

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Pada bab ini disajikan hasil pengolahan dan analisis data jaringan distribusi Muara Labuh setelah dilakukan pengintegrasian PLTM Waskita Sangir Energi (WSE) ke dalam sistem tenaga listrik. Pembahasan difokuskan pada analisis dampak pengintegrasian dan penambahan 1 unit pembangkit pada PLTM WSE terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya (*losses*). Proses simulasi dan analisis sistem dilakukan menggunakan software DIgSILENT PowerFactory.

4.1 Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil data-data dari jaringan distribusi Muara Labuh. Berikut data jaringan yang diambil untuk penelitian.

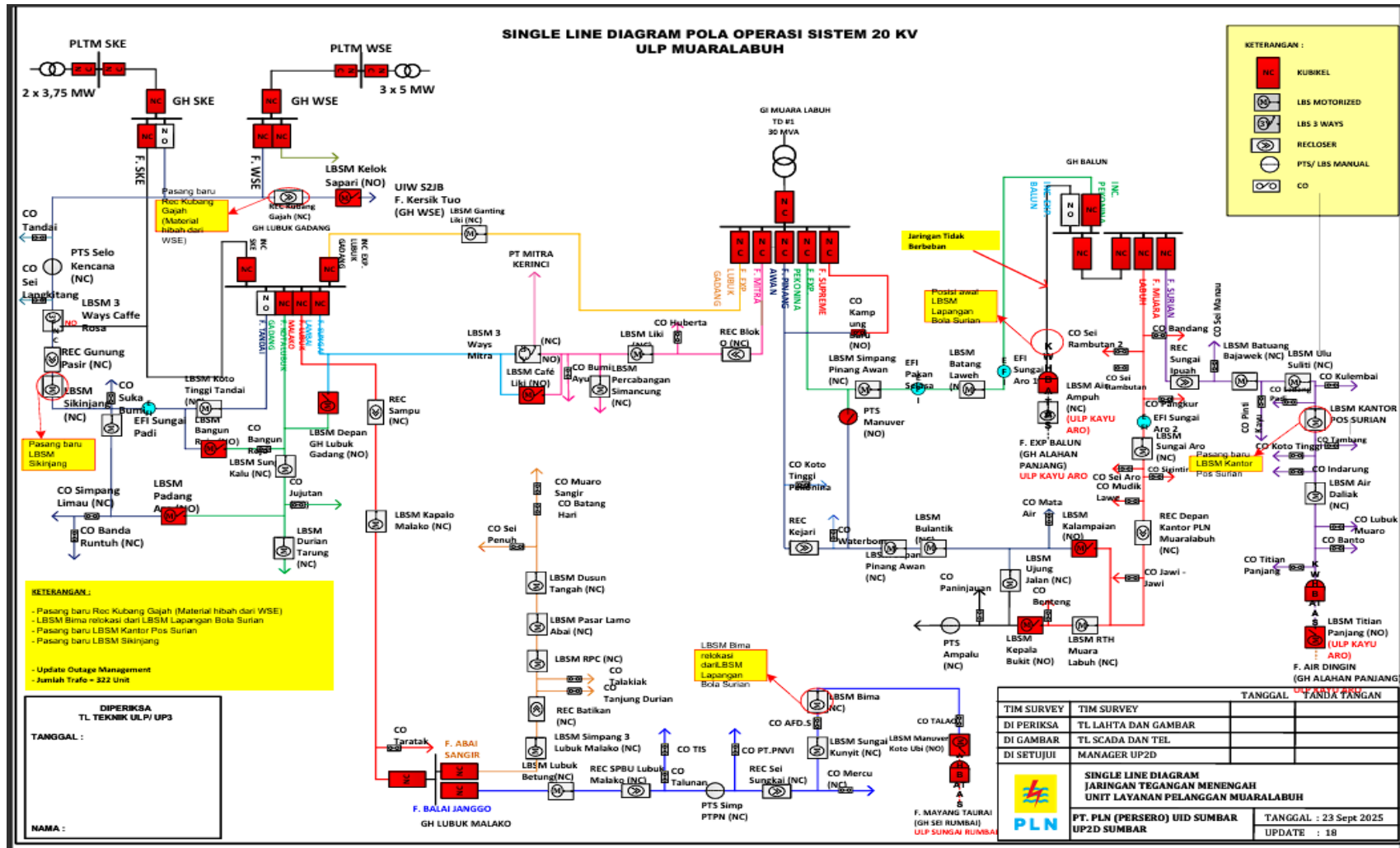
4.1.1 *Single Line Diagram* Sistem Distribusi 20 kV PLN ULP Muara Labuh

PT PLN (Persero) ULP Muara Labuh melayani sistem distribusi tenaga listrik di wilayah Kabupaten Solok Selatan. Penyaluran energi listrik pada sistem distribusi tersebut disuplai oleh Gardu Induk Muara Labuh dan PLTM Selo Kencana Energi (SKE) melalui jaringan distribusi 20 kV dengan total 13 penyulang. Data pembebanan pada masing-masing penyulang sistem distribusi 20 kV Muara Labuh pada tahun 2026 dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Data Pembebanan Sistem Distribusi 20 kV Muara Labuh

No	Penyulang	Sumber (GI/GH)	Beban (Ampere)	Panjang Jaringan (kms)
1	F. Mitra	GI Muara Labuh	30	28,51
2	F. Pinang Awan	GI Muara Labuh	35	33,373
3	F. Supreme	GI Muara Labuh	1	5,57
4	F. Exp Pekonina	GI Muara Labuh	1	36,876
5	F. Kota Lubuk Gadang	GH Lubuk Gadang	24	17,496
6	F. Lubuak Malako	GH Lubuk Gadang	21	29,941
7	F. Sei Lambai	GH Lubuk Gadang	8	5,25
8	F. Tandai	GH Lubuk Gadang	26	75,488
9	F. Abai Sangir	GH Lubuk Malako	30	65,824
10	F. Balai Jango	GH Lubuk Malako	29	69,058
11	F. Muaralabuh	GH Balun	80	43,4487
12	F. Surian	GH Balun	47	72,01

Berikut gambar 4.1 menampilkan single line diagram sistem distribusi 20 kV ULP Muara Labuh.



Gambar 4. 1 SLD 20 kV ULP Muara Labuh

4.1.1.1 Data External Grid

Data suplai dari *external grid* ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Suplai *External Grid*

Gardu Induk	Parameter	Nilai
GI Muara Labuh	MVA Hubung Singkat	1124,707 MVA
	Arus Hubung Singkat	4,329 kA
	Tegangan Nominal	150 kV

4.1.1.2 Data Generator

Data masing-masing generator PLTM SKE dan PLTM WSE pada jaringan distribution Muara Labuh ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data Generator pada Jaringan Distribusi Muara Labuh

Parameter	PLTM WSE	PLTM SKE
Jumlah Unit	3	2
Daya Semu	6,5 MVA	4,6875 MVA
Daya Aktif	5 MW	3,75 MW
Tegangan Nominal	6,3 kV	6,6 kV
Limit Daya Reaktif	0,051 p.u. s/d 0,51 p.u.	0,051 p.u. s/d 0,51 p.u.
Faktor Daya	0,8	0,8
Xd	1 p.u.	1 p.u.
Xq	0,6 p.u.	0,6 p.u.
X0	0,062 p.u.	0,062 p.u.
X2	0,31 p.u.	0,31 p.u.
Xd'	0,32 p.u.	0,32 p.u.
Xd''	0,31 p.u.	0,31 p.u.

4.1.1.3 Data Transformator

Data masing-masing transformator pada jaringan distribusi Muara Labuh ditunjukkan pada tabel 4.4.

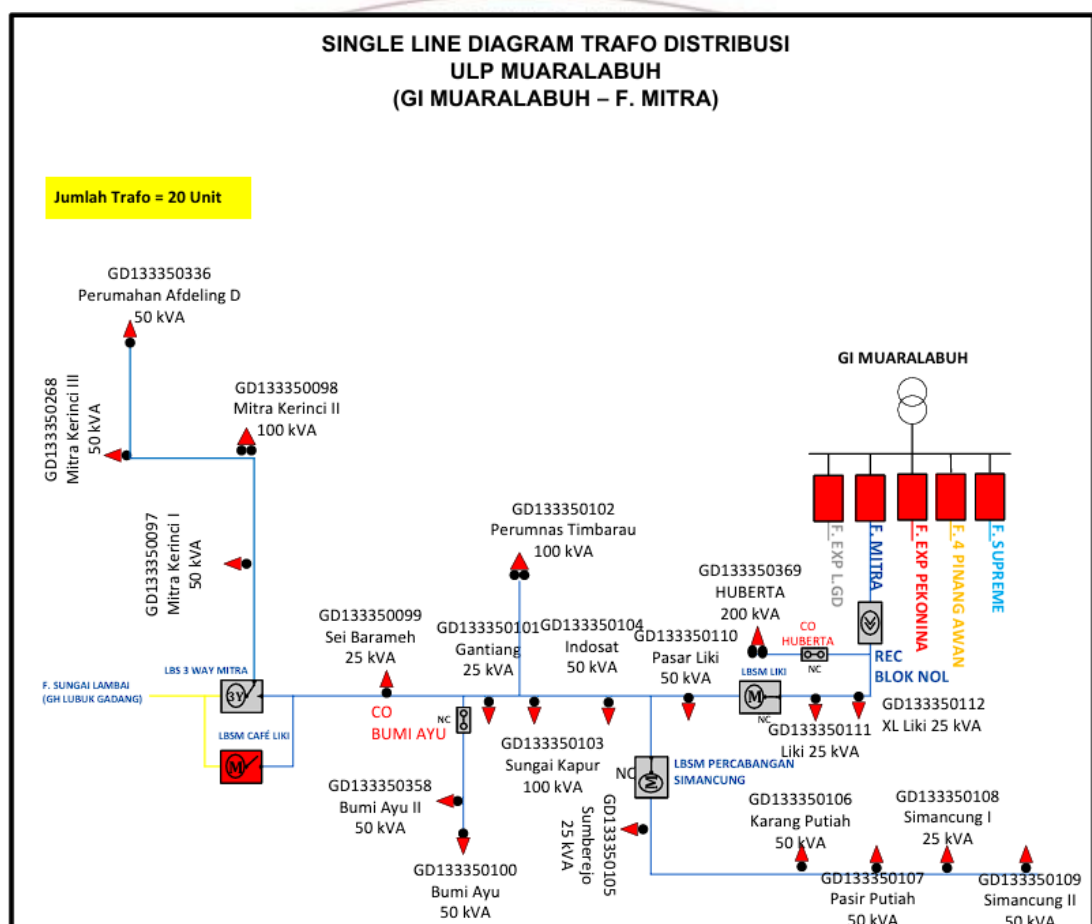
Tabel 4. 4 Data Transformator pada Jaringan Distribusi Muara Labuh

Parameter	TD 1 GI Muara Labuh	TD PLTM WSE	TD PLTM SKE
Jumlah Unit	1	3	2
Daya	30 MVA	7,5 MVA	6 MVA
Rasio	150/20 kV	6,3/20 kV	6,6/20 kV

Parameter	TD 1 GI Muara Labuh	TD PLTM WSE	TD PLTM SKE
Koneksi	YNyn0+d	YNd5	YNd5
X1 (pu)	0,09984 pu	0,07101	0,07101
R1 (pu)	0,00868 pu	0,00835	0,00835
X0 (pu)	0,0843 pu	0,07101	0,07101
R0 (pu)	0,00723 pu	0,00835	0,00835

4.1.2 Single Line Diagram Penyulang Mitra

Pada penyulang Mitra memiliki 20 gardu distribusi sesuai gambar 4.2 berikut.



Gambar 4. 2 SLD Penyulang Mitra

Tabel 4.5 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Mitra.

Tabel 4. 5 Data pembebanan penyulang Mitra

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0112	25	0,024
2	GD1 0111	25	0,0235
3	GD 0369	200	0,188
4	GD1 0110	50	0,0475
5	GD 010	25	0,0232
6	GD 0106	50	0,0468
7	GD 0107	50	0,047
8	GD 0108	25	0,0236
9	GD 0109	50	0,0465
10	GD1 0104	50	0,047
11	GD 0103	100	0,093
12	GD 0101	25	0,0235
13	GD1 0102	100	0,092
14	GD 0358	50	0,046
15	GD 0100	50	0,0465
16	GD 0099	25	0,021
17	GD 0097	50	0,0415
18	GD 0098	100	0,081
19	GD 0268	50	0,04
20	GD 0336	50	0,03763
Total		1.150 kVA	1,03923

Berdasarkan tabel 4.5 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Mitra adalah sebesar 1.150 kVA atau 1,15 MVA dengan total pembebanan sebesar 1,03923 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 Data beban dan saluran penyulang Mitra

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GI Muara Labuh	REC Blok Nol	0,472	AAAC	70

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
2	REC Blok Nol	Node 1 Mitra	0,472	AAAC	70
3	Node 1 Mitra	CO Huberta	0,472	AAAC	70
4	CO Huberta	GD 0369	1,311	AAAC	70
5	Node 1 Mitra	GD 0112	0,472	AAAC	70
6	GD 0112	GD 0111	0,472	AAAC	70
7	GD 0111	LBS LIKI	0,472	AAAC	70
8	LBS LIKI	GD 0110	1,268	AAAC	70
9	GD 0110	LBS Percabangan Simuncung	1,268	AAAC	70
10	LBS Percabangan Simuncung	GD 0105	1,336	AAAC	70
11	GD 0105	GD 0106	1,336	AAAC	70
12	GD 0106	GD 0107	1,336	AAAC	70
13	GD 0107	GD 0108	1,336	AAAC	70
14	GD 0108	GD 0109	1,336	AAAC	70
15	LBS Percabangan Simuncung	GD 0104	0,626	AAAC	70
16	GD 0104	GD 0398	0,626	AAAC	70
17	GD 0398	GD 0103	0,626	AAAC	70
18	GD 0103	Node 2 Mitra	0,626	AAAC	70
19	Node 2 Mitra	GD 0102	0,379	AAAC	70
20	Node 2 Mitra	GD 0101	0,713	AAAC	70
21	GD 0101	CO Bumi Ayu	0,713	AAAC	70
22	CO Bumi Ayu	GD 0358	0,671	AAAC	70
23	GD 0358	GD 0100	0,671	AAAC	70
24	CO Bumi Ayu	GD 0099	1,757	AAAC	70
25	GD 0099	LBS 3 Ways Mitra	0,03	AAAC	70
26	LBS 3 Ways Mitra	GD 0097	4,5	AAAC	70

Tabel 4. 7 Data pembebanan penyulang Pinang Awan

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0372	100	0,0725
2	GD 0113	50	0,036
3	GD 0117	50	0,0355
4	GD 0118	50	0,035
5	GD 0119	100	0,071
6	GD 0122	25	0,0172
7	GD 0114	50	0,034
8	GD 0387	25	0,0168
9	GD 0115	50	0,0335
10	GD 0286	50	0,033
11	GD 0120	25	0,0162
12	GD 0121	100	0,063
13	GD 0123	50	0,03
14	GD 0124	50	0,0295
15	GD 0125	50	0,029
16	GD 0078	50	0,0285
17	GD 0077	50	0,028
18	GD 0076	50	0,0275
19	GD1 0322	50	0,027
20	GD 0075	50	0,025
21	GD 0074	100	0,048
22	GD 0073	100	0,047
23	GD 0072	50	0,023
24	GD 0071	50	0,0225
25	GD 0070	160	0,072
26	GD 0069	50	0,0215
27	GD 0085	50	0,0205
28	GD 0086	100	0,041
29	GD 0087	50	0,02
30	GD 0088	50	0,0195
31	GD 0089	100	0,0385
32	GD 0091	160	0,061

