

STUDI ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DAN EFEKNYA TERHADAP KINERJA TRANSFORMATOR SERTA ALIRAN DAYA DI PT. PLN (PERSERO) UP3 PALU MENGGUNAKAN DIGSILENT POWER FACTORY

Rahmat Hidayat H¹, Maryanto Masarrang¹, Yusnaini Arifin², Baso Mukhlis³, Ahmad Antares Adam⁴,
Yulius S Pirade⁵

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako ¹²³⁴
Email: rahmathidayathamimu.f44120010@gmail.com ¹

ABSTRACT

Load imbalance in distribution transformers is one of the common issues in electric power distribution systems that can lead to increased neutral current, higher power losses, and degradation of voltage quality. This study aims to investigate the effect of load imbalance on the performance of distribution transformers and power flow characteristics in the electrical distribution system of PT. PLN (Persero) UP3 Palu. The research was conducted using a quantitative method with a simulation approach through DIgSILENT PowerFactory software, based on transformer, load, current, and voltage data from the Flaminggo feeder. Simulations were carried out under unbalanced and balanced load conditions to analyze differences in electrical parameters, including phase currents, neutral current, voltage, as well as active, reactive, and apparent power. The results indicate that load imbalance conditions cause an increase in neutral current and power losses and a decrease in voltage quality, whereas under balanced load conditions, transformer performance and power flow profiles exhibit more stable behavior. Therefore, it can be concluded that load imbalance has a significant impact on the performance of distribution transformers and power flow systems.

Keywords : Load Imbalance, Distribution Transformer, Power Flow, DIgSILENT PowerFactory

INTISARI

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi merupakan salah satu permasalahan dalam sistem distribusi tenaga listrik yang dapat menyebabkan peningkatan arus netral, bertambahnya rugi-rugi daya, serta penurunan kualitas tegangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap kinerja transformator distribusi dan karakteristik aliran daya pada sistem distribusi tenaga listrik di PT. PLN (Persero) UP3 Palu. Penelitian dilakukan menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi melalui perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory berdasarkan data transformator, beban, arus, dan tegangan pada penyulang Flaminggo. Simulasi dilakukan pada kondisi beban tidak seimbang dan kondisi beban seimbang untuk menganalisis perbedaan parameter kelistrikan yang meliputi arus fasa, arus netral, tegangan, serta daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi ketidakseimbangan beban menyebabkan meningkatnya arus netral dan rugi-rugi daya serta menurunnya kualitas tegangan, sedangkan pada kondisi beban seimbang kinerja transformator dan profil aliran daya menunjukkan kondisi yang lebih stabil. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa ketidakseimbangan beban memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja transformator distribusi dan sistem aliran daya.

Kata kunci: Ketidakseimbangan Beban, Transformator Distribusi, Aliran Daya, DIgSILENT PowerFactor

I. PENDAHULUAN

Salah satu kebutuhan primer manusia pada saat ini adalah energi listrik. Dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik yang digunakan manusia, maka penyedia energi listrik juga harus memperhatikan peralatan sistem penyaluran energi listrik kepada konsumen atau pelanggannya. Salah satu peralatan yang digunakan adalah transformator distribusi, yang berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dengan menurunkan tegangan dari tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 380/220 V [1].

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 tidak merata. Suatu pembebanan pada transformator distribusi yang tidak seimbang tentunya mengakibatkan munculnya arus pada netral transformator [2] [3].

Arus netral yang timbul akibat ketidakseimbangan beban menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, penurunan efisiensi transformator, serta penurunan umur operasional peralatan. Efek ini secara langsung dapat mengganggu sistem distribusi dan meningkatkan risiko gangguan pelayanan kepada pelanggan. Jika tidak ditangani dengan baik, maka ketidakseimbangan beban dapat menjadi penyebab utama kerusakan dini transformator, menurunnya kualitas tegangan, serta meningkatnya biaya operasional sistem distribusi secara keseluruhan. [4].

Di PT. PLN (Persero) UP3 Palu, ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi menjadi perhatian serius dalam upaya meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Kondisi ini perlu dianalisis lebih lanjut untuk memahami dampaknya terhadap aliran daya

dalam jaringan distribusi, serta kinerja transformator secara tidak langsung. Untuk melakukan analisis tersebut, digunakan perangkat lunak DIGSILENT Power Factory yang mampu melakukan simulasi sistem tenaga listrik secara akurat dan komprehensif. Melalui perangkat lunak ini, dapat dilakukan perhitungan aliran daya (load flow analysis) guna mengetahui kondisi tegangan, aliran arus, rugi-rugi daya, dan besarnya arus netral pada berbagai kondisi pembebanan.

II. LANDASAN TEORI

A. Transformator

Transformator adalah suatu peralatan mesin listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi. Pada umumnya transformator terdiri dari 2 belitan yaitu belitan primer dan belitan sekunder, dan ada juga transformator yang secara khusus memiliki belitan tersier sehingga menjadi 3 belitan. Bagian utama transformator adalah dua buah kumparan yang keduanya dililitkan pada sebuah inti besi lunak. Kedua kumparan tersebut memiliki jumlah lilitan yang berbeda [5].

B. Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum ampere dan hukum Faraday, yaitu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah. Akibatnya pada sisi primer terjadi induksi. Sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah – ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan [6].

C. Bagian Transformator

1. Kumparan Transformator

2. Inti Besi
3. Bushing Transformator
4. Pendingin Transformator
5. Tap Changer

D. Ketidakseimbangan Beban Transformator

Pengertian Beban Tidak Seimbang, yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

1. Ketiga Phasor arus/tegangan adalah sama besar.
2. Ketiga Phasor saling membentuk sudut 120° satu sama lain .

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu:

1. Ketiga Phasor sama besar tetapi tidak saling membentuk sudut 120° .
2. Ketiga Phasor tidak sama besar tetapi saling membentuk sudut 120° .
3. Ketiga Phasor 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. 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% [3].

E. Efek Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

1. Pengaruh Terhadap Efisiensi Transformator

Sebuah transformator yang ideal akan memiliki efisiensi sebesar 100 %. Ini berarti bahwa semua daya yang diberikan pada kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder tanpa adanya kerugian. Sebuah transformator yang real memiliki efisiensi dibawah 100%. Untuk transformator yang bekerja pada tegangan dan frekuensi yang konstan, efisiensinya dapat mencapai 98% [7].

2. Dampak Terhadap Regulasi Tegangan.

Tahanan kawat yang dialiri arus listrik mengakibatkan adanya jatuh tegangan. Drop tegangan atau jatuh tegangan (V) pada suatu penghantar semakin besar apabila arus (I) di dalam penghantar semakin besar dan tahanan penghantar (R_l) semakin besar pula. Sehingga besarnya tegangan pada sisi pengirim tidak sama dengan besarnya tegangan pada sisi penerima [8].

F. Studi Aliran Daya (Load Flow Analysis)

Studi Aliran Daya Listrik adalah pembelajaran dalam rangka mendapatkan informasi mengenai Analisa Load Flow atau Aliran Daya pada kondisi saat operasi sistem, Studi ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode Manual maupun menggunakan bantuan aplikasi atau software computer.

