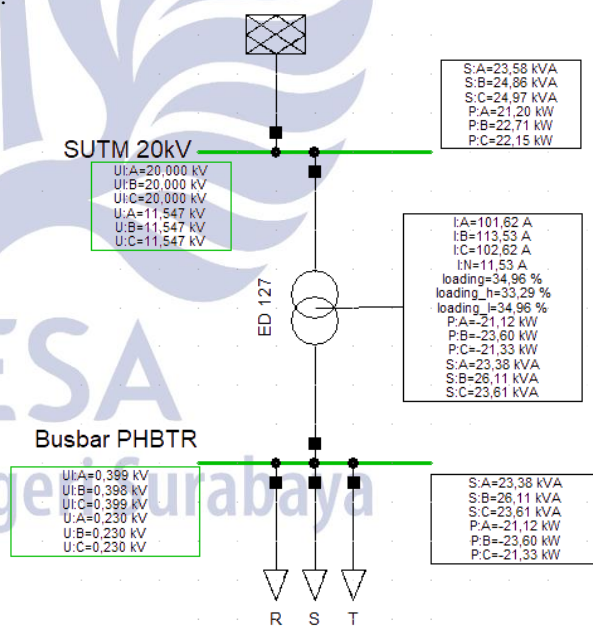
Pada Gambar 9, bar berwarna kuning menunjukkan persentase ketidakseimbangan pada trafo distribusi. Sedangkan bar berwarna hitam menunjukkan persentase rugi daya pada sisi netral trafo. Dari grafik bar tersebut, menunjukkan bahwa persentase rugi daya akan turun seiring dengan adanya penurunan persentase ketidakseimbangan beban.

Berdasarkan data pada Tabel 3 untuk trafo ED127 yang sebelum dilakukan simulasi penyeimbangan beban memiliki persentase ketidakseimbangan beban tertinggi mencapai 42,42% dengan persentase rugi daya sebesar 29,20% pada Tabel 5 turun menjadi 4,81% pada persentase ketidakseimbangan beban dan 0,33% pada persentase rugi daya. Nominal tersebut tentunya sudah ada di bawah batas toleransi standar SPLN No. 72 Tahun 1987 dimana nilai rugi daya atau *losses* tidak diizinkan lebih dari 10%. Hasil penyeimbangan beban pada trafo ED127 juga dapat diketahui dari vektor diagram pada Gambar 10.



Gambar 10. Vektor Diagram Trafo ED127 pada Digsilent Power Factory.

Pada Gambar 10, trafo ED127 sudah memenuhi syarat untuk dinyatakan dalam keadaan seimbang dimana ketiga vektor mendekati sama besar dan saling membentuk sudut 120°. Hal tersebut juga dapat didukung dengan hasil run simulasi penyeimbangan beban yang menampilkan tegangan sisi primer dan sekunder, serta daya aktif dan daya semu ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Hasil Run Simulasi Penyeimbangan Beban ED127 Pada Digsilent Power Factory

Pada Gambar 11, merupakan hasil run simulasi penyeimbangan beban pada trafo ED127 yang menunjukkan hasil pengukuran tegangan sisi primer dan sekunder beserta daya aktif dan daya semu. Tegangan pada sisi sekunder dan primer menunjukkan nilai tegangan yang sama besarnya. Hal ini juga memenuhi syarat suatu

transformator distribusi dinyatakan seimbang dimana nilai tegangan antar fasa sama besarnya.

PENUTUP

Simpulan

Hasil simulasi ketidakseimbangan beban dan penyeimbangan beban pada *software Digsilent Power Factory* menunjukkan hasil ketidakseimbangan beban terbesar pada trafo ED127 dengan persentase ketidakseimbangan terbesar mencapai 42,42% dengan rugi daya akibat munculnya arus netral sebesar 29,20% dari daya yang terkirim. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, persentase ketidakseimbangan beban turun menjadi 4,81% dengan persentase rugi daya 0,33%.

Terdapat pengaruh pada ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya dimana semakin besar persentase ketidakseimbangan beban maka nilai arus netral semakin tinggi yang berakibat persentase rugi daya semakin tinggi juga. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, nilai arus netral pada trafo semakin kecil yang berdampak pada turunnya persentase rugi daya yang terjadi.

Saran

Persentase ketidakseimbangan pada trafo dengan kode gardu ED127 merupakan nominal yang cukup tinggi yang berakibat pada rugi daya yang cukup tinggi. Untuk meminimalisir kerugian yang besar tersebut, perlu dilakukan tindak lanjut penyeimbangan beban pada trafo ED127 di lapangan.

Dari hasil analisis, didapati masih banyak trafo dengan beban yang tidak seimbang maka perlu adanya agenda berkala untuk penyeimbangan beban trafo di wilayah kerja PT. PLN (Persero) ULP Nguntur untuk meminimalisir rugi daya yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

Dwi. Rahayu. 2019. *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Transformator 3 Phase Terhadap Susut Daya Pada Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) ULP Manahan*.

IEEE No. 446 Tahun 1995. *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*.

Sogen. Markus. Dwiyanto. Tobi. 2018. *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di Pt Pln (Persero) Area Sorong*. Jurnal Electro Luceat, 4(1).

SPLN No. 17 Tahun 1979. *Pedoman Pembebanan Transformator Terendam Minyak*.

SPLN No. 72 Tahun 1987. *Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)*.

SPLN D5.004-1:2012. *Regulasi Harmonisa, Flicker, dan Ketidakseimbangan Tegangan*.

Syaroni. Zainal., dan Rijanto. Tri. 2019. *Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah*. Jurnal Teknik Elektro, 8(1).