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
33	GD1 0092	100	0,038
34	GD 0093	50	0,0185
35	GD 0090	160	0,033236
Total		2.405 kVA	1,212436 MVA

Berdasarkan tabel 4.7 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Pinang Awan adalah sebesar 2.405 kVA atau 2,405 MVA dengan total pembebanan sebesar 1,212436 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 8 Data beban dan saluran penyulang Pinang Awan

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GI Muara Labuh	Node 1 Pinang Awan	0,236	AAAC	150
2	Node 1 Pinang Awan	Node 2 Pinang Awan	0,236	AAAC	150
3	Node 2 Pinang Awan	GD 0372	0,472	AAAC	150
4	Node 2 Pinang Awan	GD 0113	0,472	AAAC	150
5	GD 0113	CO Koto Tinggi Pekonina	0,472	AAAC	150
6	CO Koto Tinggi Pekonina	GD 0387	0,026	AAAC	150
7	GD 0387	GD 0114	0,026	AAAC	150
8	GD 0114	GD 0115	0,026	AAAC	150
9	GD 0115	GD 0286	0,026	AAAC	150
10	CO Koto Tinggi Pekonina	GD 0117	0,04	AAAC	150
11	GD 0117	REC Kejari	0,04	AAAC	150

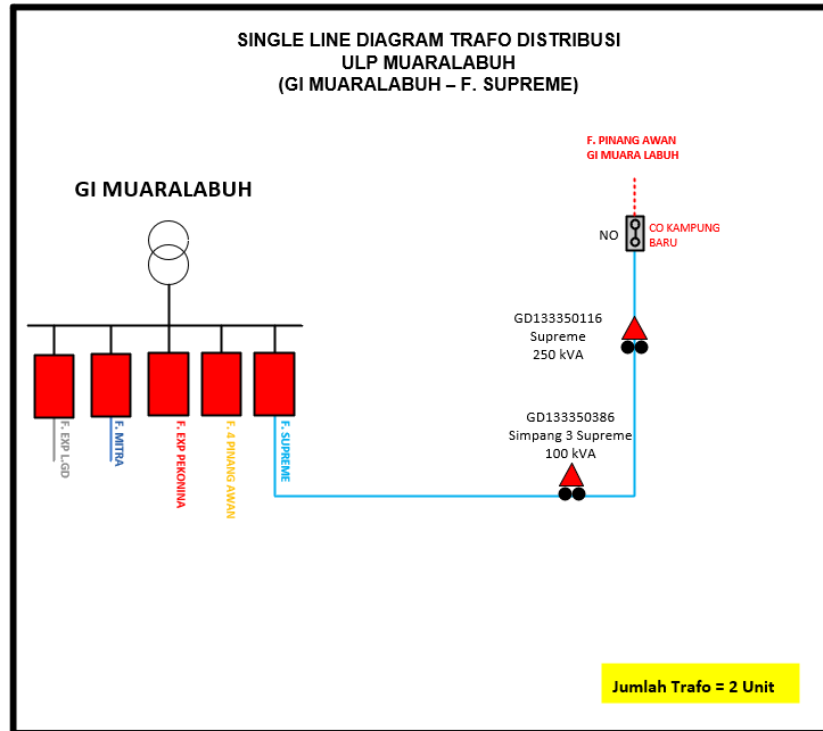
NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
12	REC Kejari	GD 0118	0,04	AAAC	150
13	GD 0118	Node 2	0,04	AAAC	150
14	Node 2 Pinang Awan	GD 0119	0,04	AAAC	150
15	Node 2 Pinang Awan	Node 3 Pinang Awan	0,04	AAAC	150
16	Node 3 Pinang Awan	CO Waterboom	0,244	AAAC	150
17	CO Waterboom	GD 0120	0,455	AAAC	150
18	GD 0120	GD 0121	0,769	AAAC	150
19	Node 3 Pinang Awan	GD 0122	0,04	AAAC	150
20	Node 3 Pinang Awan	Node 4 Pinang Awan	0,244	AAAC	150
21	GD 0122	LBS Manuver	2,63	AAAC	150
22	Node 4 Pinang Awan	LBS Sapan Pinang Awan	2,63	AAAC	150
23	LBS Sapan Pinang Awan	GD 0123	1,659	AAAC	150
24	GD 0123	GD 0124	1,659	AAAC	150
25	GD 0124	GD 0125	1,957	AAAC	150
26	GD 0125	LBS Bulantik	1,45	AAAC	150
27	LBS Bulantik	GD 0078	0,078	AAAC	150
28	GD 0078	GD 0077	0,078	AAAC	150
29	GD 0077	GD 0076	0,078	AAAC	150
30	GD 0076	Node 5 Pinang Awan	0,078	AAAC	150
31	Node 5 Pinang Awan	GD 0322	0,078	AAAC	150
32	GD 0322	GD 0075	0,078	AAAC	150
33	GD 0075	GD 0074	0,078	AAAC	150
34	GD 0074	CO Mata Air	0,078	AAAC	150
35	CO Mata Air	GD 0073	0,078	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
36	CO Mata Air	GD 0072	0,078	AAAC	150
37	GD 0072	GD 0071	0,078	AAAC	150
38	GD 0071	GD 0070	0,078	AAAC	150
39	GD 0070	GD 0069	0,078	AAAC	150
40	GD 0069	LBS Kelampaian	0,74	AAAC	150
41	Node 5 Pinang Awan	LBS Ujung Jalan	1,844	AAAC	150
42	LBS Ujung Jalan	Node 6 Pinang Awan	0,078	AAAC	150
43	Node 6 Pinang Awan	GD 0091	0,08	AAAC	150
44	Node 6 Pinang Awan	GD 0090	0,68	AAAC	150
45	GD 0090	Node 7 Pinang Awan	0,68	AAAC	150
46	Node 7 Pinang Awan	GD 0092	1,864	AAAC	150
47	GD 0092	GD 0093	1,864	AAAC	150
48	Node 7 Pinang Awan	GD 0089	1,36	AAAC	150
49	GD 0089	GD 0088	1,36	AAAC	150
50	GD 0088	GD 0087	1,36	AAAC	150
51	GD 0087	GD 0086	1,36	AAAC	150
52	GD 0086	GD 0085	1,36	AAAC	150
53	GD 0085	LBS Kepala Bukit	1,76	AAAC	150
Total			33,373		

Berdasarkan tabel 4.8 di atas total panjang penyulang Pinang Awan adalah 33,373 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm².

4.1.4 Single Line Diagram Penyulang Supreme

Pada penyulang Supreme memiliki 2 gardu distribusi sesuai gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 SLD Penyulang Supreme

Tabel 4.9 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Supreme.

Tabel 4. 9 Data pembebanan penyulang Supreme

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0386	100	0,0105
2	GD 0116	250	0,02414102
Total		350 kVA	0,03464102 MVA

Berdasarkan tabel 4.9 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Supreme adalah sebesar 350 kVA atau 0,35 MVA dengan total pembebanan sebesar 0,03464102 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.10 berikut.

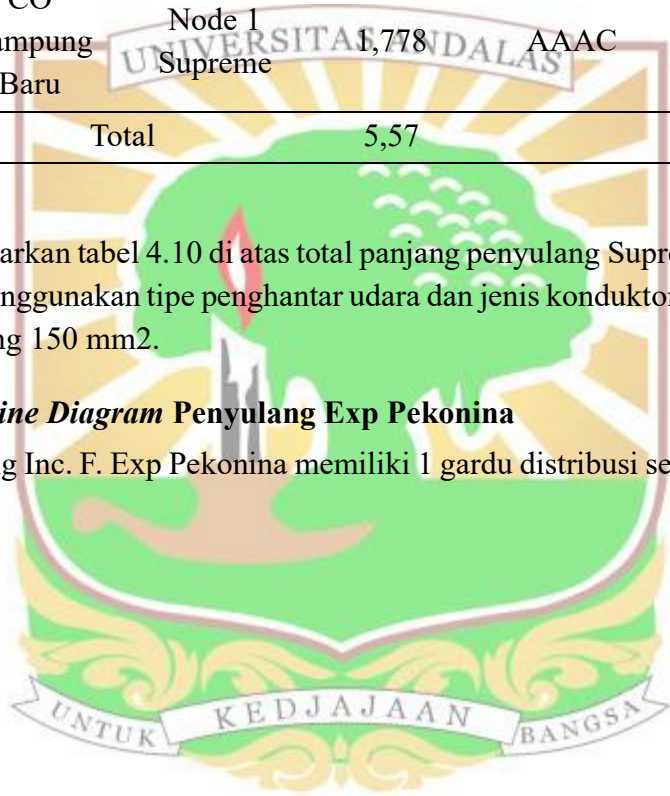
Tabel 4. 10 Data beban dan saluran penyulang Supreme

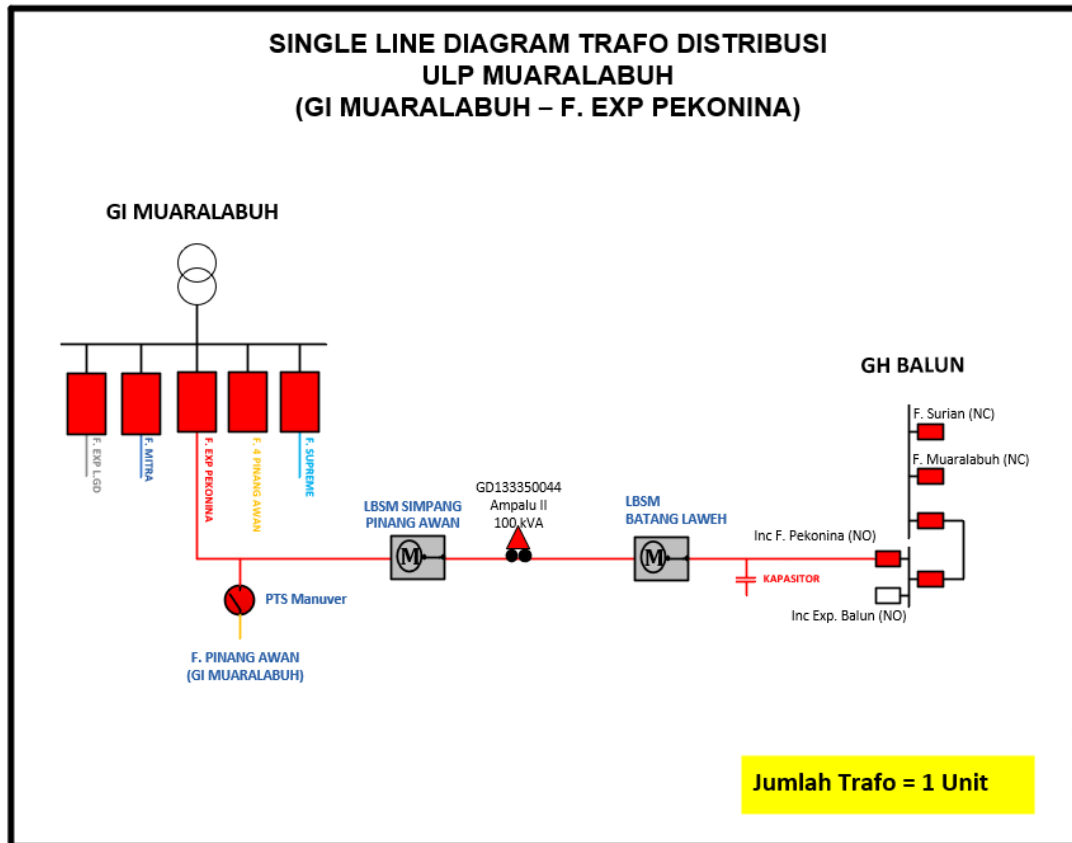
NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GI Muara Labuh	GD 0386	0,236	AAAC	150
2	GD 0386	GD 0116	1,778	AAAC	150
3	GD 0116	CO Kampung Baru	1,778	AAAC	150
4	CO Kampung Baru	Node 1 Supreme	1,778	AAAC	150
Total			5,57		

Berdasarkan tabel 4.10 di atas total panjang penyulang Supreme adalah 5,57 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm².

4.1.5 Single Line Diagram Penyulang Exp Pekonina

Pada penyulang Inc. F. Exp Pekonina memiliki 1 gardu distribusi sesuai gambar 4.5 berikut.





Gambar 4. 5 SLD Penyulang Exp. Pekonina

Tabel 4.11 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Inc. F. Exp Pekonina.

Tabel 4. 11 Data pembebanan penyulang Exp Pekonina

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	Ampalu II	100	0,03464102
	Total	100 kVA	0,03464102 MVA

Berdasarkan tabel 4.11 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Inc. F. Exp Pekonina adalah sebesar 100 kVA atau 0,1 MVA dengan total pembebanan sebesar 0,03464102 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.12 berikut.

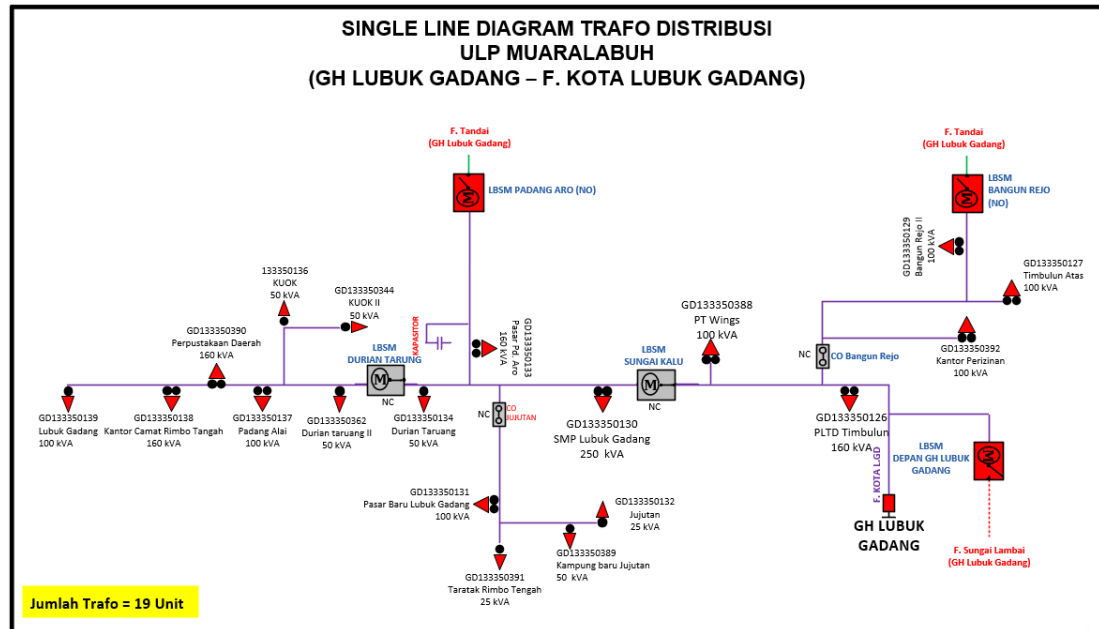
Tabel 4. 12 Data beban dan saluran penyulang Exp Pekonina

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GI MuaraLabuh	Node 1 Exp Pekonina	2,93	AAAC	240
2	Node 1 Exp Pekonina	LBS Manuver	2,63	AAAC	240
3	Node 1 Exp Pekonina	LBS Simpang Pinang Awan	6,259	AAAC	240
4	LBS Simpang Pinang Awan	GD 0044	12,518	AAAC	240
5	GD 0044	LBS Batang Laweh	6,259	AAAC	240
6	LBS Batang Laweh	Kapasitor	0,021	AAAC	240
7	Kapasitor	GH Balun	6,259	AAAC	240
Total			36,876		

Berdasarkan tabel 4.12 di atas total panjang penyulang Inc. F. Exp Pekonina adalah 36,876 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 240 mm².