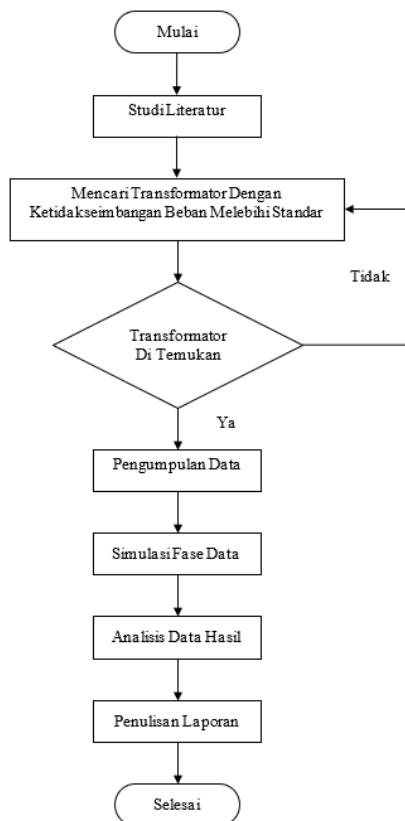
G. DigSILENT PowerFactory

Software ini banyak digunakan di industri kelistrikan dan akademik karena kemampuannya dalam menangani berbagai aspek perencanaan dan operasional sistem tenaga listrik, termasuk studi aliran daya (load flow analysis), analisis gangguan, kestabilan sistem, optimalisasi jaringan, serta perencanaan ekspansi sistem.

DIGSILENT PowerFactory dapat menganalisis baik sistem tenaga listrik skala kecil seperti jaringan distribusi, maupun skala besar seperti jaringan transmisi dan sistem interkoneksi.

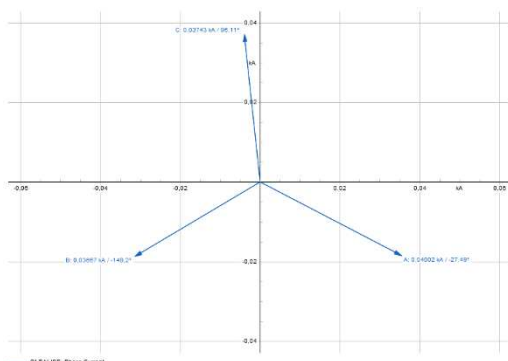
III. METODE PENELITIAN

A. Diagram Alir



IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Ketidakseimbangan



Gambar 4. 1 Fasor Arus GI Talise Unbalance Digsilent Power Factory

Berdasarkan diagram fasor arus tiga fasa, terlihat bahwa sistem mengalami ketidakseimbangan karena besar dan sudut arus antar fasa tidak sama, yaitu fasa A sebesar 0,04002 kA $\angle -27,49^\circ$, fasa B sebesar 0,03667 kA $\angle -149,2^\circ$, dan fasa C sebesar 0,03743 kA $\angle 96,11^\circ$. Perbedaan magnitudo dan deviasi sudut antar fasa yang tidak tepat 120° menunjukkan adanya distribusi beban yang tidak merata.

Tabel 4. 1 Daya Sistem Distribusi Kondisi Tidak Seimbang Penyulang Flaminggo

Grid	Total Daya			Unbalance %
	S_MVA	P_MW	Q_MVAR	
GI Talise	1,3168	1,174585	0,595242	5,38291

Tabel daya menunjukkan total beban yang mengalir pada Grid GI Talise adalah sebesar 1,3168 MVA, yang terdiri dari daya aktif (P_MW) sebesar 1,1746 MW dan daya reaktif (Q_MVAR) sebesar 0,5952 MVAR. Data ini memperlihatkan nilai Ketidakseimbangan Beban (Unbalance %) yang sangat signifikan, yaitu 5,38291%.

Tabel 4. 2 Data Tegangan Kondisi Tidak Seimbang Penyulang Flaminggo

Grid	Tegangan Pangkal (kV)			Tegangan Ujung (kV)		
	R	S	T	R	S	T
GI Talise	19,999	20	20	19,877	19,891	19,88

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa tegangan pada pangkal feeder (keluaran Gardu Induk) berada pada kondisi stabil sebesar 20 kV di seluruh fasa. Sepanjang feeder terjadi penurunan tegangan yang masih dalam batas normal, dengan tegangan di ujung feeder berkisar antara 19,877 kV hingga 19,891 kV. Walaupun sistem mengalami ketidakseimbangan beban, tegangan antar-fasa pada ujung feeder tetap relatif seimbang dengan selisih yang sangat kecil, yaitu sekitar 0,014 kV.

Tabel 4. 3 Daya Gardu Distribusi Kondisi Tidak Seimbang Penyulang Flaminggo.

NO	Kode Gardu	Total Daya			Pembebanan %
		S MVA	P MW	Q MVAR	
1	GD PT1-AA	0,017177	0,015381	0,007647	44,64
2	GD PT1-AA-01	0,008793	0,007898	0,003864	17,37
3	GD PT1-AA-02	0	0	0	0
4	GD PT1-AB-01	0,015744	0,014134	0,006937	25,05
5	GD PT1-AB	0,025876	0,023279	0,011298	4,03
6	GD PT1-AC	0,019734	0,017667	0,008792	41,87
7	GD PT1-AC-01	0,006708	0,006028	0,002944	15,31
8	GD PT1-AC-02	0,027306	0,024526	0,012005	20,56
9	GD PT1-AC-05	0	0	0	0
10	GD PT1-AC-04	0,002775	0,002494	0,001217	12,53
11	GD PT1-AC-03	0,016675	0,014965	0,007355	27,2
12	GD PT1-AD	0,044138	0,039491	0,019715	46,15
13	GD PT1-AE	0,042527	0,038036	0,019021	56,04
14	GD PT1-AF-02	0,040293	0,036165	0,017765	23,71
15	GD PT1-AF-03	0	0	0	0
16	GD PT1-AF-05	0	0	0	0
17	GD PT1-AF-04	0	0	0	0
18	GD PT1-AF-01	0,001619	0,001455	0,00071	11,14
19	GD PT1-AG-02	0,018037	0,016212	0,007906	12,89
20	GD PT1-AG	0,0935	0,082931	0,043182	143,35
21	GD PT1-AG-01	0,007885	0,007067	0,003498	33,53
22	GD PT1-AH	0,0472	0,042193	0,021157	63,86
23	GD PT1-AH-01	0,040632	0,036373	0,018153	52,54
24	GD PT1-AH-02	0,031561	0,028267	0,014037	43,37
25	GD PT1-AI	0,003715	0,003326	0,001655	42
26	GD PT1-AT-01	0,014144	0,012679	0,00627	35,66
27	GD PT1-AT-02	0,152137	0,135516	0,069146	80,21
28	GD PT1-AV	0,008102	0,007275	0,003566	20,94
29	GD PT1-AW-01	0	0	0	0
30	GD PT1-AW-04	0	0	0	0
31	GD PT1-AX	0,0291	0,025981	0,013107	67,49
32	GD PT1-AX-01	0,014582	0,013094	0,006418	20,96
33	GD PT1-AW-03	0	0	0	0
34	GD PT1-AY	0,003471	0,003118	0,001525	16,75
35	GD PT1-AY-04	0,00231	0,002078	0,001009	3,14
36	GD PT1-AY-05	0,005779	0,005196	0,00253	8,72
37	GD FLA. 57	0	0	0	0
38	GD PT1-AY-06	0	0	0	0
39	GD PT1-AY-01	0,056798	0,050922	0,025159	32,89
40	GD PT1-AY-07	0	0	0	0
41	GD PT1-AY-08	0	0	0	0
42	GD PT1-AY-09	0	0	0	0
43	GD PT1-AY-10	0	0	0	0
44	GD PT1-AY-02	0,051693	0,046142	0,023305	83,22
45	GD PT1-AY-03	0,005323	0,00478	0,002341	20,97
46	GD PT1-AZ	0,035933	0,032008	0,01633	96,11
47	GD PT1-AZ-02	0,065005	0,057989	0,029375	71,79

Hasil analisis memperlihatkan bahwa sebagian besar gardu masih berada pada kondisi underload dengan pembebanan di bawah 60%, menandakan kapasitas transformator belum dimanfaatkan secara optimal. Mengacu pada SPLN 50:1997, pembebanan ideal transformator berada pada kisaran 60–80%, sementara beban di bawah 60% dianggap tidak efisien dan beban di atas 80% tergolong overload.