4.1.6 Single Line Diagram Penyulang Kota Lubuk Gadang

Pada penyulang Kota Lubuk Gadang memiliki 19 gardu distribusi sesuai gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 6 SLD Penyulang Kota Lubuk Gadang

Tabel 4.13 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Kota Lubuk Gadang.

Tabel 4. 13 Data pembebanan penyulang Kota Lubuk Gadang

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0126	160	0,088
2	GD 0392	100	0,0545
3	GD 0127	100	0,05125
4	GD 0129	100	0,05
5	GD 0388	100	0,0505
6	GD 0130	250	0,138
7	GD 0131	100	0,0442
8	GD 0132	25	0,0098
9	GD 0389	50	0,0195
10	GD 0391	25	0,01025
11	GD 0133	160	0,0775
12	GD 0134	50	0,0198
13	GD 0362	50	0,02
14	GD 0137	100	0,035
15	GD 0344	50	0,0145

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
16	GD 0136	50	0,015
17	GD 0390	160	0,0555
18	GD 0138	160	0,05605
19	GD 0139	100	0,0220344
Total		1.890 kVA	0,8313844 MVA

Berdasarkan tabel 4.13 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Kota Lubuk Gadang adalah sebesar 1890 kVA atau 1.89 MVA dengan total pembebanan sebesar 0,8313844 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.14 berikut.

Tabel 4. 14 Data beban dan saluran penyulang Kota Lubuk Gadang

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GH Lubuk Gadang	Node 1 Kota	0,028	AAAC	70
2	Node 1 Kota	LBS Depan GH Lubuk Gadang	0,013	AAAC	70
3	Node 1 Kota	GD 0126	0,028	AAAC	70
4	GD 0126	Node 2 Kota	0,028	AAAC	70
5	Node 2 Kota	CO Bangun Rejo	0,059	AAAC	70
6	CO Bangun Rejo	Node 3 Kota	0,703	AAAC	70
7	Node 3 Kota	GD 0392	0,703	AAAC	70
8	Node 3 Kota	Node 4 Kota	0,703	AAAC	70
9	Node 4 Kota	GD 0127	0,703	AAAC	70

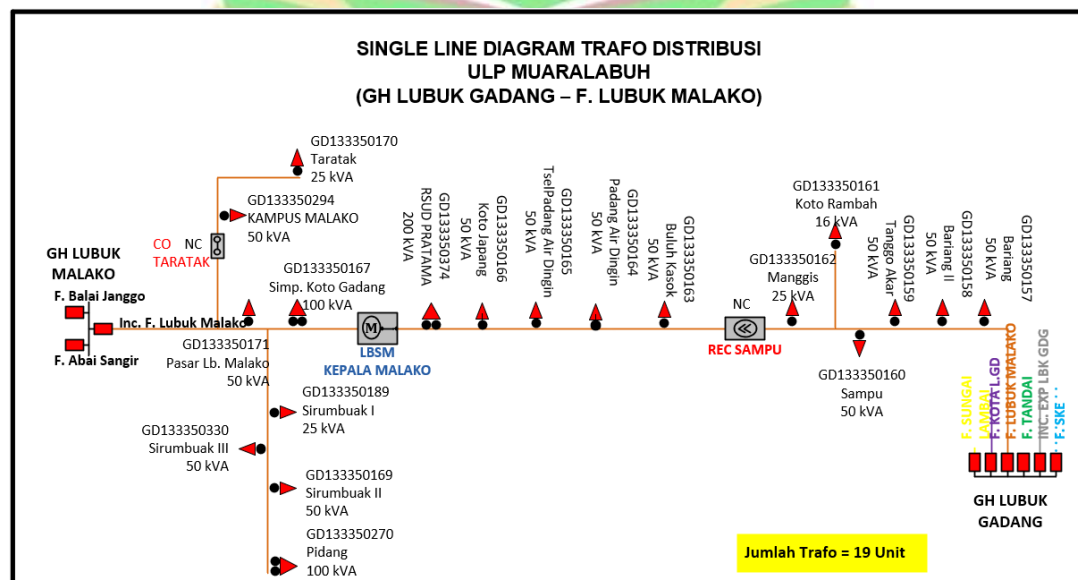
NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
10	Node 4 Kota	GD 0129	0,703	AAAC	70
11	GD 0129	LBS Bangun Rejo	0,703	AAAC	70
12	Node 2 Kota	Node 5 Kota	0,246	AAAC	70
13	Node 5 Kota	GD 0388	0,246	AAAC	70
14	Node 5 Kota	LBS Sungai Kalu	0,246	AAAC	70
15	LBS Sungai Kalu	GD 0130	0,364	AAAC	70
16	GD 0130	Node 6 Kota	0,364	AAAC	70
17	Node 6 Kota	CO Jujutan	0,134	AAAC	70
18	CO Jujutan	GD 0131	0,134	AAAC	70
19	GD 0131	Node 7 Kota	0,134	AAAC	70
20	Node 7 Kota	GD 0389	0,72	AAAC	70
21	GD 0389	GD 0132	0,72	AAAC	70
22	Node 7 Kota	GD 0391	1,05	AAAC	70
23	Node 6 Kota	Node 8 Kota	0,74	AAAC	70
24	Node 8 Kota	GD 0133	0,123	AAAC	70
25	GD 0133	LBS Padang Aro	0,123	AAAC	70
26	Node 8	GD 0134	0,299	AAAC	70
27	GD 0134	LBS Durian Tarung	0,299	AAAC	70

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
28	LBS Durian Tarung	GD 0362	2,39	AAAC	70
29	GD 0362	Node 9 Kota	2,39	AAAC	70
30	Node 9 Kota	GD 0136	0,44	AAAC	70
31	GD 0136	GD 0344	0,44	AAAC	70
32	Node 9 Kota	GD 0137	0,38	AAAC	70
33	GD 0137	GD 0390	0,38	AAAC	70
34	GD 0390	GD 0138	0,38	AAAC	70
35	GD 0138	GD 0139	0,38	AAAC	70
Total			17,496		

Berdasarkan tabel 4.14 di atas total panjang penyulang Kota Lubuk Gadang adalah 17,496 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 70 mm².

4.1.7 Single Line Diagram Penyulang Lubuk Malako

Pada penyulang Lubuk Malako memiliki 19 gardu distribusi sesuai gambar 4.7 berikut.



Gambar 4. 7 SLD Penyulang Lubuk Malako

Tabel 4.15 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Lubuk Malako.

Tabel 4. 15 Data pembebanan penyulang Lubuk Malako

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0157	50	0,0265
2	GD 0158	50	0,0285
3	GD 0159	50	0,024
4	GD 0160	50	0,031
5	GD 0161	16	0,0115
6	GD 0162	25	0,0105
7	GD 0163	50	0,0335
8	GD 0164	50	0,0295
9	GD 0165	50	0,0365
10	GD 0166	50	0,0275
11	GD 0374	200	0,158
12	GD 0167	100	0,0645
13	GD 0189	25	0,0095
14	GD 0330	50	0,0255
15	GD1 0169	50	0,0225
16	GD 0270	100	0,0525
17	GD 0171	50	0,038
18	GD 0294	50	0,0415
19	GD 0170	25	0,0164613
Total		1.141 kVA	0,7274613 MVA

Berdasarkan tabel 4.15 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Lubuk Malako adalah sebesar 1.141 kVA atau 1.141 MVA dengan total pembebanan sebesar 0,7274613 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.16 berikut.

Tabel 4. 16 Data beban dan saluran penyulang Lubuk Malako

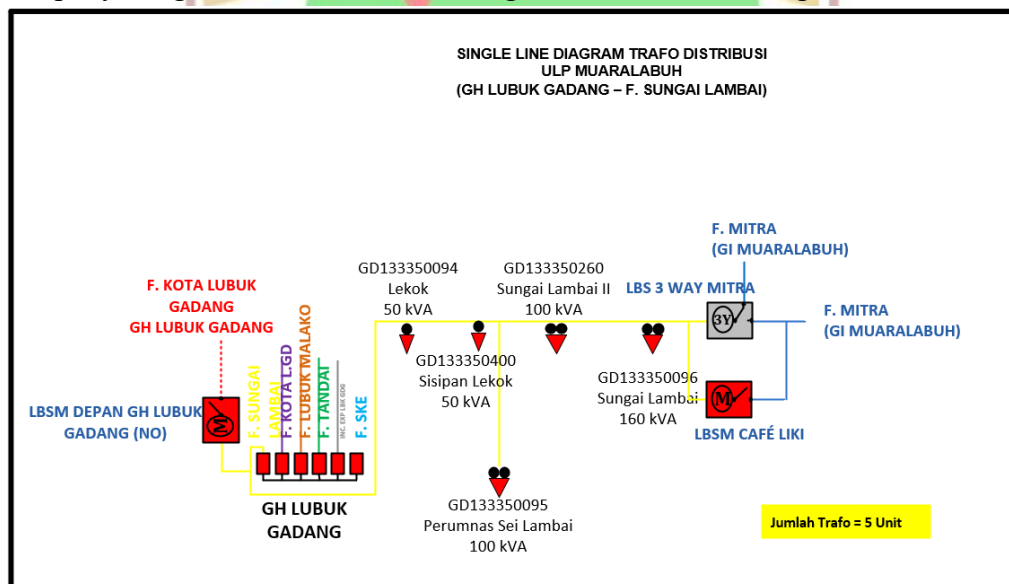
NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GH Lubuk Gadang	GD 0157	5,094	AAAC	240
2	GD 0157	GD 0158	1,657	AAAC	240
3	GD 0158	GD 0159	1,657	AAAC	240
4	GD 0159	GD 0160	0,352	AAAC	240
5	GD 0160	Node 1 L. Malako	0,328	AAAC	240
6	Node 1 L. Malako	GD 0161	0,401	AAAC	240
7	Node 1 L. Malako	GD 0162	0,788	AAAC	240
8	GD 0162	REC Sampu	0,788	AAAC	240
9	REC Sampu	GD 0163	0,576	AAAC	240
10	GD 0163	GD 0164	0,959	AAAC	240
11	GD 0164	GD 0165	0,865	AAAC	240
12	GD 0165	GD 0166	2,566	AAAC	240
13	GD 0166	GD 0374	4,79	AAAC	240
14	GD 0374	LBS Kepala Malako	0,471	AAAC	240
15	LBS Kepala Malako	GD 0167	0,471	AAAC	240
16	GD 0167	Node 2 L. Malako	1,62	AAAC	240
17	Node 2 L. Malako	GD 0189	0,341	AAAC	240
18	GD 0189	GD 0330	0,341	AAAC	240
19	GD 0330	GD 0169	0,341	AAAC	240
20	GD 0169	GD 0270	0,341	AAAC	240
21	Node 2 L. Malako	GD 0171	0,104	AAAC	240
22	GD 0171	Node 3 L. Malako	0,104	AAAC	240

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
23	Node 3 L. Malako	CO Taratak	1,803	AAAC	240
24	CO Taratak	GD 0294	1,806	AAAC	240
25	GD 0294	GD 0170	0,841	AAAC	240
26	Node 3 L. Malako	GH Lubuk Malako	0,536	AAAC	240
Total			29,941		

Berdasarkan tabel 4.16 di atas total panjang penyulang Lubuk Malako adalah 29,941 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 240 mm².

4.1.8 Single Line Diagram Penyulang Sei. Lambai

Pada penyulang Sei. Lambai memiliki 5 gardu distribusi sesuai gambar 4.8 berikut.



Gambar 4. 8 SLD Penyulang Sei. Lambai

Tabel 4.17 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Sei. Lambai.

Tabel 4. 17 Data pembebanan penyulang Sei. Lambai

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0094	50	0,0325

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
2	GD 0400	50	0,032
3	GD 0095	100	0,06
4	GD 0260	100	0,059
5	GD 0096	160	0,0936281
Total		460 kVA	0,2771281 MVA

Berdasarkan tabel 4.17 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Sei. Lambai adalah sebesar 460 kVA atau 0,46 MVA dengan total pembebanan sebesar 0,2771281 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.18 berikut.