Tabel 4. 4 Arus Fasa dan Netral Kondisi Tidak Seimbang Penyulang Flaminggo.

NO	Kode Gardu	Arus (kA)						UNB %
		R	S	T	Netral			
					PLN	Simulasi	Error	
1	GD PT1-AA	0,013	0,029	0,032	0,018	0,018	1,1	24,01
2	GD PT1-AA-01	0	0,025	0,013	0,038	0,022	42,6	56,94
3	GD PT1-AA-02	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
4	GD PT1-AB-01	0,023	0,036	0,009	0,026	0,024	9,6	34,50
5	GD PT1-AB	0,02	0,034	0,058	0,017	0,033	95,9	29,74

6	GD PT1-AC	0,029	0,03	0,026	0,008	0,004	53,8	4,26
7	GD PT1-AC-01	0,022	0,004	0,003	0,022	0,019	15,3	63,90
8	GD PT1-AC-02	0,039	0,03	0,029	0,022	0,029	35,0	25,06
9	GD PT1-AC-05	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
10	GD PT1-AC-04	0,009	0	0,003	0,005	0,008	60,0	66,23
11	GD PT1-AC-03	0,008	0,039	0,025	0,022	0,027	23,2	37,35
12	GD PT1-AD	0,061	0,063	0,066	0,044	0,004	90,0	2,31
13	GD PT1-AE	0,08	0,068	0,035	0,041	0,041	0,0	22,11
14	GD PT1-AF-02	0,054	0,068	0,052	0,028	0,015	45,7	8,70
15	GD PT1-AF-03	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
16	GD PT1-AF-05	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
17	GD PT1-AF-04	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
18	GD PT1-AF-01	0,003	0,004	0	0,003	0,004	20,0	51,53
19	GD PT1-AG-02	0,037	0,019	0,022	0,019	0,017	11,6	21,45
20	GD PT1-AG	0,202	0,091	0,106	0,082	0,108	31,3	26,61
21	GD PT1-AG-01	0,01	0,012	0,012	0,005	0,002	60,0	5,91
22	GD PT1-AH	0,091	0,047	0,065	0,062	0,039	37,3	19,04
23	GD PT1-AH-01	0,037	0,063	0,075	0,052	0,034	34,6	19,35
24	GD PT1-AH-02	0,053	0,062	0,021	0,067	0,038	43,7	27,55
25	GD PT1-AI	0,015	0,001	0	0,01	0,015	47,0	90,77
26	GD PT1-AT-01	0,007	0,003	0,051	0,043	0,047	8,4	75,65
27	GD PT1-AT-02	0,22	0,204	0,228	0,052	0,022	58,3	3,28
28	GD PT1-AV	0,013	0,007	0,015	0,008	0,007	8,8	20,62
29	GD PT1-AW-01	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
30	GD PT1-AW-04	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
31	GD PT1-AX	0,048	0,043	0,034	0,012	0,017	5,0	9,89
32	GD PT1-AX-01	0,03	0,024	0,009	0,013	0,019	45,4	29,74
33	GD PT1-AW-03	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
34	GD PT1-AY	0,003	0	0,012	0,008	0,011	36,3	72,06
35	GD PT1-AY-04	0,001	0,009	0	0	0,009	0,0	85,44
36	GD PT1-AY-05	0,02	0,005	0	0,01	0,019	82,0	72,09
37	GD FLA. 57	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
38	GD PT1-AY-06	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
39	GD PT1-AY-01	0,079	0,072	0,094	0,039	0,019	49,5	7,97
40	GD PT1-AY-07	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
41	GD PT1-AY-08	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
42	GD PT1-AY-09	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
43	GD PT1-AY-10	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
44	GD PT1-AY-02	0,118	0,053	0,051	0,06	0,068	12,7	29,98
45	GD PT1-AY-03	0,005	0,003	0,015	0,007	0,011	60,0	48,44
46	GD PT1-AZ	0,068	0,045	0,041	0,038	0,026	31,6	16,56
47	GD PT1-AZ-02	0,088	0,089	0,102	0,026	0,014	46,9	4,90
48	GD PT1-AZ-01	0,009	0,012	0,058	0,048	0,049	2,3	60,90
49	GD PT1-BA	0,087	0,075	0,063	0,055	0,022	60,5	9,36
50	GD PT1-BA-01	0,006	0,001	0,007	0,007	0,006	20,0	39,76
51	GD PT1-BB	0,098	0,097	0,08	0,045	0,018	60,0	6,42
52	GD PT1-BC	0,004	0,003	0,004	0	0,001	0,0	9,10
53	GD PT1-BB-02	0	0	0	0	0,000	0,0	0,00
54	GD PT1-BC-01	0,077	0,026	0,021	0,065	0,055	15,1	43,60
55	GD PT1-BD-01	0,084	0,099	0,076	0,014	0,021	47,9	7,88
56	GD PT1-BD	0,032	0,048	0,015	0,032	0,029	9,4	30,33

Berdasarkan hasil simulasi pada Feeder Flaminggo, beberapa gardu seperti GD PT1-AY, dan GD PT1-AI menunjukkan nilai arus yang tinggi dengan tingkat ketidakseimbangan mencapai lebih dari 60%, yang jauh melampaui batas standar ketidakseimbangan beban, yaitu 5% menurut IEC, 5–20% menurut IEEE Std 446-1995, dan 2% berdasarkan SPLN D5 004–1:2012. Hal ini menandakan adanya ketimpangan pembebanan antar fasa. Sebaliknya, beberapa gardu menunjukkan arus yang sangat kecil bahkan nol, mengindikasikan kondisi beban ringan atau tidak aktif. Ketidakseimbangan yang tinggi ini dapat menimbulkan kenaikan arus netral dan pembebanan berlebih pada salah satu fasa transformator, yang berpotensi meningkatkan rugi daya serta menurunkan efisiensi sistem distribusi.

Tabel 4. 5 Tegangan pada Gardu Distribusi (LV)
Kondisi Tidak Seimbang.

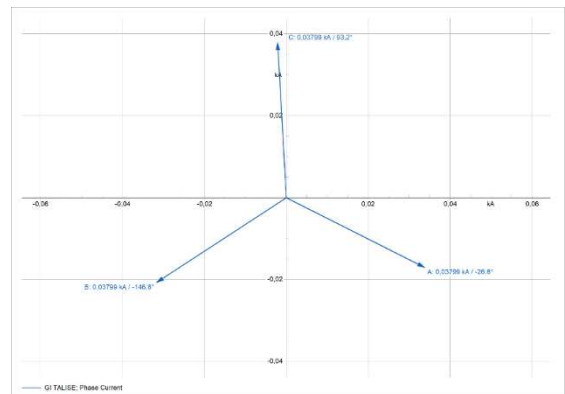
NO	Kode Gardu	Nilai Tegangan (kV)		
		V R	V S	V T
1	GD PT1-AA	0,39882	0,39759	0,3972
2	GD PT1-AA-01	0,39976	0,39875	0,39917
3	GD PT1-AA-02	0,3996	0,39965	0,39962
4	GD PT1-AB-01	0,39875	0,39819	0,39928
5	GD PT1-AB	0,39948	0,39948	0,39934
6	GD PT1-AC	0,39725	0,39722	0,39751
7	GD PT1-AC-01	0,39819	0,39902	0,39905
8	GD PT1-AC-02	0,39773	0,39845	0,39843
9	GD PT1-AC-05	0,39886	0,399	0,39891
10	GD PT1-AC-04	0,39814	0,39902	0,39873
11	GD PT1-AC-03	0,39866	0,39751	0,39792
12	GD PT1-AD	0,39655	0,39663	0,39639
13	GD PT1-AE	0,39573	0,39628	0,39764
14	GD PT1-AF-02	0,39766	0,39752	0,3977
15	GD PT1-AF-03	0,39857	0,39875	0,39863
16	GD PT1-AF-05	0,39857	0,39875	0,39863
17	GD PT1-AF-04	0,39857	0,39875	0,39863
18	GD PT1-AF-01	0,39808	0,39805	0,3986
19	GD PT1-AG-02	0,39779	0,39834	0,39818
20	GD PT1-AG	0,39043	0,39532	0,39476
21	GD PT1-AG-01	0,39704	0,39691	0,39675
22	GD PT1-AH	0,39493	0,39697	0,39618
23	GD PT1-AH-01	0,39711	0,39629	0,39555
24	GD PT1-AH-02	0,39646	0,39616	0,39778