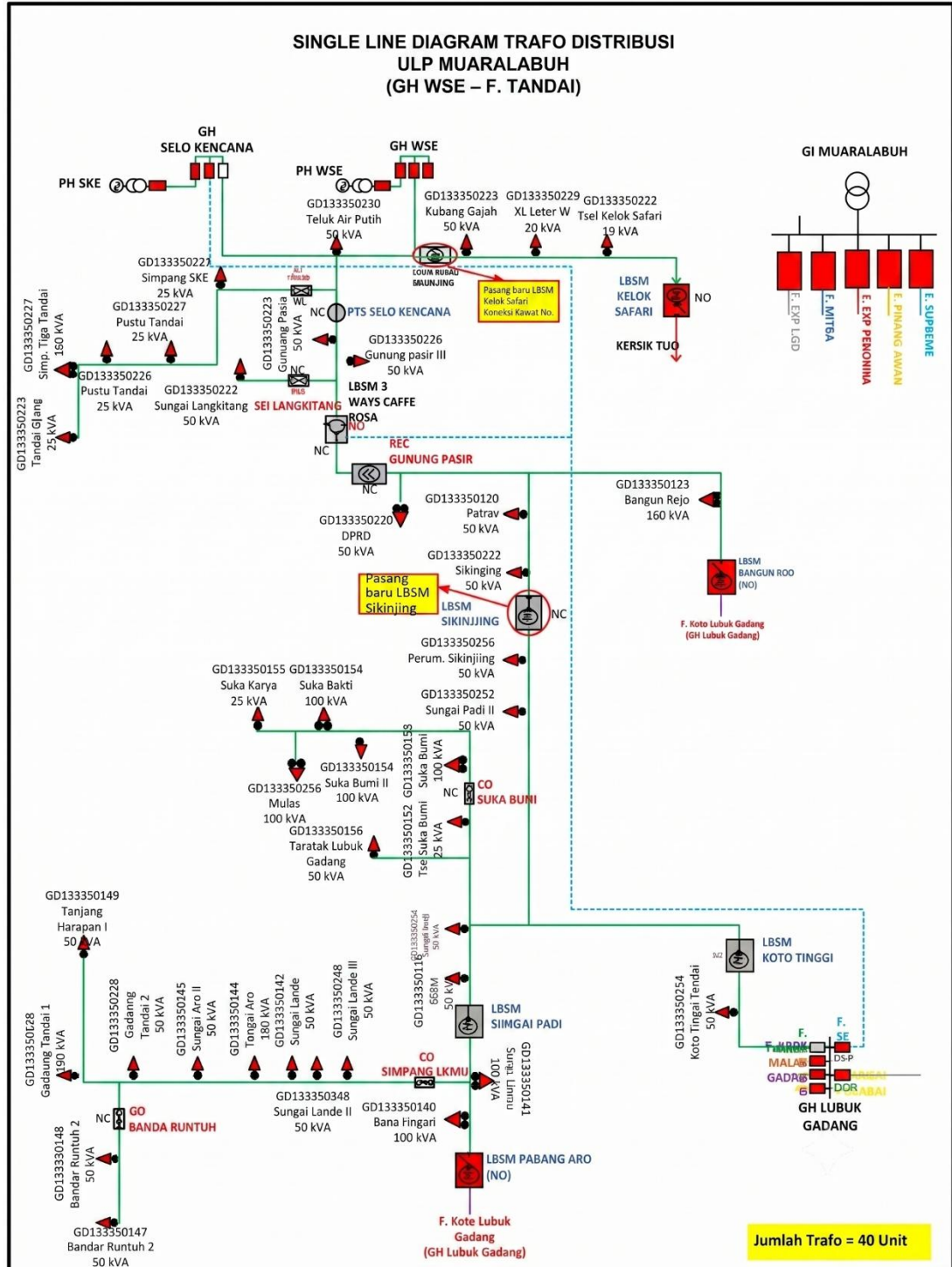
Tabel 4. 18 Data beban dan saluran penyulang Sei. Lambai

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm2)
1	GH Lubuk Gadang	LBS Depan GH Lubuk Gadang	0,472	AAAC	70
2	LBS Depan GH Lubuk Gadang	GD 0094	0,474	AAAC	70
3	GD 0094	GD 0400	0,946	AAAC	70
4	GD 0400	Node 1 Sei Lambai	0,946	AAAC	70
5	Node 1 Sei Lambai	GD 0095	0,387	AAAC	70
6	Node 1 Sei Lambai	GD 0260	0,675	AAAC	70
7	GD 0260	GD 0096	0,675	AAAC	70
8	GD 0096	LBS 3 Ways Mitra	0,675	AAAC	70
Total			5,25		

Berdasarkan tabel 4.18 di atas total panjang penyulang Sei. Lambai adalah 5,25 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 70 mm².

4.1.9 Single Line Diagram Penyulang Tandai

Pada penyulang Tandai memiliki 40 gardu distribusi sesuai gambar 4.9 berikut.



Gambar 4. 9 SLD Penyulang Tandai

Tabel 4.19 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Tandai.

Tabel 4. 19 Data pembebanan penyulang Tandai

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0128	160	0,0928
2	GD1 0141	160	0,0992
3	GD 0140	100	0,055
4	GD 0220	50	0,024
5	GD 0222	50	0,021
6	GD 0254	50	0,025
7	GD 0150	50	0,0325
8	GD 0151	50	0,0225
9	GD 0230	50	0,019
10	GD 0231	50	0,02
11	GD 0153	100	0,045
12	GD 0360	100	0,038
13	GD 0156	100	0,041
14	GD 0154	100	0,035
15	GD 0221	50	0,016
16	GD 0356	50	0,02
17	GD 0252	50	0,017
18	GD 0284	50	0,015
19	GD 0143	50	0,014
20	GD 0348	50	0,0125
21	GD 0142	50	0,0155
22	GD 0368	50	0,0135
23	GD 0223	50	0,0145
24	GD 0282	50	0,0165
25	GD 0155	25	0,00625
26	GD 0152	25	0,0105
27	GD 0224	25	0,007
28	GD 0229	25	0,0095
29	GD 0144	100	0,024
30	GD1 0148	100	0,021

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
31	GD 0227	100	0,019
32	GD 0145	50	0,0125
33	GD 0258	50	0,01
34	GD 0146	50	0,009
35	GD 0147	50	0,011
36	GD 0149	50	0,0085
37	GD 0225	50	0,0095
38	GD 0232	25	0,009
39	GD 0226	25	0,00375
40	GD 0228	25	0,0056664
Total		2.445 kVA	0,9006664 MVA

Berdasarkan tabel 4.19 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Tandai adalah sebesar 2.445 kVA atau 2,445 MVA dengan total pembebanan sebesar 0,9006664 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.20 berikut.

Tabel 4. 20 Data beban dan saluran penyulang Tandai

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GH Lubuk Gadang	GD 0254	1,503	AAAC	240
2	GD 0254	LBS Koto Tinggi	1,35	AAAC	240
3	LBS Koto Tinggi	Node 1 Tandai	1,503	AAAC	240
4	Node 1 Tandai	GD 0151	1,108	AAAC	240
	GD 0151	GD 0150	0,281	AAAC	240
5	GD 0150	LBS Sungai Padi	0,156	AAAC	240
6	LBS Sungai Padi	GD 0141	0,312	AAAC	240

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
7	GD 0141	GD 0140	0,312	AAAC	240
8	GD 0140	LBS Padang Aro	0,312	AAAC	240
9	GD 0141	CO Simpang Limau	0,988	AAAC	240
10	CO Simpang Limau	GD 0348	0,988	AAAC	240
11	GD 0348	GD 0143	0,561	AAAC	240
12	GD 0143	GD 0142	0,561	AAAC	240
13	GD 0142	GD 0144	0,561	AAAC	240
14	GD 0144	GD 0145	0,561	AAAC	240
15	GD 0145	GD 0258	0,561	AAAC	240
16	GD 0258	CO Banda Runtuh	0,561	AAAC	240
18	CO Banda Runtuh	GD 0146	1,846	AAAC	240
19	GD 0146	GD 0147	1,846	AAAC	240
20	CO Banda Runtuh	GD 0148	1,884	AAAC	240
21	GD 0148	GD 0149	1,884	AAAC	240
22	GD 0151	Node 2 Tandai	0,621	AAAC	240
23	Node 2 Tandai	GD 0284	0,576	AAAC	240
24	Node 2 Tandai	GD 0152	1,422	AAAC	240
26	CO Suka Bumi	GD 0153	0,219	AAAC	240
27	GD 0153	GD 0360	0,47	AAAC	240
28	GD 0360	GD 0154	0,47	AAAC	240
29	GD 0154	Node 3 Tandai	0,47	AAAC	240
30	Node 3 Tandai	GD 0156	1,364	AAAC	240

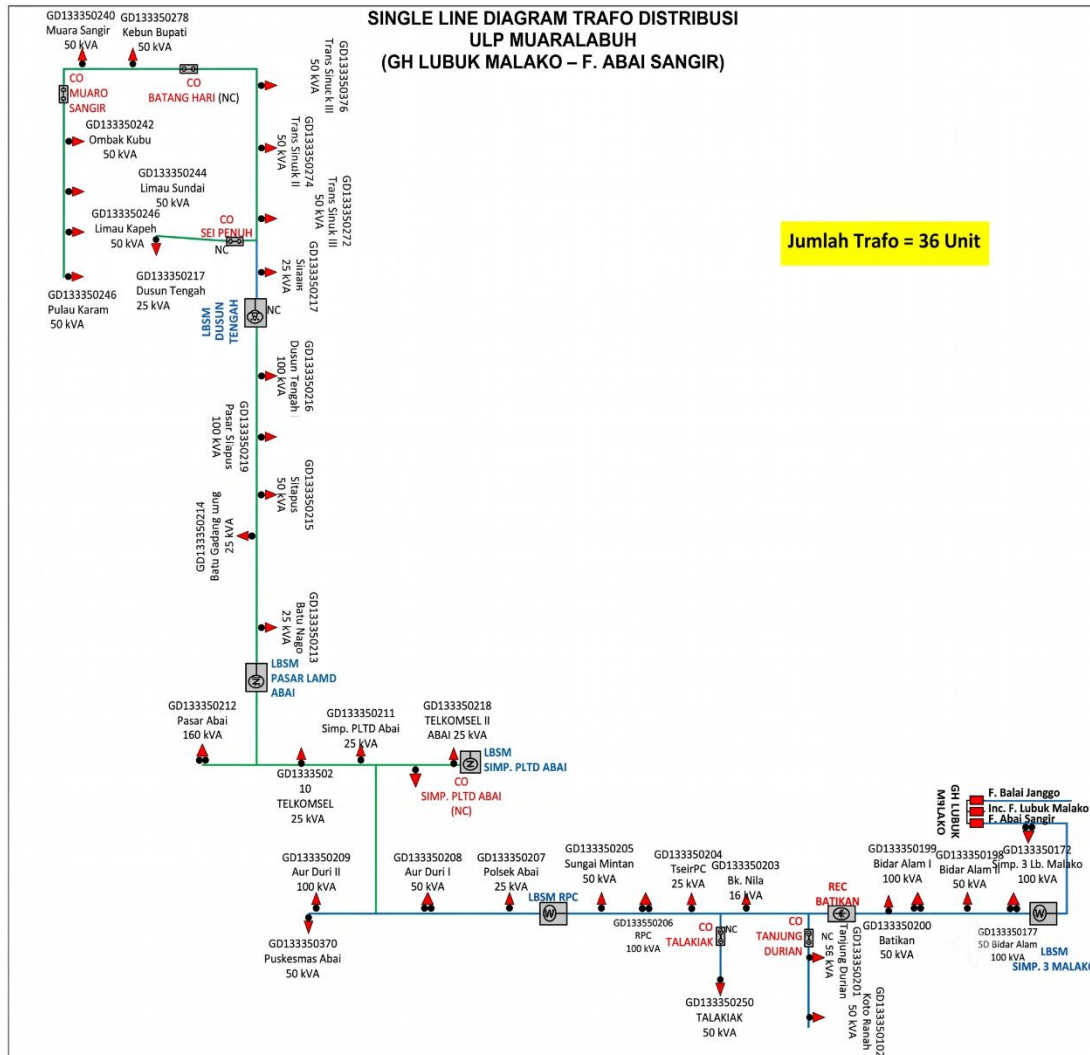
NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
31	Node 3 Tandai	GD 0155	2,191	AAAC	240
32	Node 1 Tandai	GD 0252	0,873	AAAC	240
33	GD 0252	GD 0356	0,873	AAAC	240
34	GD 0356	LBS Sikinjang	0,873	AAAC	240
35	LBS Sikinjang	GD 0221	0,873	AAAC	240
36	GD 0221	GD 0220	0,873	AAAC	240
37	GD 0220	Node 4 Tandai	0,873	AAAC	240
38	Node 4 Tandai	GD 0128	0,027	AAAC	240
39	GD 0128	LBS Bangun Rejo	0,027	AAAC	240
40	Node 4 Tandai	GD 0222	1,982	AAAC	240
41	GD 0222	REC Gunung Pasir	1,982	AAAC	240
42	REC Gunung Pasir	LBS 3 Ways Cafe Rosa	1,982	AAAC	240
43	LBS 3 Ways Cafe Rosa	CO Sei Langkitang	1,982	AAAC	240
46	CO Sei Langkitang	GD 0223	4,769	AAAC	240
47	GD 0223	LBS Selo Kencana	4,769	AAAC	240
49	LBS Selo Kencana	CO Tandai	2,063	AAAC	240
50	CO Tandai	GD 0224	2,063	AAAC	240
51	GD 0224	GD 0225	2,063	AAAC	240
52	GD 0225	GD 0226	2,063	AAAC	240
53	GD 0226	GD 0227	2,063	AAAC	240

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
54	GD 0227	GD 0228	2,063	AAAC	240
55	LBS Selo Kencana	GD 0230	1,59	AAAC	240
56	GD 0230	GH SKE	1,59	AAAC	240
57	GD 0230	REC Kubang Gajah	1,59	AAAC	240
58	GH WSE	REC Kubang Gajah	1,59	AAAC	240
60	REC Kubang Gajah	GD 0231	1,59	AAAC	240
61	GD 0231	GD 0229	1,59	AAAC	240
62	GD 0229	GD 0232	1,59	AAAC	240
63	GD 0232	LBS Kelok Safari	1,78	AAAC	240
Total			75,488		

Berdasarkan tabel 4.20 di atas total panjang penyulang Tandai adalah 75,488 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 240 mm².

4.1.10 Single Line Diagram Penyulang Abai Sangir

Pada penyulang Abai Sangir memiliki 36 gardu distribusi sesuai gambar 4.10 berikut.



Gambar 4. 10 SLD Penyulang Abai Sangir

Tabel 4.21 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Abai Sangir.

Tabel 4. 21 Data pembebanan penyulang Abai Sangir

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0172	100	0,0565
2	GD 0197	100	0,0512
3	GD 0198	50	0,0284
4	GD 0199	100	0,053
5	GD 0200	50	0,0245
6	GD 0201	25	0,0128
7	GD 0202	50	0,0312

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
8	GD 0203	16	0,0091
9	GD 0204	25	0,0115
10	GD 0250	50	0,0294
11	GD 0206	100	0,0495
12	GD 0205	50	0,0268
13	GD 0207	25	0,0142
14	GD 0208	50	0,0255
15	GD 0209	100	0,058
16	GD 0370	50	0,0324
17	GD 0211	25	0,0118
18	GD 0218	25	0,0135
19	GD 0210	25	0,0142
20	GD 0212	160	0,0924
21	GD 0213	25	0,0128
22	GD 0214	25	0,0134
23	GD 0215	50	0,0262
24	GD 0219	100	0,0554
25	GD 0216	100	0,051
26	GD 0217	25	0,0132
27	GD 0272	50	0,0275
28	GD 0274	50	0,0258
29	GD 0276	50	0,0282
30	GD 0371	25	0,0125
31	GD 0248	50	0,0248
32	GD 0246	50	0,0254
33	GD 0244	50	0,0268
34	GD 0242	50	0,0246
35	GD 0240	50	0,0255
36	GD 0278	50	0,026
Total		1.926 kVA	1,03923 MVA

Berdasarkan tabel 4.21 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Abai Sangir adalah sebesar 1.926 kVA atau 1,926 MVA dengan total pembebanan sebesar 1,03923 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.22 berikut.