25	GD PT1-AI	0,39591	0,39836	0,39856
26	GD PT1-AT-01	0,398	0,39852	0,39629
27	GD PT1-AT-02	0,394	0,39458	0,39391
28	GD PT1-AV	0,3971	0,39786	0,39704
29	GD PT1-AW-01	0,39809	0,39832	0,3981
30	GD PT1-AW-04	0,39809	0,39832	0,39815
31	GD PT1-AX	0,39437	0,39496	0,3956
32	GD PT1-AX-01	0,39685	0,39728	0,39777
33	GD PT1-AW-03	0,39794	0,39818	0,398
34	GD PT1-AY	0,3977	0,39826	0,39705
35	GD PT1-AY-04	0,39793	0,398	0,398
36	GD PT1-AY-05	0,39744	0,39805	0,39804
37	GD FLA. 57	0,39793	0,39818	0,39799
38	GD PT1-AY-06	0,39777	0,39803	0,39783
39	GD PT1-AY-01	0,39628	0,39672	0,39605
40	GD PT1-AY-07	0,39775	0,39801	0,39781
41	GD PT1-AY-08	0,39775	0,39801	0,39781
42	GD PT1-AY-09	0,3977	0,39797	0,39776
43	GD PT1-AY-10	0,39761	0,39789	0,39767
44	GD PT1-AY-02	0,39296	0,39592	0,39596
45	GD PT1-AY-03	0,39721	0,39773	0,39649
46	GD PT1-AZ	0,39226	0,39444	0,39468
47	GD PT1-AZ-02	0,39424	0,39452	0,39373
48	GD PT1-AZ-01	0,39618	0,39634	0,3879
49	GD PT1-BA	0,39068	0,39194	0,39283
50	GD PT1-BA-01	0,39716	0,39769	0,39722
51	GD PT1-BB	0,39369	0,39399	0,39452
52	GD PT1-BC	0,39677	0,39725	0,39687
53	GD PT1-BB-02	0,39735	0,39766	0,39745
54	GD PT1-BC-01	0,39119	0,39571	0,39617
55	GD PT1-BD-01	0,39423	0,39386	0,39462
56	GD PT1-BD	0,39504	0,39384	0,39643
57	GD PT1-BB-03	0,39733	0,39764	0,39743
58	GD PT1-BE	0,3946	0,39623	0,3938
59	GD PT1-BE-01	0,39648	0,3967	0,39674

Analisis dari tabel data tegangan gardu distribusi menunjukkan bahwa nilai tegangan pada sisi sekunder atau Tegangan Rendah (LV, 0,4 kV) masih terkelola dalam batas yang dapat diterima. Nilai rata-rata tegangan berada di sekitar 0,396 kV (396 V), yang mengindikasikan adanya voltage drop yang masih dalam standar di sepanjang feeder, dengan nilai terendah mencapai 0,390 kV. Meskipun data beban sebelumnya menunjukkan adanya ketidakseimbangan arus pada tegangan menengah, keseimbangan tegangan fasa-ke-fasa

(V_R, V_S, V_T) di setiap gardu tetap terjaga dengan baik, dengan selisih antar-fasa yang minimal, menunjukkan bahwa kualitas tegangan yang disalurkan ke konsumen stabil.

B. Simulasi Beban Seimbang



Gambar 4. 2 Fasor Arus GI Talise Balance
DIgSILENT PowerFactory

Berdasarkan gambar 4.2 diagram vektor arus tiga fasa pangkal Feeder, GI Talise, terlihat bahwa sistem menunjukkan kondisi yang sepenuhnya seimbang. Besar dan sudut arus antar fasa adalah identik, yaitu fasa A sebesar 0,03799 kA $\angle -26,8^\circ$, fasa B sebesar 0,03799 kA $\angle -146,8^\circ$, dan fasa C sebesar 0,03799 kA $\angle 93,2^\circ$. Kondisi ini merupakan hasil ideal dari simulasi penyeimbangan beban yang sebelumnya dilakukan untuk memperbaiki masalah ketidakseimbangan 5,38 %, sehingga sistem dapat beroperasi dengan sangat stabil dan efisien.

Tabel 4. 6 Daya Sistem Distribusi Kondisi
Beban SeimbangPenyulang Flaminggo

Grid	Total daya			Unbalance %
	S_MVA	P_MW	Q_MVAR	
GI Talise	1,3159494	1,1745617	0,5934034	0

Tabel daya menunjukkan total beban yang mengalir pada Grid GI Talise adalah sebesar 1,3159494 MVA, yang terdiri dari daya aktif

(P_MW) sebesar 1,1745617 MW dan daya reaktif (Q_MVAR) sebesar 0,5934034 MVAR. Data ini memperlihatkan nilai Ketidakseimbangan Beban (Unbalance %) telah mencapai angka 0. Nilai ketidakseimbangan yang nol ini mengindikasikan bahwa tindakan simulasi penyeimbangan beban telah berhasil secara sempurna dalam meratakan pembagian beban arus di antara ketiga fasa pada jaringan, sehingga sistem kini beroperasi dalam kondisi seimbang ideal dan akan memaksimalkan efisiensi serta mengurangi rugi-rugi daya.

Tabel 4. 7 Data Tegangan Kondisi Beban Seimbang Penyulang Flaminggo

Grid	Tegangan Pangkal (kV)			Tegangan Ujung (kV)		
	R	S	T	R	S	T
GI Talise	20	20	20	19,883	19,883	19,883

Tabel 4.7 menunjukkan kondisi tegangan pada Feeder Flamingo setelah berhasilnya simulasi penyeimbangan beban. Tegangan Pangkal (keluar dari GI Talise) tercatat seimbang pada 20kV untuk ketiga fasa (R, S, T). Pada Tegangan Ujung feeder, simulasi juga menghasilkan tegangan yang seimbang di 19,883 kV untuk semua fasa.

Tabel 4. 8 Daya Gardu Distribusi Kondisi Beban Seimbang Penyulang Flaminggo.

NO	Kode Gardu	Total daya			Load %
		S MVA	P MW	Q MVAR	
1	GD PT1-AA	0,0171675	0,0153806	0,0076263	34,36
2	GD PT1-AA-01	0,0087859	0,0078982	0,0038484	8,79
3	GD PT1-AA-02	0	0	0	0
4	GD PT1-AB-01	0,0157365	0,0141335	0,0069196	15,75
5	GD PT1-AB	0,0258741	0,0232788	0,0112945	2,59
6	GD PT1-AC	0,0197332	0,0176669	0,0087907	39,52
7	GD PT1-AC-01	0,0067032	0,0060275	0,0029328	6,72
8	GD PT1-AC-02	0,0273001	0,0245258	0,0119908	13,69
9	GD PT1-AC-05	0	0	0	0

10	GD PT1-AC-04	0,0027733	0,0024942	0,0012126	5,56
11	GD PT1-AC-03	0,0166644	0,0149649	0,0073316	16,71
12	GD PT1-AD	0,0441379	0,0394907	0,0197138	44,26
13	GD PT1-AE	0,0425024	0,0380358	0,0189666	42,63
14	GD PT1-AF-02	0,040291	0,0361652	0,0177607	20,21
15	GD PT1-AF-03	0	0	0	0
16	GD PT1-AF-05	0	0	0	0
17	GD PT1-AF-04	0	0	0	0
18	GD PT1-AF-01	0,001618	0,0014549	0,0007078	6,49
19	GD PT1-AG-02	0,0180348	0,016212	0,007901	9,05
20	GD PT1-AG	0,0933207	0,0829305	0,0427937	93,66
21	GD PT1-AG-01	0,007885	0,0070668	0,0034977	31,65
22	GD PT1-AH	0,0471778	0,0421927	0,0211072	47,35
23	GD PT1-AH-01	0,0406345	0,036373	0,0181152	40,79
24	GD PT1-AH-02	0,03154	0,0282671	0,013991	31,66
25	GD PT1-AI	0,0037023	0,0033255	0,0016272	14,87
26	GD PT1-AT-01	0,0141137	0,0126786	0,0062008	14,17
27	GD PT1-AT-02	0,1521306	0,1355154	0,0691324	76,4
28	GD PT1-AV	0,0081003	0,0072746	0,003563	16,27
29	GD PT1-AW-01	0	0	0	0
30	GD PT1-AW-04	0	0	0	0
31	GD PT1-AX	0,0290945	0,0259807	0,0130955	58,47
32	GD PT1-AX-01	0,0145774	0,0130943	0,0064062	14,65
33	GD PT1-AW-03	0	0	0	0
34	GD PT1-AY	0,0034673	0,0031177	0,0015172	6,97
35	GD PT1-AY-04	0,0023098	0,0020785	0,0010075	1,16
36	GD PT1-AY-05	0,0057763	0,0051962	0,0025229	3,63
37	GD FLA. 57	0	0	0	0
38	GD PT1-AY-06	0	0	0	0
39	GD PT1-AY-01	0,0567951	0,0509222	0,0251517	28,55
40	GD PT1-AY-07	0	0	0	0
41	GD PT1-AY-08	0	0	0	0
42	GD PT1-AY-09	0	0	0	0
43	GD PT1-AY-10	0	0	0	0
44	GD PT1-AY-02	0,0516261	0,0461418	0,0231558	51,92
45	GD PT1-AY-03	0,0053191	0,0047805	0,0023324	10,7
46	GD PT1-AZ	0,0359126	0,0320082	0,0162846	72,25
47	GD PT1-AZ-02	0,065001	0,0579889	0,0293669	65,39
48	GD PT1-AZ-01	0,0184276	0,0164198	0,0083645	74,16
49	GD PT1-BA	0,0527179	0,0467652	0,024335	106,09
50	GD PT1-BA-01	0,0032346	0,0029099	0,0014125	3,25
51	GD PT1-BB	0,0640612	0,0571575	0,0289283	64,46
52	GD PT1-BC	0,0025438	0,0022863	0,0011152	10,24
53	GD PT1-BB-02	0	0	0	0
54	GD PT1-BC-01	0,0288605	0,0257729	0,0129881	58,09
55	GD PT1-BD-01	0,0598135	0,0538321	0,0260721	60,69
56	GD PT1-BD	0,0220698	0,0197453	0,0098589	44,42
57	GD PT1-BB-03	0	0	0	0
58	GD PT1-BE	0,0827893	0,0739931	0,0371361	52,05
59	GD PT1-BE-01	0,0192171	0,0172512	0,0084672	19,33

Berdasarkan data pada tabel total daya dan pembebanan gardu distribusi Feeder Flaminggo,

dapat dijelaskan bahwa setiap gardu memiliki nilai daya semu S, daya aktif P, dan daya reaktif Q yang bervariasi sesuai dengan besarnya beban yang dilayani. Nilai pembebanan gardu menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas transformator, di mana sebagian besar gardu masih berada dalam kondisi beban sedang hingga rendah. Namun, beberapa gardu seperti GD PT1-BA (106,09%), mengalami beban berlebih (overload), yang menandakan kapasitas transformator pada titik tersebut sudah tidak sesuai dengan kebutuhan beban di lapangan dan berisiko merusak peralatan.

Tabel 4. 9 Data Arus Fasa Kondisi Beban Seimbang Penyulang Flaminggo

NO	Kode Gardu	Rata-Rata Arus (kA)	Unbalance %
1	GD PT1-AA	0,024666667	0
2	GD PT1-AA-01	0,012666667	0
3	GD PT1-AA-02	0	0
4	GD PT1-AB-01	0,022666667	0
5	GD PT1-AB	0,037333333	0
6	GD PT1-AC	0,028333333	0
7	GD PT1-AC-01	0,009666667	0
8	GD PT1-AC-02	0,039333333	0
9	GD PT1-AC-05	0	0
10	GD PT1-AC-04	0,004	0
11	GD PT1-AC-03	0,024	0
12	GD PT1-AD	0,063333333	0
13	GD PT1-AE	0,061	0
14	GD PT1-AF-02	0,058	0
15	GD PT1-AF-03	0	0
16	GD PT1-AF-05	0	0
17	GD PT1-AF-04	0	0
18	GD PT1-AF-01	0,002333333	0
19	GD PT1-AG-02	0,026	0
20	GD PT1-AG	0,133	0
21	GD PT1-AG-01	0,011333333	0
22	GD PT1-AH	0,067666667	0
23	GD PT1-AH-01	0,058333333	0
24	GD PT1-AH-02	0,045333333	0

25	GD PT1-AI	0,005333333	0
26	GD PT1-AT-01	0,020333333	0
27	GD PT1-AT-02	0,217333333	0
28	GD PT1-AV	0,011666667	0
29	GD PT1-AW-01	0	0
30	GD PT1-AW-04	0	0
31	GD PT1-AX	0,041666667	0
32	GD PT1-AX-01	0,021	0
33	GD PT1-AW-03	0	0
34	GD PT1-AY	0,005	0
35	GD PT1-AY-04	0,003333333	0
36	GD PT1-AY-05	0,008333333	0
37	GD FLA. 57	0	0
38	GD PT1-AY-06	0	0
39	GD PT1-AY-01	0,081666667	0
40	GD PT1-AY-07	0	0
41	GD PT1-AY-08	0	0
42	GD PT1-AY-09	0	0
43	GD PT1-AY-10	0	0
44	GD PT1-AY-02	0,074	0
45	GD PT1-AY-03	0,007666667	0
46	GD PT1-AZ	0,051333333	0
47	GD PT1-AZ-02	0,093	0
48	GD PT1-AZ-01	0,026333333	0
49	GD PT1-BA	0,075	0
50	GD PT1-BA-01	0,004666667	0
51	GD PT1-BB	0,091666667	0
52	GD PT1-BC	0,003666667	0
53	GD PT1-BB-02	0	0
54	GD PT1-BC-01	0,041333333	0
55	GD PT1-BD-01	0,086333333	0
56	GD PT1-BD	0,031666667	0
57	GD PT1-BB-03	0	0
58	GD PT1-BE	0,118666667	0
59	GD PT1-BE-01	0,027666667	0

Data rata-rata arus ini mengonfirmasi bahwa masalah ketidakseimbangan fasa utama sudah selesai, terbukti karena nilai arus telah disamakan dengan mengambil rata-rata ketiga fasa, sehingga menghasilkan Unbalance % = 0. Perbedaan besar pada beban antar-gardu tetap terlihat, di mana arus bervariasi dari 0 kA pada banyak titik hingga 0,217 kA pada GD PT1-AT-02.