Tabel 4. 22 Data beban dan saluran penyulang Abai Sangir

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm2)
1	GH Lubuk Malako	GD 0172	0,083	AAAC	150
2	GD 0172	LBS Simp 3 Malako	0,083	AAAC	150
3	LBS Simp 3 Malako	GD 0197	0,083	AAAC	150
4	GD 0197	GD 0198	1,537	AAAC	150
5	GD 0198	GD 0199	1,537	AAAC	150
6	GD 0199	GD 0200	1,537	AAAC	150
7	GD 0200	REC Batikan	0,083	AAAC	150
8	REC Batikan	Node 1 Abai Sangir	0,083	AAAC	150
9	Node 1 Abai Sangir	CO Tanjung Durian	0,083	AAAC	150
10	CO Tanjung Durian	GD 0201	1,426	AAAC	150
11	GD 0201	GD 0202	1,426	AAAC	150
12	Node 1 Abai Sangir	GD 0203	0,27	AAAC	150
13	GD 0203	Node 2 Abai Sangir	1,868	AAAC	150
14	Node 2 Abai Sangir	CO Talakiak	0,083	AAAC	150
15	CO Talakiak	GD 0250	0,231	AAAC	150
16	Node 2 Abai Sangir	GD 0204	0,527	AAAC	150
17	GD 0204	GD 0206	0,527	AAAC	150
18	GD 0206	GD 0205	0,527	AAAC	150

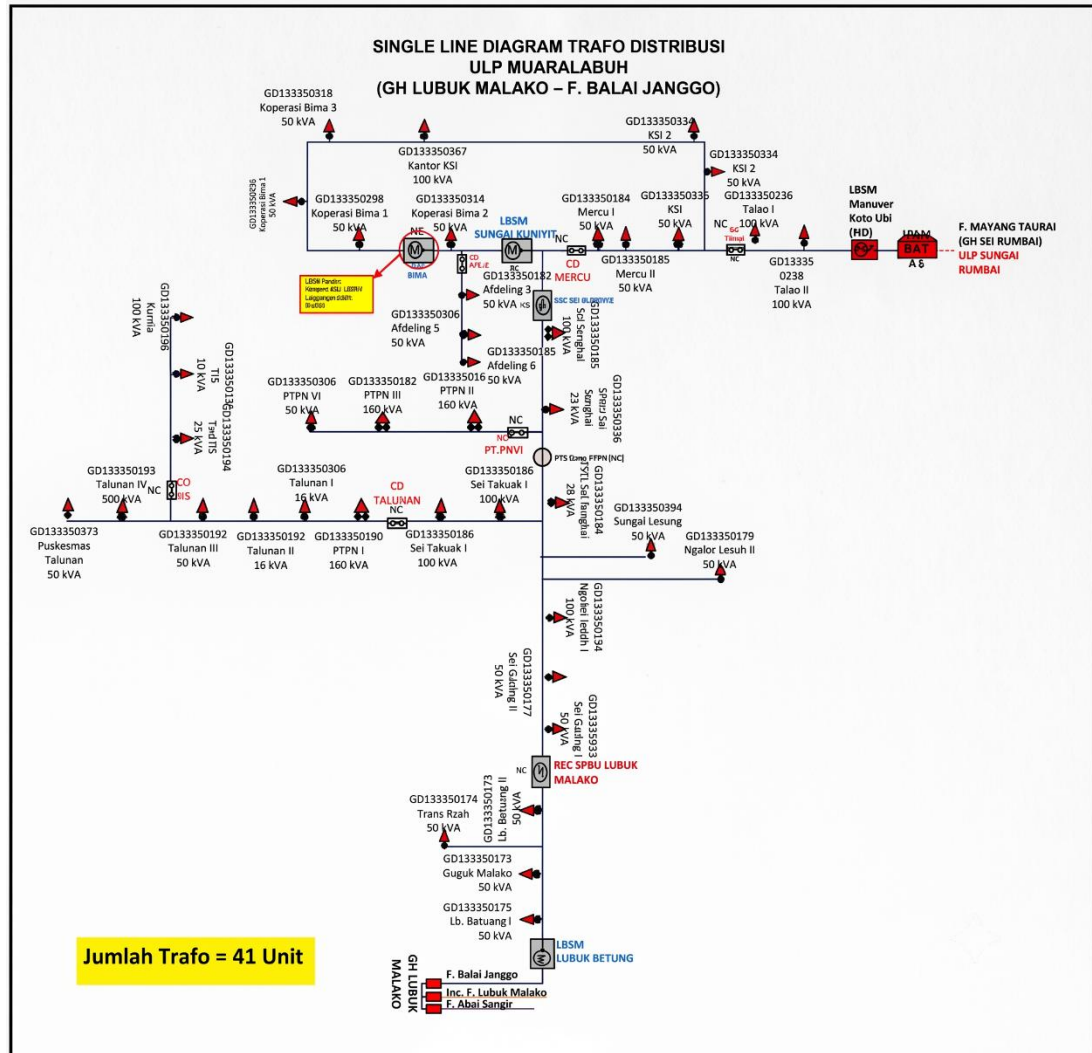
NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
19	GD 0205	LBS RPC	0,527	AAAC	150
20	LBS RPC	GD 0207	2,605	AAAC	150
21	GD 0207	GD 0208	2,605	AAAC	150
22	GD 0208	Node 3 Abai Sangir	2,605	AAAC	150
23	Node 3 Abai Sangir	GD 0209	0,077	AAAC	150
24	GD 0209	GD 0370	2,605	AAAC	150
25	Node 3 Abai Sangir	Node 4 Abai Sangir	0,772	AAAC	150
26	Node 4 Abai Sangir	GD 0218	0,186	AAAC	150
27	GD 0218	GD 0211	0,151	AAAC	150
28	GD 0211	GD 0210	0,151	AAAC	150
29	GD 0210	Node 5 Abai Sangir	0,151	AAAC	150
30	Node 5 Abai Sangir	GD 0212	0,151	AAAC	150
31	Node 5 Abai Sangir	LBS Pasar Lamo Abai	0,151	AAAC	150
32	LBS Pasar Lamo Abai	GD 0213	0,992	AAAC	150
33	GD 0213	GD 0214	1,316	AAAC	150
34	GD 0214	GD 0215	1,316	AAAC	150
35	GD 0215	GD 0219	1,316	AAAC	150
36	GD 0219	GD 0216	1,316	AAAC	150
37	GD 0216	LBS Dusun Tengah	0,992	AAAC	150
38	LBS Dusun Tengah	Node 6 Abai Sangir	3,352	AAAC	150
39	Node 6 Abai Sangir	GD 0217	0,186	AAAC	150
40	Node 6 Abai Sangir	Node 7 Abai Sangir	3,352	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
41	Node 7 Abai Sangir	CO Sei Penuh	1,516	AAAC	150
42	CO Sei Penuh	GD 0371	1,516	AAAC	150
43	Node 7 Abai Sangir	GD 0272	0,496	AAAC	150
44	GD 0272	GD 0274	0,496	AAAC	150
45	GD 0274	GD 0276	0,496	AAAC	150
46	GD 0276	CO Batang Hari	0,992	AAAC	150
47	CO Batang Hari	GD 0278	4,289	AAAC	150
48	GD 0278	GD 0240	4,289	AAAC	150
49	GD 0240	CO Muaro Sangir	4,289	AAAC	150
50	CO Muaro Sangir	GD 0242	2,144	AAAC	150
51	GD 0242	GD 0244	2,144	AAAC	150
52	GD 0244	GD 0246	2,144	AAAC	150
53	GD 0246	GD 0248	2,144	AAAC	150
Total			65,824		

Berdasarkan tabel 4.22 di atas total panjang penyulang Abai Sangir adalah 65,824 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm².

4.1.11 Single Line Diagram Penyulang Balai Janggo

Pada penyulang Balai Janggo memiliki 41 gardu distribusi sesuai gambar 4.11 berikut.



Gambar 4. 11 SLD Penyulang Balai Janggo

Tabel 4.23 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Balai Janggo.

Tabel 4. 23 Data pembebanan penyulang Balai Janggo

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0173	50	0,024871
2	GD 0393	50	0,024331
3	GD 0175	50	0,02379
4	GD 0174	50	0,023249
5	GD 0176	50	0,022709
6	GD 0177	50	0,022709
7	GD 0178	100	0,048661

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
8	GD 0179	50	0,021627
9	GD 0394	50	0,021087
10	GD 0188	25	0,010814
11	GD 0186	100	0,045417
12	GD 0187	50	0,022168
13	GD 0180	100	0,043255
14	GD 0181	160	0,070289
15	GD 0182	160	0,069207
16	GD 0306	50	0,021087
17	GD 0190	16	0,005407
18	GD 0191	16	0,005407
19	GD 0192	50	0,017843
20	GD 0193	100	0,035685
21	GD 0373	50	0,017302
22	GD 0194	25	0,008651
23	GD 0195	50	0,017843
24	GD 0196	100	0,034604
25	GD 0340	25	0,010814
26	GD 0340	100	0,043255
27	GD 0310	50	0,017843
28	GD 0308	50	0,017302
29	GD 0332	50	0,017302
30	GD 0314	50	0,017843
31	GD 0296	50	0,017302
32	GD 0318	50	0,017302
33	GD 0342	50	0,017843
34	GD 0367	100	0,035685
35	GD 0184	50	0,017302
36	GD 0185	50	0,017302
37	GD 0366	50	0,017302
38	GD 0280	50	0,017302
39	GD 0334	50	0,017302
40	GD 0236	50	0,017302

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
41	GD 0238	100	0,030273
Total		2.527 kVA	1,004589 MVA

Berdasarkan tabel 4.23 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Balai Janggo adalah sebesar 2.527 kVA atau 2,527 MVA dengan total pembebanan sebesar 1,004589 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.24 berikut.

Tabel 4. 24 Data beban dan saluran penyulang Balai Janggo

No	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm2)
1	GH Lubuk Malako	LBS Lubuk Belitung	0,701	AAAC	150
2	LBS Lubuk Belitung	GD 0173	0,701	AAAC	150
3	GD 0173	GD 0393	1,15	AAAC	150
4	GD 0393	Node 1 Balai Janggo	1,15	AAAC	150
5	Node 1 Balai Janggo	GD 0174	0,48	AAAC	150
6	Node 1 Balai Janggo	GD 0175	0,48	AAAC	150
7	GD 0175	Lubuk Malako	0,109	AAAC	150
8	REC SPBU Lubuk Malako	GD 0176	0,536	AAAC	150
9	GD 0176	GD 0177	0,536	AAAC	150
10	GD 0177	GD 0178	2,173	AAAC	150
11	GD 0178	Node 2 Balai Janggo	2,173	AAAC	150
12	Node 2 Balai Janggo	GD 0179	0,853	AAAC	150

No	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
13	Node 2 Balai Janggo	Node 3 Balai Janggo	0,681	AAAC	150
14	Node 3 Balai Janggo	GD 0394	0,681	AAAC	150
15	Node 3 Balai Janggo	Node 4 Balai Janggo	0,681	AAAC	150
16	Node 4 Balai Janggo	GD 0186	0,439	AAAC	150
17	GD 0186	GD 0187	0,439	AAAC	150
18	GD 0187	CO Talunan	0,439	AAAC	150
19	CO Talunan	GD 0180	0,816	AAAC	150
20	GD 0180	GD 0190	0,816	AAAC	150
21	GD 0190	GD 0191	0,816	AAAC	150
22	GD 0191	GD 0192	0,903	AAAC	150
23	GD 0192	CO TIS	0,401	AAAC	150
24	CO TIS	GD 0193	0,171	AAAC	150
25	GD 0193	GD 0373	0,171	AAAC	150
26	CO TIS	GD 0194	1,831	AAAC	150
27	GD 0194	GD 0195	1,831	AAAC	150
28	GD 0195	GD 0196	1,831	AAAC	150
29	Node 4 Balai Janggo	GD 0188	1,085	AAAC	150
30	PTS Simp PTPN	CO PT.PNVI	1,085	AAAC	150
31	CO PT.PNVI	GD 0181	0,726	AAAC	150
32	GD 0181	GD 0182	2,942	AAAC	150
33	GD 0182	GD 0306	2,942	AAAC	150
34	CO PT.PNVI	GD 0340	0,153	AAAC	150
35	GD 0340	GD 0183	0,068	AAAC	150
36	GD 0183	REC Sei Sungkai	0,068	AAAC	150

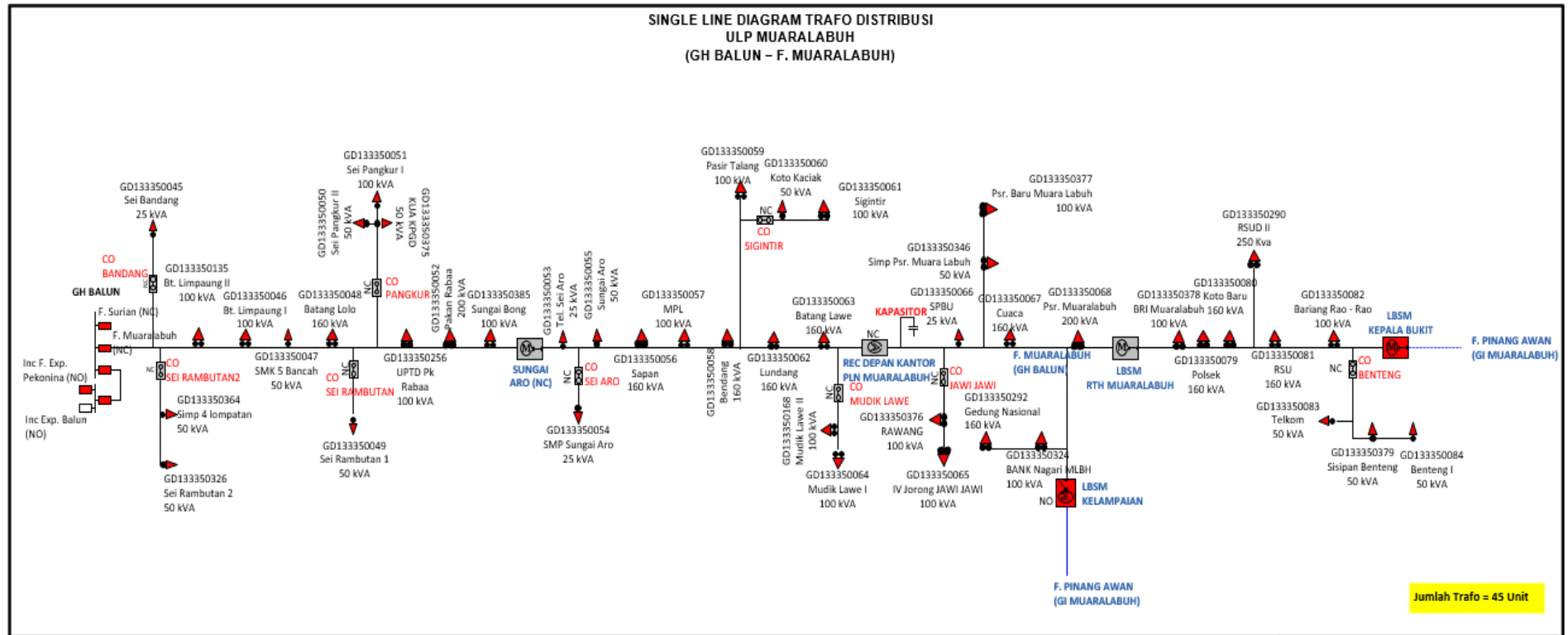
No	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
37	REC Sei Sungkai	Node 5 Balai Janggo	0,068	AAAC	150
38	Node 5 Balai Janggo	LBSM Sungai Kunyt	0,246	AAAC	150
39	LBSM Sungai Kunyt	CO AFD. 5	0,246	AAAC	150
40	CO AFD. 5	GD 0332	1,904	AAAC	150
41	GD 0332	GD 0308	1,904	AAAC	150
42	GD 0308	GD 0310	1,904	AAAC	150
43	CO AFD. 5	GD 0342	1,957	AAAC	150
44	GD 0342	LBSM BIMA	1,957	AAAC	150
45	LBSM BIMA	GD 0314	2,243	AAAC	150
46	GD 0314	GD 0296	0,95	AAAC	150
47	GD 0296	GD 0318	0,95	AAAC	150
48	GD 0318	GD 0367	0,95	AAAC	150
49	GD 0367	GD 0280	0,95	AAAC	150
50	GD 0280	GD 0334	0,95	AAAC	150
51	Node 5 Balai Janggo	CO Mercu	0,201	AAAC	150
52	CO Mercu	GD 0184	1,367	AAAC	150
53	GD 0184	GD 0185	1,367	AAAC	150
54	GD 0185	GD 0366	1,367	AAAC	150
55	GD 0366	Node 6 Balai Janggo	7,151	AAAC	150
56	GD 0334	Node 6 Balai Janggo	0,95	AAAC	150
57	CO Talao	GD 0236	3,209	AAAC	150
58	GD 0236	GD 0238	3,209	AAAC	150
Total			69,058		

Berdasarkan tabel 4.24 di atas total panjang penyulang Balai Janggo adalah 69,058 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm².