Tabel 4. 10 Tegangan pada Gardu Distribusi (LV) Kondisi Beban Seimbang.

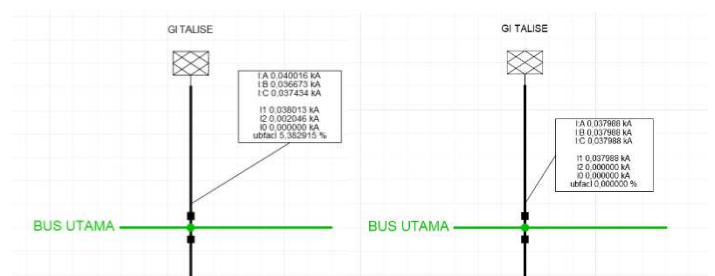
NO	Kode Gardu	Nilai Tegangan (kV)
		V (L-L)
1	GD PT1-AA	0,39788
2	GD PT1-AA-01	0,39923
3	GD PT1-AA-02	0,39962
4	GD PT1-AB-01	0,39874
5	GD PT1-AB	0,39943
6	GD PT1-AC	0,39733
7	GD PT1-AC-01	0,39875
8	GD PT1-AC-02	0,39821
9	GD PT1-AC-05	0,39893
10	GD PT1-AC-04	0,39863
11	GD PT1-AC-03	0,39803
12	GD PT1-AD	0,39653
13	GD PT1-AE	0,39656
14	GD PT1-AF-02	0,39764
15	GD PT1-AF-03	0,39865
16	GD PT1-AF-05	0,39865
17	GD PT1-AF-04	0,39865
18	GD PT1-AF-01	0,39824
19	GD PT1-AG-02	0,39811
20	GD PT1-AG	0,39355
21	GD PT1-AG-01	0,39690
22	GD PT1-AH	0,39603
23	GD PT1-AH-01	0,39632
24	GD PT1-AH-02	0,39681
25	GD PT1-AI	0,39763
26	GD PT1-AT-01	0,39761
27	GD PT1-AT-02	0,39417
28	GD PT1-AV	0,39734
29	GD PT1-AW-01	0,39819
30	GD PT1-AW-04	0,39819
31	GD PT1-AX	0,39498
32	GD PT1-AX-01	0,39730
33	GD PT1-AW-03	0,39804
34	GD PT1-AY	0,39767
35	GD PT1-AY-04	0,39798

36	GD PT1-AY-05	0,39785
37	GD FLA. 57	0,39804
38	GD PT1-AY-06	0,39788
39	GD PT1-AY-01	0,39635
40	GD PT1-AY-07	0,39786
41	GD PT1-AY-08	0,39786
42	GD PT1-AY-09	0,39781
43	GD PT1-AY-10	0,39773
44	GD PT1-AY-02	0,39497
45	GD PT1-AY-03	0,39715
46	GD PT1-AZ	0,39381
47	GD PT1-AZ-02	0,39416
48	GD PT1-AZ-01	0,39364
49	GD PT1-BA	0,39183
50	GD PT1-BA-01	0,39736
51	GD PT1-BB	0,39407
52	GD PT1-BC	0,39697
53	GD PT1-BB-02	0,39749
54	GD PT1-BC-01	0,39440

Nilai Tegangan pada sisi Tegangan Rendah untuk 59 Gardu Distribusi (GD) setelah penyeimbangan beban fasa. Analisis tegangan gardu distribusi LV memperlihatkan bahwa kualitas tegangan pada level konsumen tetap stabil dan berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Nilai tegangan berkisar 0,39 kV, yang mengindikasikan adanya voltage drop yang wajar.

C. Pembahasan

1. Arus



Gambar 4. 3 Arus Fasa dan Komponen Urutan
GI Talise Unbalance (Kiri) Balance (Kanan)
Simulasi DIgSILENT PowerFactory
Tabel 4. 11 Perbandingan Arus pada GI Talise

Kondisi	Grid	Arus (kA)			Unbalance %
		R	S	T	
Tidak Seimbang	GI	0,040016	0,036673	0,037434	5,382915
Seimbang	Talise	0,037988	0,037988	0,037988	0

- *Hitung arus rata-rata :*

$$I_{avg} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{avg} = \frac{0,040016 + 0,036673 + 0,037434}{3}$$

$$I_{avg} = 0.038041 \text{ kA}$$

- *Menghitung komponen urutan*

$$IA = 0.04002 \text{ kA} \angle -27.49^\circ$$

$$IB = 0.03667 \text{ kA} \angle -149.2^\circ$$

$$IC = 0.03743 \text{ kA} \angle 96.11^\circ$$

menjadi bilangan kompleks:

$$IA = 0.0355014 - j0.0184730$$

$$IB = -0.0314981 - j0.0187766$$

$$IC = -0.0039840 + j0.0372174$$

Rumus komponen urutan:

$$I_0 = \frac{1}{3} (IA + IB + IC)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (IA + aIB + a^2IC)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (IA + a^2IB + aIC)$$

Konstanta urutan:

$$a = -0.5 + j0.8660254,$$

$$a^2 = -0.5 - j0.8660254$$

Menghitung nilai I_0, I_1, I_2 :

$$I_0 = \frac{1}{3} ((0.0355014 - 0.0314981 - 0.0039840) + j(-0.0184730 - 0.0187766 + 0.0372174))$$

$$I_0 = 0.0000193 - j0.0000322$$

$$I_0 = 0.0000126 \text{ kA} \\ = 0.0126 \text{ A (nyaris nol)}.$$

$$I_1 = \frac{1}{3} ((0.0355014 - j0.0184730) + a(-0.0314981 - j0.0187766) + a^2(-0.0039840 + j0.0372174))$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (0.1016 - j0.0518)$$

$$I_1 = 0.037999 \text{ kA}, \angle I_2 \approx -26.8^\circ$$

$$I_2 = \frac{1}{3} ((0.0355014 - j0.0184730) + a^2(-0.0314981 - j0.0187766) + a(-0.0039840 + j0.0372174))$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (0.00475019 - j0.00386547)$$

$$I_2 = 0.0020414 \text{ kA}, \angle I_2 \approx -39.14^\circ$$

- *Persentase unbalance :*

$$I_{unb} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \times 100\%$$

$$I_{unb} = \frac{0.0020414}{0.037999} \times 100\%$$

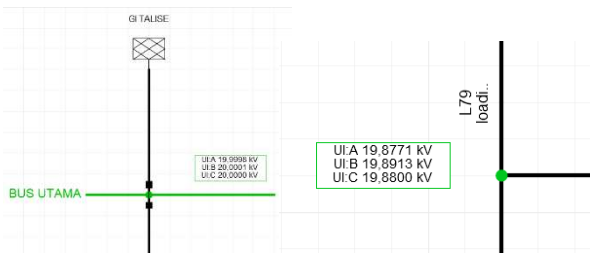
$$I_{unb} \approx 5,372\%$$

Hasil simulasi menghasilkan arus urutan positif $I_1 \approx 0,038013 \text{ kA}$ dan arus urutan negatif $I_2 \approx 0,002046 \text{ kA}$. rasio I_2 / I_1 adalah 5,38%, sedangkan perhitungan manual menghasilkan $I_1 \approx 0,037999 \text{ kA}$ dan $I_2 \approx 0,0020414 \text{ kA}$. rasio I_2 / I_1 adalah 5,372% pada kedua metode menandakan keberadaan komponen urutan negatif yang nyata, yang mengindikasikan pembebanan fasa tidak

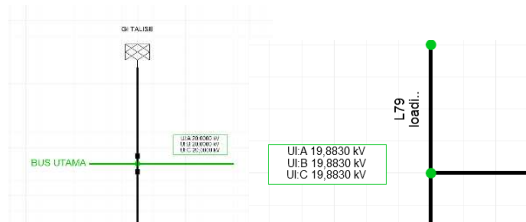
merata (fasa A lebih besar). Perbedaan numerik sangat kecil dan dapat dijelaskan oleh pembulatan angka, representasi numerik, serta perbedaan detail pemodelan di simulasi.