4.1.12 *Single Line Diagram* Penyulang Muara Labuh

Pada penyulang Muara Labuh memiliki 45 gardu distribusi sesuai gambar 4.12 berikut.





Gambar 4. 12 SLD Penyulang Muara Labuh

Tabel 4.25 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Muara Labuh.

Tabel 4. 25 Data pembebanan penyulang Muara Labuh

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0045	25	0,01824
2	GD 0135	100	0,07315
3	GD 0046	100	0,07208
4	GD 0047	50	0,03591
5	GD 0364	50	0,03512
6	GD 0326	50	0,03487
7	GD 0049	50	0,03463
8	GD 0048	160	0,1135
9	GD 0050	50	0,0352
10	GD 0051	100	0,0704
11	GD 0375	50	0,03471
12	GD 0256	100	0,06915
13	GD 0052	200	0,1382
14	GD 0385	100	0,0684
15	GD 0053	25	0,01695
16	GD 0055	50	0,0336
17	GD 0054	25	0,01642
18	GD 0056	160	0,1045
19	GD 0057	100	0,0648
20	GD 0058	160	0,1037
21	GD 0059	100	0,0641
22	GD 0060	50	0,03185
23	GD 0061	100	0,0632
24	GD 0062	160	0,1005
25	GD 0063	160	0,0994
26	GD 0168	100	0,0621
27	GD 0064	100	0,0617
28	GD 0376	100	0,0612
29	GD 0065	100	0,0608
30	GD 0292	160	0,0963

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
31	GD 0066	25	0,01435
32	GD 0346	50	0,0282
33	GD 0377	100	0,0561
34	GD 0067	160	0,0894
35	GD 0068	200	0,1115
36	GD 0324	100	0,0558
37	GD 0378	100	0,0549
38	GD 0079	160	0,0872
39	GD 0080	160	0,0865
40	GD 0081	160	0,0851
41	GD 0290	250	0,1115
42	GD 0082	100	0,0414
43	GD 0083	50	0,0253
44	GD 0379	50	0,0248
45	GD 0084	50	0,024551
Total		4.500 kVA	2,771281 MVA

Berdasarkan tabel 4.25 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Muara Labuh adalah sebesar 4.500 kVA atau 4,5 MVA dengan total pembebanan sebesar 2,771281 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.26 berikut.

Tabel 4. 26 Data beban dan saluran penyulang Muara Labuh

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm2)
1	GH Balun	CO Bandang	0,088	AAAC	150
2	CO Bandang	GD 0045	0,088	AAAC	150
3	CO Bandang	CO Sei Rambutan 2	0,0897	AAAC	150
4	CO Sei Rambutan 2	GD 0364	1,992	AAAC	150
5	GD 0364	GD 0326	1,992	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm2)
6	CO Sei Rambutan 2	GD 0135	0,642	AAAC	150
7	GD 0135	GD 0046	0,642	AAAC	150
8	GD 0046	GD 0047	0,642	AAAC	150
9	GD 0047	GD 0048	0,642	AAAC	150
10	GD 0048	CO Sei Rambutan	0,642	AAAC	150
11	CO Sei Rambutan	GD 0049	0,625	AAAC	150
12	CO Sei Rambutan	CO Pangkur	0,642	AAAC	150
13	CO Pangkur	GD 0375	0,642	AAAC	150
14	GD 0375	GD 0050	0,642	AAAC	150
15	GD 0375	GD 0051	0,642	AAAC	150
16	CO Pangkur	GD 0256	0,642	AAAC	150
17	GD 0256	GD 0052	0,642	AAAC	150
18	GD 0052	GD 0385	0,642	AAAC	150
19	GD 0385	LBS Sungai Aro	0,642	AAAC	150
20	LBS Sungai Aro	GD 0053	0,642	AAAC	150
21	GD 0053	CO Sei Aro	0,642	AAAC	150
22	CO Sei Aro	GD 0054	0,742	AAAC	150
23	GD 0054	GD 0055	0,605	AAAC	150
24	GD 0055	GD 0056	0,605	AAAC	150
25	GD 0056	GD 0057	0,605	AAAC	150
26	GD 0057	GD 0058	0,605	AAAC	150
27	GD 0058	Node 1 M. Labuh	0,605	AAAC	150
28	Node 1 M. Labuh	CO Sigintir	0,427	AAAC	150
29	CO Sigintir	GD 0060	0,427	AAAC	150
30	GD 0060	GD 0061	0,427	AAAC	150
31	GD 0061	GD 0059	0,427	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm2)
32	GD 0059	GD 0062	0,705	AAAC	150
33	GD 0062	GD 0063	0,705	AAAC	150
34	GD 0063	CO Mudik Lawe	0,705	AAAC	150
35	CO Mudik Lawe	GD 0168	0,628	AAAC	150
36	GD 0168	GD 0064	0,628	AAAC	150
37	GD 0064	REC Deoan Kantor	0,114	AAAC	150
38	REC Deoan Kantor	Kapasitor	0,114	AAAC	150
39	Kapasitor	CO Jawi Jawi	0,8	AAAC	150
40	CO Jawi Jawi	GD 0376	0,516	AAAC	150
41	GD 0376	GD 0065	0,516	AAAC	150
42	GD 0065	GD 0066	0,299	AAAC	150
43	GD 0066	Node 2 M. Labuh	0,299	AAAC	150
44	Node 2 M. Labuh	GD 0346	0,299	AAAC	150
45	GD 0346	GD 0377	0,299	AAAC	150
46	Node 2 M. Labuh	GD 0067	0,299	AAAC	150
47	GD 0067	GD 0068	0,299	AAAC	150
48	GD 0068	Node 3 M. Labuh	0,225	AAAC	150
49	Node 3 M. Labuh	GD 0324	5,336	AAAC	150
50	GD 0324	GD 0292	5,336	AAAC	150
51	Node 3 M. Labuh	LBS Kelampaian	0,225	AAAC	150
52	GD 0068	LBS RTH	0,286	AAAC	150
53	LBS RTH	GD 0378	0,286	AAAC	150
54	GD 0378	GD 0079	0,286	AAAC	150
55	GD 0079	GD 0080	0,286	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
56	GD 0080	Node 4 M. Labuh	0,286	AAAC	150
57	Node 4 M. Labuh	GD 0290	0,286	AAAC	150
58	Node 4 M. Labuh	GD 0081	0,286	AAAC	150
59	GD 0081	GD 0082	0,286	AAAC	150
60	GD 0082	CO Benteng	0,286	AAAC	150
61	CO Benteng	Node 5 M. Labuh	0,607	AAAC	150
62	Node 5 M. Labuh	GD 0083	0,607	AAAC	150
63	Node 5 M. Labuh	GD 0379	0,607	AAAC	150
64	GD 0379	GD 0084	0,607	AAAC	150
65	CO Benteng	LBS Kepala Bukit	0,12	AAAC	150
Total			43,4487		

Berdasarkan tabel 4.26 di atas total panjang penyulang Muara Labuh adalah 43,4487 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm².

4.1.13 Single Line Diagram Penyulang Surian

Pada penyulang Surian memiliki 55 gardu distribusi sesuai gambar 4.13 berikut.

Tabel 4.27 berikut menampilkan data pembebanan dari masing – masing gardu pada penyulang Surian.

Tabel 4. 27 Data pembebanan penyulang Surian

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
1	GD 0043	200	0,115
2	GD 0042	50	0,0315
3	GD 0041	50	0,0305
4	GD 0040	25	0,0152
5	GD 0397	50	0,031
6	GD 0037	50	0,029
7	GD 0036	50	0,0295
8	GD 0039	50	0,03
9	GD 0035	50	0,028
10	GD 0034	50	0,0285
11	GD 0038	50	0,0288
12	GD 0032	50	0,0292
13	GD 0312	50	0,0275
14	GD 0030	50	0,027
15	GD 0383	50	0,0285
16	GD 0033	50	0,0265
17	GD 0029	25	0,014
18	GD 0266	100	0,045
19	GD 0028	50	0,026
20	GD 0384	100	0,048
21	GD 0027	25	0,0135
22	GD 0026	50	0,024
23	GD 0025	100	0,0415
24	GD 0024	50	0,0225
25	GD 0023	100	0,045
26	GD 0381	50	0,021
27	GD 0382	50	0,022
28	GD 0022	50	0,0215
29	GD 0021	160	0,065
30	GD 0396	50	0,021

No	Gardu Distribusi	Kapasitas (kVA)	Beban (MVA)
31	GD 0288	100	0,044
32	GD 0019	100	0,043
33	GD 0020	50	0,02
34	GD 0018	160	0,07
35	GD 0017	160	0,073
36	GD 0016	100	0,042
37	GD 0015	50	0,0215
38	GD 0395	50	0,022
39	GD 0262	100	0,041
40	GD 0014	100	0,04
41	GD 0013	100	0,038
42	GD 0012	50	0,019
43	GD 0011	50	0,0185
44	GD 0009	50	0,019
45	GD 0010	50	0,018
46	GD 0008	50	0,014
47	GD 0007	50	0,0135
48	GD 0006	25	0,0065
49	GD 0005	25	0,006
50	GD 0264	50	0,0125
51	GD 0004	100	0,025
52	GD 0380	50	0,012
53	GD 0003	100	0,024
54	GD 0002	25	0,009
55	GD 0001	50	0,010928
Total		3.680 kVA	1,628128 MVA

Berdasarkan tabel 4.27 di atas total kapasitas gardu pada penyulang Surian adalah sebesar 3.680 kVA atau 3,68 MVA dengan total pembebanan sebesar 1,628128 MVA. Sedangkan untuk data panjang saluran, jenis penghantar, dan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.28 berikut.

Tabel 4. 28 Data beban dan saluran penyulang Surian

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
1	GH Balun	GD 0043	0,177	AAAC	150
2	GD 0043	Node 1 Surian	0,177	AAAC	150
3	Node 1 Surian	Kapasitor	0,177	AAAC	150
4	Node 1 Surian	GD 0042	0,177	AAAC	150
5	GD 0042	GD 0041	2,103	AAAC	150
6	GD 0041	GD 0397	2,103	AAAC	150
7	GD 0041	REC Sei Ipuh	2,103	AAAC	150
8	REC Sei Ipuh	Node 2 Surian	2,103	AAAC	150
9	Node 2 Surian	CO Sei Manau	2,103	AAAC	150
10	CO Sei Manau	GD 0040	0,991	AAAC	150
11	Node 2 Surian	GD 0039	1,231	AAAC	150
12	GD 0039	LBSM Batuang Bajawek	0,985	AAAC	150
13	LBSM Batuang Bajawek	GD 0038	0,985	AAAC	150
14	GD 0038	Node 3 Surian	1,784	AAAC	150
15	Node 3 Surian	CO Pinti Kayu	1,784	AAAC	150
16	CO Pinti Kayu	GD 0035	1,261	AAAC	150
17	GD 0035	GD 0036	1,986	AAAC	150
18	GD 0036	GD 0037	1,986	AAAC	150
19	GD 0035	GD 0034	1,986	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
20	GD 0034	GD 0033	0,699	AAAC	150
21	GD 0033	GD 0266	0,699	AAAC	150
22	Node 3 Surian	Node 4 Surian	0,488	AAAC	150
23	Node 4 Surian	GD 0032	0,842	AAAC	150
24	Node 4 Surian	GD 0312	0,842	AAAC	150
25	GD 0312	GD 0030	0,842	AAAC	150
26	GD 0030	Node 5 Surian	0,842	AAAC	150
27	Node 5 Surian	GD 0384	0,842	AAAC	150
28	Node 5 Surian	GD 0383	0,842	AAAC	150
29	GD 0383	GD 0029	0,842	AAAC	150
30	GD 0029	GD 0028	0,94	AAAC	150
31	GD 0028	GD 0027	0,94	AAAC	150
32	GD 0027	GD 0026	0,94	AAAC	150
33	GD 0026	LBSM Ulu Suliti	0,94	AAAC	150
34	LBSM Ulu Suliti	GD 0025	0,94	AAAC	150
35	GD 0025	GD 0024	0,94	AAAC	150
36	GD 0024	GD 0023	0,834	AAAC	150
37	GD 0023	Node 6 Surian	0,834	AAAC	150
38	Node 6 Surian	GD 0382	0,133	AAAC	150
39	GD 0382	CO LB Rasam	0,133	AAAC	150
40	CO LB Rasam	GD 0381	0,965	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
41	Node 6 Surian	Node 7 Surian	0,487	AAAC	150
42	Node 7 Surian	CO Kulemban	0,487	AAAC	150
43	CO Kulemban	GD 0022	0,487	AAAC	150
44	Node 7 Surian	GD 0021	0,487	AAAC	150
45	GD 0021	GD 0020	0,487	AAAC	150
46	GD 0020	CO Ladang Padi	0,487	AAAC	150
47	CO Ladang Padi	GD 0396	0,834	AAAC	150
48	GD 0396	GD 0019	0,834	AAAC	150
49	GD 0019	GD 0288	0,834	AAAC	150
50	CO Ladang Padi	GD 0018	0,132	AAAC	150
51	GD 0018	Node 8 Surian	0,132	AAAC	150
52	Node 8 Surian	GD 0017	0,132	AAAC	150
53	Node 8 Surian	CO Tambang	0,066	AAAC	150
54	GD 0017	CO Tambang	0,132	AAAC	150
55	CO Tambang	GD 0016	2,241	AAAC	150
56	CO Tambang	Kapasitor	0,33	AAAC	150
57	Kapasitor	GD 0015	0,33	AAAC	150
58	GD 0015	GD 0395	0,33	AAAC	150
59	GD 0395	CO Koto Tinggi	0,33	AAAC	150
60	CO Koto Tinggi	GD 0014	0,86	AAAC	150
61	GD 0014	GD 0262	0,86	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
62	CO Koto Tinggi	GD 0013	0,298	AAAC	150
63	GD 0013	CO Indarung	0,298	AAAC	150
64	CO Indarung	GD 0012	1,042	AAAC	150
65	CO Indarung	Node 9 Surian	0,853	AAAC	150
66	Node 9 Surian	GD 0011	0,791	AAAC	150
67	Node 9 Surian	GD 0009	0,628	AAAC	150
68	GD 0009	GD 0010	0,853	AAAC	150
69	GD 0010	LBS Air Dalik	0,853	AAAC	150
70	LBS Air Dalik	GD 0008	0,853	AAAC	150
71	GD 0008	GD 0007	0,853	AAAC	150
72	GD 0007	Node 10 Surian	0,853	AAAC	150
73	Node 10 Surian	GD 0006	0,097	AAAC	150
74	Node 10 Surian	CO Lubuk Muaro	0,289	AAAC	150
75	CO Lubuk Muaro	GD 0005	1,804	AAAC	150
76	CO Lubuk Muaro	CO Banto	2,571	AAAC	150
77	CO Banto	GD 0264	0,303	AAAC	150
78	CO Banto	GD 0004	0,788	AAAC	150
79	GD 0004	CO Titian Panjang	0,788	AAAC	150
80	CO Titian Panjang	GD 0001	0,653	AAAC	150
81	GD 0001	Node 11 Surian	0,653	AAAC	150

NO	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Jenis Konduktor	Luas Penampang (mm ²)
82	Node 11 Surian	GD 0002	0,653	AAAC	150
83	Node 11 Surian	GD 0003	0,653	AAAC	150
84	GD 0003	GD 0380	0,653	AAAC	150
85	CO Titian Panjang	Node 12 Surian	0,055	AAAC	150
86	Node 12 Surian	LBSM Titian Panjang	0,055	AAAC	150
Total			72,01		

Berdasarkan tabel 4.28 di atas total panjang penyulang Surian adalah 72,01 km dengan menggunakan tipe penghantar udara dan jenis konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm².

4.2 Analisis Aliran Daya Pada Kondisi Eksisting

Profil tegangan dan susut daya pada sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Muara Labuh dianalisis menggunakan metode aliran daya (*load flow analysis*) dengan bantuan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Pemodelan jaringan sistem distribusi ini dilakukan dengan memasukkan parameter kelistrikan yang meliputi data beban, data fisik saluran (panjang dan jenis penghantar), serta data pembangkit yang terhubung. Hal ini bertujuan agar kondisi operasi sistem nyata dapat direpresentasikan dan dianalisis secara komprehensif melalui simulasi.

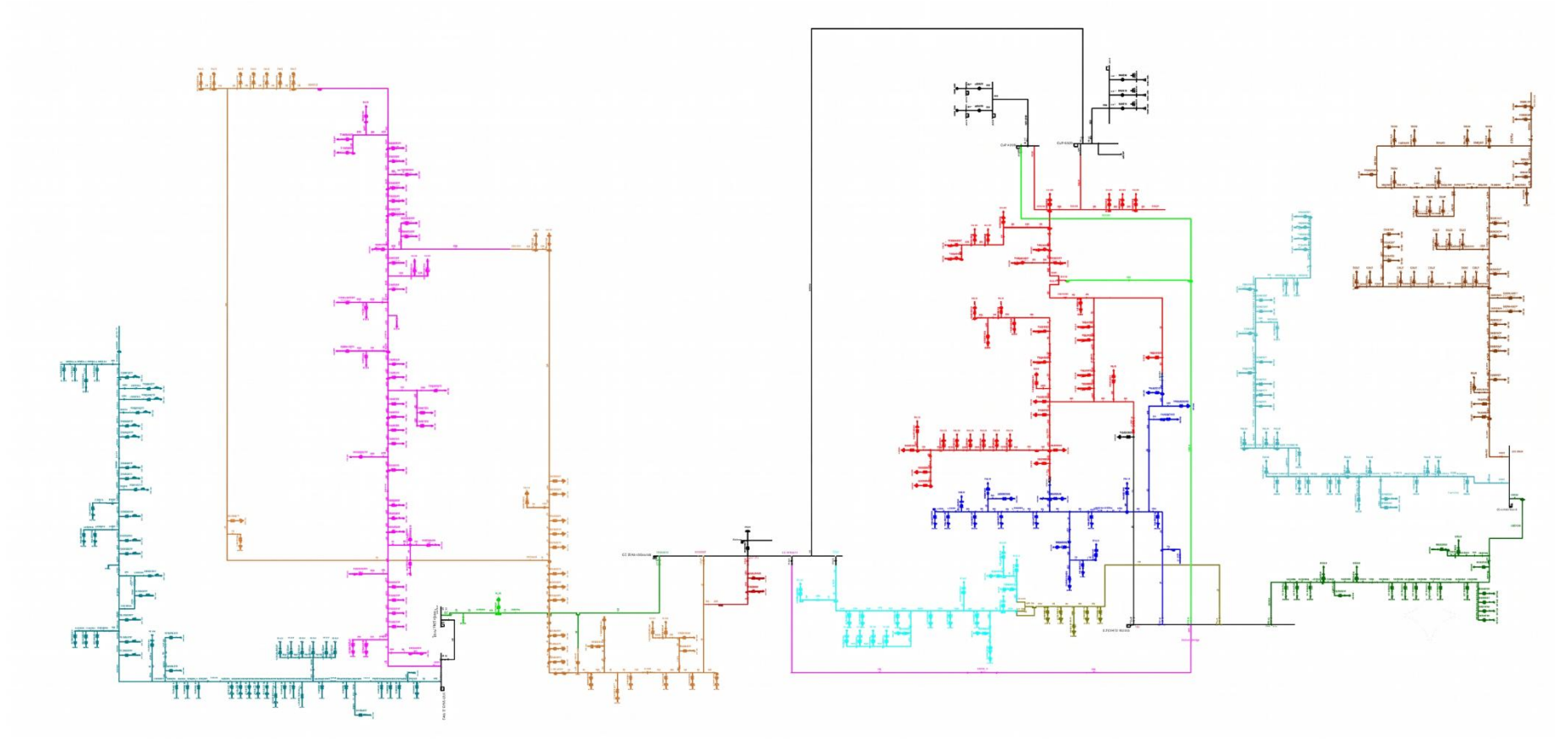
Model sistem distribusi awal sebelum pengintegrasian suplai dari PLTM Waskita Sangir Energi (WSE) ditetapkan sebagai kondisi eksisting dalam penelitian ini. Oleh karena itu, kondisi eksisting merepresentasikan kemungkinan variasi operasi unit generator SKE sebelum masuknya suplai WSE, yaitu mencakup kondisi saat tidak ada satupun unit yang beroperasi (0 unit), 1 unit beroperasi, maupun saat kedua unit SKE beroperasi secara bersamaan.

Berdasarkan variasi tersebut, analisis aliran daya pada kondisi eksisting dalam penelitian ini direpresentasikan oleh tiga skenario pola operasi yang telah dirancang, yaitu:

1. Skenario 1: Kondisi eksisting terburuk saat sistem murni hanya disuplai dari GI Muara Labuh (seluruh unit PLTM SKE dalam kondisi OFF).
2. Skenario 2: Kondisi eksisting saat sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan 1 unit generator PLTM SKE beroperasi (3,75 MW).

3. Skenario 4: Kondisi eksisting maksimal saat sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan 2 unit generator PLTM SKE beroperasi penuh (7,5 MW).
Hasil simulasi *load flow* untuk ketiga skenario eksisting tersebut memperlihatkan variasi profil tegangan dan susut daya teknis yang signifikan pada sistem 20 kV ULP Muara Labuh.





Gambar 4. 14 Pemodelan SLD PLN ULP Muara Labuh *software* DIgSILENT PowerFactory 2021

4.3 Analisis Aliran Daya Berdasarkan Skenario Operasi Sistem

Pada tahap ini dilakukan analisis aliran daya (*load flow*) melalui simulasi dua belas skenario pola operasi sistem. Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan pola operasi pembangkit, pengintegrasian PLTM WSE, serta penambahan unit generator baru 5 MW terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi 20 kV ULP Muara Labuh.

4.3.1 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 1

Skenario 1 merupakan kondisi operasi ketika sistem distribusi 20 kV ULP Muara Labuh hanya memperoleh pasokan daya dari GI Muara Labuh, sedangkan seluruh unit generator pada PLTM WSE dan PLTM SKE tidak dioperasikan. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 29 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 1

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	19,95	99,75
F. Pinang Awan	20	100
F. Supreme	20,18	100,9
F. Exp Pekonina	19,24	96,2
F. Kota Lubuk Gadang	16,35	81,75
F. Lubuak Malako	15,23	76,15
F. Sei Lambai	16,37	81,85
F. Tandai	16,25	81,25
F. Abai Sangir	14,63	73,15
F. Balai Janggo	14,91	74,55
F. Muaralabuh	18,84	94,2
F. Surian	18,74	93,7

Berdasarkan Tabel 4.30, ketiadaan injeksi daya dari PLTM menyebabkan enam penyulang mengalami jatuh tegangan kritis hingga di bawah standar minimum PLN (90%). Penurunan terburuk terjadi pada penyulang dengan saluran terpanjang, yaitu F. Abai Sangir di 14,63kV (73,15%) dan F. Balai Janggo di 14,91kV (74,55%). Fenomena ini sejalan dengan persamaan teknis jatuh tegangan:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (4.1)$$

Tanpa adanya pembangkit lokal di sekitar pusat beban, seluruh arus beban (*I*) harus ditarik langsung dari pangkal saluran (GI Muara Labuh). Mengingat saluran beroperasi dalam bentang yang sangat panjang, nilai akumulasi resistansi

(R) dan reaktansi (X) penghantar menjadi sangat besar. Hal ini secara matematis langsung memperbesar nilai jatuh tegangan (ΔV) di ujung penyulang.

Pada Skenario 1, total beban aktif yang dipikul oleh sistem terukur sebesar 20,29 MW. Untuk memenuhi kebutuhan beban tersebut, GI Muara Labuh harus menyuplai daya (*External Infeed*) sebesar 22,51 MW. Penyaluran daya melalui jaringan distribusi yang panjang menyebabkan arus yang mengalir pada penghantar menjadi cukup besar, sehingga rugi-rugi daya pada saluran turut meningkat. Berdasarkan hasil simulasi, rugi-rugi daya aktif yang terjadi mencapai 2,22 MW, sedangkan rugi-rugi daya reaktif sebesar 6,80 MVAR. Kondisi ini sesuai dengan prinsip persamaan rugi-rugi saluran.

$$P_{loss} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (4.2)$$

4.3.2 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 2

Skenario 2 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan satu unit generator PLTM SKE, sedangkan seluruh unit generator pada PLTM WSE tidak dioperasikan. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 3,75 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 2 ditunjukkan pada Tabel 4.31.

Tabel 4. 30 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 2

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,06	100,3
F. Pinang Awan	20,11	100,55
F. Supreme	20,3	101,5
F. Exp Pekonina	19,38	96,9
F. Kota Lubuk Gadang	20,14	100,7
F. Lubuak Malako	19,27	96,35
F. Sei Lambai	20,14	100,7
F. Tandai	20,04	100,2
F. Abai Sangir	18,81	94,05
F. Balai Janggo	19,03	95,15
F. Muaralabuh	18,99	94,95
F. Surian	18,89	94,45

Berdasarkan Tabel 4.31, profil tegangan ujung penyulang sangat dipengaruhi oleh jarak dan beban saluran, dengan nilai tertinggi pada Penyulang Supreme sebesar 20,30 kV atau 101,50%, serta jatuh tegangan terbesar pada Penyulang Abai Sangir sebesar 18,81 kV atau 94,05% yang disusul oleh Penyulang

Surian sebesar 18,89 kV atau 94,45%. Evaluasi berdasarkan Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90%, sehingga kondisi kelistrikan Skenario 2 dikategorikan sangat aman dan andal karena seluruh penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain memperbaiki profil tegangan, pengoperasian Skenario 2 dengan 1 unit generator PLTM SKE dalam kondisi ON juga memberikan dampak penurunan rugi-rugi daya jaringan yang signifikan. Dalam melayani total beban 10,35 MW, sistem berhasil menekan susut daya aktif menjadi hanya 1,55 MW dan susut daya reaktif sebesar 4,67 MVAR, jauh lebih rendah dibandingkan Skenario 1 saat seluruh pembangkit terdistribusi berstatus OFF yang mencapai susut daya aktif 2,55 MW dan daya reaktif 6,8 MVAR. Penurunan drastis ini membuktikan bahwa suplai energi lokal yang efisien mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk sekaligus menurunkan disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.3 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 3

Skenario 3 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan satu unit generator PLTM WSE, sedangkan seluruh unit generator pada PLTM SKE tidak dioperasikan. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 5 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 3 ditunjukkan pada Tabel 4.32.

Tabel 4. 31 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 3

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,37	101,85
F. Pinang Awan	20,42	102,1
F. Supreme	20,6	103
F. Exp Pekonina	19,77	98,85
F. Kota Lubuk Gadang	17,03	85,15
F. Lubuak Malako	15,96	79,8
F. Sei Lambai	17,04	85,2
F. Tandai	16,93	84,65
F. Abai Sangir	15,4	77
F. Balai Janggo	15,67	78,35
F. Muaralabuh	19,39	96,95
F. Surian	19,3	96,5

Berdasarkan Tabel 4.32, profil tegangan ujung penyulang tertinggi masih dapat dipertahankan pada Penyulang Supreme sebesar 20,60 kV atau 103,00 persen, sedangkan jatuh tegangan paling parah dialami oleh Penyulang Abai Sangir yang

merosot tajam hingga 15,40 kV atau 77,00 persen. Evaluasi yang mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN menetapkan batas minimum tegangan operasional sebesar 90%. Berdasarkan regulasi tersebut, kondisi kelistrikan pada Skenario 3 dikategorikan kritis dan tidak andal karena terdapat enam penyulang yang mengalami tegangan jatuh di bawah standar pelayanan, yaitu Penyulang Kota Lubuk Gadang, Penyulang Lubuak Malako, Penyulang Sei Lambai, Penyulang Tandai, Penyulang Abai Sangir, dan Penyulang Balai Janggo.

Selain memburuknya profil tegangan, sistem mencatatkan susut daya aktif mencapai 1,29 MW dan susut daya reaktif melonjak hingga 4,17 MVAR. Tingginya rugi-rugi daya dan parahnya profil tegangan pada skenario ini mengindikasikan bahwa suplai energi yang murni berasal dari gardu induk menempuh jarak rambat arus yang terlalu panjang untuk menopang beban berat, sehingga memicu tingginya disipasi panas pada konduktor saluran utama. Kondisi ini secara langsung menegaskan urgensi dan perlunya manuver perubahan status unit pembangkit terdistribusi menjadi ON untuk menyuplai daya secara lokal guna memulihkan keandalan distribusi pada skenario-skenario berikutnya.

4.3.4 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 4

Skenario 4 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan PLTM SKE yang beroperasi pada kapasitas penuh (2 unit), sedangkan seluruh unit generator pada PLTM WSE tidak dioperasikan. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 7,5 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 4 ditunjukkan pada Tabel 4.33.