Pada Tabel 4.4 tampak bahwa arus tiap fasa berbeda nyata dan terdapat nilai arus netral yang tidak nol, menandakan akumulasi ketidakseimbangan pada level trafo distribusi. Setelah skenario penyeimbangan dijalankan (lihat Tabel 4.9), rata-rata nilai arus tiap fasa menjadi sama dan arus netral menjadi nol. Perbandingan ini menegaskan bahwa penyeimbangan beban pada feeder efektif menghilangkan komponen urutan negatif dan arus netral yang merugikan, sehingga menurunkan rugi-rugi dan memperbaiki kualitas daya.

2. Tegangan



Gambar 4. 4 Tegangan Pangkal (Kiri) dan Ujung (Kanan) Penyulang Flamingo Simulasi Unbalance DIgSILENT PowerFactory



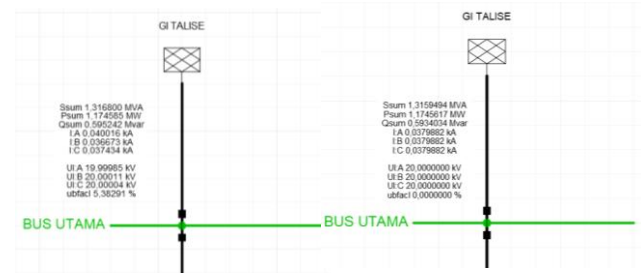
Gambar 4. 5 Tegangan Pangkal (Kiri) dan Ujung (Kanan) Penyulang Flamingo Simulasi Balance DIgSILENT PowerFactory

Tabel 4. 12 Perbandingan Tegangan pada GI Talise

Kondisi	Grid	Tegangan Pangkal (kV)			Tegangan Ujung (kV)		
		R	S	T	R	S	T
Tak Seimbang	GI	20	20	20	19,877	19,891	19,88
Seimbang	Talise	20	20	20	19,883	19,883	19,883

Analisis tegangan pada GI Talise menunjukkan bahwa pada kondisi tidak seimbang, tegangan ujung tiap fasa memiliki nilai yang sedikit berbeda, yaitu 19,877 kV pada fasa A, 19,891 kV pada fasa B, dan 19,880 kV pada fasa C,. Perbedaan ini menyebabkan variasi penurunan tegangan (voltage drop) dari pangkal 20 kV ke ujung saluran, yakni sekitar 0,615% pada fasa A, 0,545% pada fasa B, dan 0,600% pada fasa C. Setelah dilakukan penyeimbangan, seluruh fasa memiliki tegangan ujung yang hampir sama yaitu 19,883 kV dengan penurunan tegangan seragam sekitar 0,585%.

3. Daya



Gambar 4. 6 Daya GI Talise simulasi unbalance (Kiri) Balance (Kanan) DigSILENT PowerFactory

Tabel 4. 13 Perbandingan Daya Aktif, Reaktif, dan Semu pada GI Talise

Kondisi	Grid	Total daya		
		S_MVA	P_MW	Q_MVAR
Tidak Seimbang	GI	1,3168	1,174585	0,595242
Seimbang	Talise	1,315949	1,174562	0,593403

Perbedaan nilai daya semu (S) dan daya reaktif (Q) antara kondisi seimbang dan tidak seimbang disebabkan oleh munculnya arus urutan negatif pada sistem tidak seimbang. Arus ini tidak menghasilkan daya aktif, namun menambah komponen daya reaktif sehingga nilai total daya semu meningkat. Sementara itu, daya aktif (P) relatif tetap karena total energi yang diserap oleh beban tidak berubah secara signifikan. Dengan

demikian, ketidakseimbangan beban berdampak pada penurunan faktor daya sistem akibat bertambahnya daya reaktif. Hal serupa juga terjadi pada transformator distribusi di Feeder Flaminggo, di mana hasil simulasi kondisi tidak seimbang pada Tabel 4.3 dan kondisi beban seimbang pada Tabel 4.8 menunjukkan pola yang sama. Sebagai contoh, diambil salah satu trafo dengan tingkat ketidakseimbangan tertinggi, yaitu GD PT1-AI dengan tingkat unbalance sebesar 90,77%.

Tabel 4. 14 Perbandingan Daya Trafo GD PT1-AI

Kondisi	Trafo	Total daya			UNB %
		S_MVA	P_MW	Q_MVAR	
Tidak Seimbang	GD	0,003715	0,003326	0,001655	90,77
Seimbang	PT1-AI	0,003702	0,003326	0,001627	0

Trafo ini menunjukkan perbedaan arus antar fasa yang besar, menghasilkan arus urutan negatif signifikan, sehingga meningkatkan daya reaktif dan daya semu dibandingkan kondisi seimbang. Hal ini membuktikan bahwa semakin tinggi ketidakseimbangan beban, semakin besar pula peningkatan daya semu dan penurunan faktor daya pada trafo distribusi.

4. Pembebanan (Load)

Pada simulasi menggunakan DIgSILENT, diperoleh bahwa nilai pembebanan transformator pada Feeder Flaminggo menunjukkan bahwa pembebanan sistem tidak seimbang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi seimbang. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.3 untuk sistem tidak seimbang dan Tabel 4.8 untuk sistem seimbang, di mana nilai pembebanan transformator menunjukkan perbedaan yang jelas. Untuk memperkuat analisis dan mendukung hasil simulasi tersebut, dilakukan pula perhitungan pembebanan pada trafo GD PT1-AI yang memiliki tingkat ketidakseimbangan tertinggi, yaitu sebesar 90,77%, sebagai representasi pengaruh langsung ketidakseimbangan terhadap peningkatan pembebanan pada trafo distribusi.

Tabel 4. 15 Perbandingan Arus, Tegangan, dan Pembebanan Trafo GD PT1-AI

Kondisi	KVA	Arus (kA)			V (L - L) kV	LOAD %
		R	S	T		
Tak Seimbang	25	0,015	0,001	0	0,3976	42
Seimbang		0.0053333				14,87

• Pembebanan

$$Load_{trafo} = \frac{I_{fasa\ max}}{I_{nominal}} \times 100\%$$

Hitung arus nominal:

$$I_n = \frac{S_{rated}}{\sqrt{3} \times V_{L-L}}$$

$$I_n = \frac{25000}{\sqrt{3} \times 397,6}$$

$$I_n = 0,0363\ kA$$

Kondisi tidak seimbang :

$$I_{max} = 0,015\ kA$$

$$Load = \frac{0,015}{0,0363} \times 100\%$$

$$Load = 41,32\ \%$$

Kondisi seimbang :

$$I_{max} = 0,00533\ kA$$

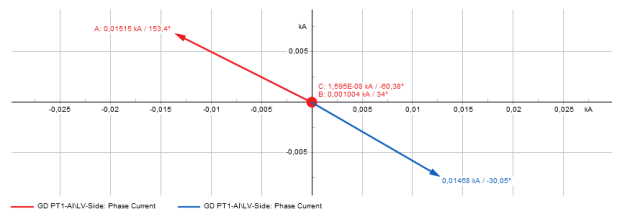
$$Load = \frac{0,00533}{0,0363} \times 100\%$$

$$Load = 14,68\ \%$$

Dari hasil perhitungan didapati bahwa DIgSILENT PowerFactory mensimulasikan nilai pembebanan trafo berdasarkan arus terbesar dari ketiga fasa dibandingkan dengan arus nominal trafo. Pada kondisi tidak seimbang, pembebanan trafo mencapai sekitar 41,3%, sedangkan pada kondisi seimbang hanya sekitar 14,87%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan arus antar fasa menyebabkan salah satu fasa bekerja lebih berat, sehingga trafo tampak lebih terbebani meskipun daya total yang disalurkan relatif sama.

5. Arus Netral

Perhitungan arus netral dilakukan pada transformator dengan tingkat ketidakseimbangan tertinggi, yaitu GD PT1-AI sebesar 90,77%, guna membuktikan hasil tersebut serta menunjukkan bahwa timbulnya arus netral disebabkan oleh kondisi beban trafo yang tidak seimbang.



Gambar 4. 7 Fasor Arus GD PT1-AI
DIGSILENT PowerFactory

• Rumus I_{Netral}

$$I_N = I_R + I_S + I_T$$

Diketahui :

$$I_R = 0,01515 \angle 153,4^\circ \text{ kA}$$

$$I_S = 0,001004 \angle 34^\circ \text{ kA}$$

$$I_T = 1,595 \times 10^{-8} \angle -60,38^\circ \text{ kA} \\ \approx 0 \text{ kA}$$

$$I_R = 0,01515 (\cos 153,4^\circ) \\ + j 0,01515 (\sin 153,4^\circ) \\ = 0,01515 (-0,89415) \\ + j 0,01515 (0,44776) \\ = -0,0135463725 \\ + j 0,006783564$$

$$I_S = 0,001004 (\cos 34^\circ) \\ + j 0,001004 (\sin 34^\circ)$$

$$= 0,001004 (0,82904) \\ + j 0,001004 (0,55919) \\ = 0,00083235615 \\ + j 0,0005614267$$

$$I_N = (-0,0135463725 \\ + 0,00083235615) +$$

$$j (0,006783564 + 0,0005614267) + 0$$

$$I_N = -0,01271401635 \\ + j 0,0073449907$$

$$I_N = \sqrt{(-0,01271401635)^2 + (0,0073449907)^2}$$

$$I_N = 0,01468 \text{ kA}$$

$$I_N = \tan^{-1} \left(\frac{0,0073449907}{-0,01271401635} \right)$$

$$I_N = 0,01468 \angle -30,01^\circ \text{ kA}$$

Kesesuaian antara hasil perhitungan manual dan simulasi tersebut mengindikasikan bahwa metode analisis yang digunakan telah tepat dan valid. Hal ini sekaligus membuktikan bahwa timbulnya arus netral pada transformator disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan beban antar fasa, yang mengakibatkan arus dari masing-masing fasa tidak saling meniadakan secara sempurna. Dalam sistem tiga fasa empat kawat, munculnya arus netral menandakan adanya komponen urutan nol yang menyebabkan sebagian daya tidak tersalurkan secara optimal. Arus ini mengalir melalui penghantar netral dan lilitan transformator. Akibatnya, efisiensi transformator dapat menurun dan proses penuaan isolasi berlangsung lebih cepat. Nilai arus netral yang relatif tinggi juga mengindikasikan bahwa beban trafo berada dalam kondisi unbalance yang signifikan, sehingga perlu dilakukan upaya penyeimbangan beban untuk mengurangi arus netral dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil simulasi pada sistem distribusi penyulang flaminggo di PT. PLN (Persero) UP3 Palu, diketahui bahwa tingkat ketidakseimbangan beban antar fasa cukup tinggi, ditunjukkan oleh perbedaan arus antar

fasa serta munculnya arus netral yang signifikan.

2. Kondisi ini menyebabkan perubahan pada nilai daya reaktif (Q) dan daya semu (S), di mana keduanya meningkat saat sistem berada pada kondisi tidak seimbang, sedangkan daya aktif (P) relatif tetap. Peningkatan ini menunjukkan adanya penurunan efisiensi dan kestabilan aliran daya. Selain itu, ketidakseimbangan beban juga menyebabkan salah satu fasa pada transformator mengalami pembebanan lebih tinggi, yang berdampak pada meningkatnya arus netral dan menurunnya efisiensi distribusi daya.
3. Hasil simulasi menggunakan DIgSILENT PowerFactory memperlihatkan bahwa kondisi seimbang menghasilkan performa sistem yang lebih stabil dengan arus netral mendekati nol serta distribusi daya yang lebih efisien, sedangkan kondisi tidak seimbang meningkatkan pembebanan dan mengganggu kinerja transformator serta kestabilan aliran daya.

B. Saran

Untuk menjaga kinerja transformator dan kestabilan sistem distribusi, disarankan agar dilakukan pemerataan beban antar fasa secara berkala, terutama pada gardu distribusi dengan tingkat ketidakseimbangan tinggi. PLN juga perlu melakukan pemantauan rutin terhadap nilai arus netral dan pembebanan transformator guna mendeteksi dini ketidakseimbangan beban yang dapat menurunkan efisiensi sistem. Penggunaan sistem pemantauan berbasis digital atau perangkat lunak analisis seperti DIgSILENT PowerFactory dapat diterapkan secara berkelanjutan untuk mengevaluasi kondisi beban dan membantu pengambilan keputusan teknis. Selain itu, perlu dilakukan studi lanjutan mengenai dampak jangka panjang ketidakseimbangan beban terhadap penurunan efisiensi transformator dan rugi daya

pada sistem distribusi agar strategi penyeimbangan dapat dirancang lebih optimal. Penataan ulang jaringan beban pada sisi konsumen, terutama pada wilayah dengan pertumbuhan beban tinggi, juga menjadi langkah efektif untuk menekan ketidakseimbangan dan meningkatkan kualitas daya sistem distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1].Yoga Prasetya, I. W., Setiawan, I. N., & Dyana Arjana, I. G. (2020). Analisis Ketidakseimbangan Beban Dan Harmonisa Pada Transformator Distribusi Mi 0096 Penyulang Abianbase. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.24843/spektrum.2020.v07.i01.p16>
- [2].Sya'roni, Z., & Rijanto, T. (2019). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV Dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah. *Teknik Elektro*, 8(1), 173–180.
- [3].Prayoga, A. B., & Suprianto, B. (2023). Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya (Losses) Dengan DIgSILENT Power Factory di PT.PLN (Persero) ULP Nguntut. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(2), 23–32. <https://doi.org/10.26740/jte.v12n2.p23-32>
- [4].Afrianda, R., Samsurizal, S., & Nurul, A. A. (2021). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi Studi Gardu PT PLN (PERSERO) Area Bekasi. *Sutet*, 10(1), 29–38. <https://doi.org/10.33322/sutet.v10i1.1277>
- [5].Yaved Pasereng Tondok, Lily Setyowaty Patras, & Fielman Lisi. (2019). Yaved Pasereng Tondok. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 8(2), 83–92.
- [6].Dan, N., Pada, L., Distribusi, T., Pt, D. I., & Sorong, P. A. (2018). Issn:2527-4724, eissn:2597-4467. Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di Pt Pln (Persero) Area Sorong, 4, 1–10.

- [7].Tandioga, R., Mulyadi, M., E.S, T. C., & Tegar, A. (2019). ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP EFISIENSI TRANSFORMATOR TIGA FASA DI PT. PLN (Persero) RAYON MAKASSAR TIMUR, PENYULANG KIMA. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 16(1), 80–88. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v16i1.1205>
- [8].Sanda, Y., Ambabunga, Y., & Pawarangan, I. (2022). Analisis Kinerja Transformator Distribusi 50 kVA di Lembang Bori' Ranteletok. *Techné : Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 21(1), 1–16. <https://doi.org/10.31358/techne.v21i1.281>