Tabel 4. 32 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 4

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	19,98	99,9
F. Pinang Awan	20,03	100,15
F. Supreme	20,21	101,05
F. Exp Pekonina	19,27	96,35
F. Kota Lubuk Gadang	20,09	100,45
F. Lubuak Malako	19,21	96,05
F. Sei Lambai	20,08	100,4
F. Tandai	19,99	99,95
F. Abai Sangir	18,75	93,75
F. Balai Janggo	18,97	94,85
F. Muaralabuh	18,88	94,4
F. Surian	18,78	93,9

Berdasarkan Tabel 4.33, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan variasi nilai dengan tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,21 kV atau 101,05 persen. Sementara itu, jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,75 kV atau 93,75 persen, yang kemudian disusul oleh Penyulang Surian dengan nilai sebesar 18,78 kV atau 93,90 persen. Evaluasi kelayakan operasional yang mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN menetapkan batas minimum tegangan jaringan pada angka 90%, sehingga kondisi kelistrikan pada Skenario 4 ini dikategorikan aman dan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas aman, simulasi Skenario 4 juga memberikan hasil terkait rugi-rugi daya jaringan. Sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 1,80 MW dan susut daya reaktif sebesar 5,12 MVAR. Angka kerugian daya ini menunjukkan perbaikan efisiensi jika dibandingkan dengan Skenario 1 saat seluruh pembangkit terdistribusi berstatus OFF, di mana susut daya aktif mencapai 2,55 MW dan daya reaktif sebesar 6,80 MVAR. Penurunan rugi-rugi daya ini mengindikasikan bahwa manuver konfigurasi unit pembangkit yang berstatus ON pada Skenario 4 turut memberikan kontribusi dalam menyuplai energi secara lokal, sehingga memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk dan mengurangi disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.5 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 5

Skenario 5 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai secara bersamaan oleh GI Muara Labuh, satu unit generator PLTM WSE, dan satu unit generator PLTM SKE. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 8,75 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 5 ditunjukkan pada Tabel 4.34.

Tabel 4. 33 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 5

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,64	103,2
F. Pinang Awan	20,69	103,45
F. Supreme	20,86	104,3
F. Exp Pekonina	20,1	100,5
F. Kota Lubuk Gadang	20,33	101,65
F. Lubuak Malako	19,46	97,3
F. Sei Lambai	20,33	101,65
F. Tandai	20,23	101,15
F. Abai Sangir	19,01	95,05

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Balai Janggo	19,23	96,15
F. Muaralabuh	19,74	98,7
F. Surian	19,65	98,25

Berdasarkan Tabel 4.34, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan performa yang sangat baik. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,86 kV atau 104,30 persen, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 19,01 kV atau 95,05 persen yang kemudian disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 19,23 kV atau 96,15 persen. Evaluasi kelayakan operasional yang mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN menetapkan batas minimum tegangan jaringan pada angka 90 persen, sehingga kondisi kelistrikan pada Skenario 5 ini dikategorikan aman dan sangat andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas aman, pengoperasian Skenario 5 dengan manuver unit pembangkit terdistribusi berstatus ON juga menunjukkan efisiensi penyaluran daya yang sangat baik. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif yang tergolong minim yakni sebesar 0,82 MW dan susut daya reaktif sebesar 2,74 MVAR. Pencapaian angka kerugian daya yang rendah ini membuktikan bahwa kehadiran pembangkit terdistribusi yang beroperasi secara optimal mampu menyuplai kebutuhan energi secara lokal di sekitar pusat beban. Hal tersebut secara langsung efektif memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk, sehingga disipasi panas yang terjadi pada konduktor saluran utama dapat diminimalisasi.

4.3.6 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 6

Skenario 6 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan PLTM WSE pada kapasitas *existing* (2 unit), sedangkan seluruh unit generator pada PLTM SKE tidak dioperasikan. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 10 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 34 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 6

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,63	103,15
F. Pinang Awan	20,68	103,4
F. Supreme	20,86	104,3

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Exp Pekonina	20,1	100,5
F. Kota Lubuk Gadang	19,77	98,85
F. Lubuak Malako	18,88	94,4
F. Sei Lambai	19,77	98,85
F. Tandai	20,77	103,85
F. Abai Sangir	18,41	92,05
F. Balai Janggo	18,65	93,25
F. Muaralabuh	19,74	98,7
F. Surian	19,64	98,2

Berdasarkan Tabel 4.35, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan variasi nilai dengan tegangan tertinggi tetap dipertahankan pada Penyulang Supreme sebesar 20,86 kV atau 104,30 persen, yang disusul oleh Penyulang Tandai sebesar 20,77 kV atau 103,85 persen. Sementara itu, jatuh tegangan paling signifikan dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,41 kV atau 92,05 persen, yang diikuti oleh Penyulang Balai Janggo dengan nilai sebesar 18,65 kV atau 93,25 persen. Evaluasi kelayakan operasional yang mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN menetapkan batas minimum tegangan jaringan pada angka 90 persen. Mengacu pada regulasi tersebut, kondisi kelistrikan pada Skenario 6 ini masih dikategorikan aman dan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis, meskipun terdapat penurunan margin tegangan pada beberapa penyulang dengan bentang jaringan panjang.

Selain menjaga profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 6 dengan mengaktifkan konfigurasi unit pembangkit berstatus ON memberikan kontribusi penting terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 1,03 MW dan susut daya reaktif sebesar 3,15 MVAR. Nilai kerugian daya yang relatif dapat ditekan ini menegaskan bahwa manuver suplai energi lokal dari pembangkit terdistribusi mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk secara efektif, sehingga turut meminimalisasi tingkat disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.7 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 7

Skenario 7 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh, satu unit generator PLTM WSE, serta PLTM SKE yang beroperasi pada kapasitas penuh (2 unit). Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 12,5 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 35 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 7

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,55	102,75
F. Pinang Awan	20,6	103
F. Supreme	20,78	103,9
F. Exp Pekonina	19,99	99,95
F. Kota Lubuk Gadang	20,2	101
F. Lubuak Malako	19,33	96,65
F. Sei Lambai	20,19	100,95
F. Tandai	20,1	100,5
F. Abai Sangir	18,87	94,35
F. Balai Janggo	19,09	95,45
F. Muaralabuh	19,63	98,15
F. Surian	19,53	97,65

Berdasarkan Tabel 4.36, profil tegangan ujung penyulang kembali menunjukkan performa yang stabil dan aman. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,78 kV atau 103,90 persen, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,87 kV atau 94,35 persen yang disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 19,09 kV atau 95,45 persen. Mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN yang menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90 persen, kondisi kelistrikan pada Skenario 7 ini dikategorikan aman dan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 7 dengan mengaktifkan konfigurasi unit pembangkit berstatus ON juga memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 1,12 MW dan susut daya reaktif sebesar 3,35 MVAR. Pencapaian nilai kerugian daya yang efisien ini menegaskan bahwa manuver suplai energi dari pembangkit terdistribusi secara lokal mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk, sehingga secara efektif menekan tingkat disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.8 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 8

Skenario 8 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh, PLTM WSE pada kapasitas *existing* (2 unit), dan satu unit generator PLTM SKE. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 13,75 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 36 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 8

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,66	103,3
F. Pinang Awan	20,71	103,55
F. Supreme	20,89	104,45
F. Exp Pekonina	20,13	100,65
F. Kota Lubuk Gadang	20,34	101,7
F. Lubuak Malako	19,48	97,4
F. Sei Lambai	20,34	101,7
F. Tandai	20,24	101,2
F. Abai Sangir	19,02	95,1
F. Balai Janggo	19,24	96,2
F. Muaralabuh	19,77	98,85
F. Surian	19,68	98,4

Berdasarkan Tabel 4.37, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan performa operasional yang sangat baik. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,89 kV atau 104,45 persen, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 19,02 kV atau 95,10 persen yang disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 19,24 kV atau 96,20 persen. Mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN yang menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90 persen, kondisi kelistrikan pada Skenario 8 ini dikategorikan aman dan sangat andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi cukup jauh di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 8 dengan mengaktifkan konfigurasi unit pembangkit berstatus ON memberikan kontribusi yang sangat optimal terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif yang sangat rendah yakni sebesar 0,67 MW dan susut daya reaktif sebesar 2,11 MVAR. Pencapaian susut daya jaringan yang sangat minim ini menegaskan bahwa manuver suplai energi dari pembangkit terdistribusi secara lokal mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk secara maksimal, sehingga secara efektif menekan tingkat disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.9 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 9

Skenario 9 merupakan kondisi operasi setelah penambahan unit generator pada PLTM WSE, yaitu ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan PLTM WSE beroperasi pada kapasitas penuh (3 unit), sedangkan seluruh unit generator

pada PLTM SKE tidak dioperasikan. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 15 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 37 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 9

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,56	102,8
F. Pinang Awan	20,61	103,05
F. Supreme	20,79	103,95
F. Exp Pekonina	20,01	100,05
F. Kota Lubuk Gadang	19,82	99,1
F. Lubuak Malako	18,92	94,6
F. Sei Lambai	19,81	99,05
F. Tandai	20,76	103,8
F. Abai Sangir	18,46	92,3
F. Balai Janggo	18,68	93,4
F. Muaralabuh	19,64	98,2
F. Surian	19,55	97,75

Berdasarkan Tabel 4.38, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan performa operasional yang aman. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,79 kV atau 103,95 persen, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,46 kV atau 92,30 persen yang disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 18,68 kV atau 93,40 persen. Mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN yang menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90 persen, kondisi kelistrikan pada Skenario 9 ini dikategorikan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 9 dengan mengaktifkan konfigurasi unit pembangkit berstatus ON memberikan kontribusi yang baik terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 0,84 MW dan susut daya reaktif sebesar 2,50 MVAR. Pencapaian nilai kerugian daya yang efisien ini kembali menegaskan bahwa manuver suplai energi dari pembangkit terdistribusi secara lokal mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk, sehingga secara efektif menekan tingkat disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.10 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 10

Skenario 10 merupakan kondisi operasi ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh, PLTM WSE pada kapasitas *existing* (2 unit), serta PLTM SKE yang beroperasi pada kapasitas penuh (2 unit). Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 17,5 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 38 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 10

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,59	102,95
F. Pinang Awan	20,64	103,2
F. Supreme	20,82	104,1
F. Exp Pekonina	20,05	100,25
F. Kota Lubuk Gadang	20,31	101,55
F. Lubuak Malako	19,44	97,2
F. Sei Lambai	20,3	101,5
F. Tandai	20,2	101
F. Abai Sangir	18,99	94,95
F. Balai Janggo	19,2	96
F. Muaralabuh	19,68	98,4
F. Surian	19,59	97,95

Baik, pola penyesuaian yang sama telah diterapkan untuk draf Skenario 10 ini.

Sesuai dengan format yang kita gunakan sebelumnya, saya telah **menghapus penyebutan total pembebanan (20,29 MW)** dan **menghilangkan kalimat perbandingan dengan Skenario 3**. Dengan demikian, paragraf ini sekarang murni berfokus pada evaluasi performa dan efisiensi khusus untuk Skenario 10 saja (di mana PLTM WSE dan PLTM SKE menyala bersamaan).

Berikut adalah hasil revisinya yang sudah rapi dan siap disalin ke dalam naskah skripsi kamu:

Berdasarkan Tabel 4.39, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan performa operasional yang aman. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,82 kV atau 104,10 %, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,99 kV atau 94,95 % yang disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 19,20 kV atau 96,00 %. Mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN yang menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90 %, kondisi kelistrikan pada Skenario 10 ini

dikategorikan aman dan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 10 dengan mengaktifkan konfigurasi unit pembangkit PLTM WSE berstatus ON dan PLTM SKE berstatus ON secara bersamaan memberikan kontribusi terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 0,96 MW dan susut daya reaktif sebesar 2,83 MVAR. Pencapaian nilai kerugian daya yang efisien ini kembali menegaskan bahwa manuver suplai energi dari pembangkit terdistribusi secara lokal mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk, sehingga secara efektif menekan tingkat disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.11 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 11

Skenario 11 merupakan kondisi operasi setelah penambahan unit generator pada PLTM WSE, yaitu ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh, PLTM WSE pada kapasitas penuh (3 unit), dan satu unit generator PLTM SKE. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 18,75 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 39 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 11

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,57	102,85
F. Pinang Awan	20,62	103,1
F. Supreme	20,8	104
F. Exp Pekonina	20,02	100,1
F. Kota Lubuk Gadang	20,3	101,5
F. Lubuak Malako	19,43	97,15
F. Sei Lambai	20,29	101,45
F. Tandai	20,2	101
F. Abai Sangir	18,98	94,9
F. Balai Janggo	19,19	95,95
F. Muaralabuh	19,65	98,25
F. Surian	19,56	97,8

Berdasarkan Tabel 4.40, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan performa operasional yang aman. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,80 kV atau 104,00 %, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,98 kV atau 94,90 % yang

disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 19,19 kV atau 95,95 %. Mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN yang menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90 %, kondisi kelistrikan pada Skenario 11 ini dikategorikan aman dan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi cukup jauh di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 11 dengan mengaktifkan konfigurasi penambahan unit pembangkit PLTM WSE berstatus ON dan PLTM SKE berstatus ON memberikan kontribusi yang sangat optimal terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 0,80 MW dan susut daya reaktif sebesar 2,42 MVAR. Pencapaian susut daya jaringan yang sangat minim ini menegaskan bahwa manuver suplai energi dari pembangkit terdistribusi secara lokal mampu memangkas jarak rambat aliran arus dari gardu induk, sehingga secara efektif menekan tingkat disipasi panas pada konduktor saluran utama.

4.3.12 Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Skenario 12

Skenario 12 merupakan kondisi operasi maksimum ketika sistem disuplai oleh GI Muara Labuh bersama seluruh unit generator yang tersedia, yaitu tiga unit pada PLTM WSE dan dua unit pada PLTM SKE yang beroperasi secara bersamaan. Total kapasitas pembangkit yang beroperasi pada skenario ini adalah 22,5 MW. Hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1 ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 40 Profil Tegangan Ujung Penyulang Skenario 12

Penyulang	Tegangan Ujung Penyulang	% Tegangan
F. Mitra	20,5	102,5
F. Pinang Awan	20,55	102,75
F. Supreme	20,73	103,65
F. Exp Pekonina	19,93	99,65
F. Kota Lubuk Gadang	20,27	101,35
F. Lubuak Malako	19,4	97
F. Sei Lambai	20,27	101,35
F. Tandai	20,17	100,85
F. Abai Sangir	18,95	94,75
F. Balai Janggo	19,16	95,8
F. Muaralabuh	19,56	97,8
F. Surian	19,46	97,3

Berdasarkan Tabel 4.41, profil tegangan ujung penyulang menunjukkan performa operasional yang aman. Nilai tegangan tertinggi tercatat pada Penyulang Supreme sebesar 20,73 kV atau 103,65 %, sedangkan jatuh tegangan terbesar dialami oleh Penyulang Abai Sangir dengan nilai 18,95 kV atau 94,75 % yang disusul oleh Penyulang Balai Janggo sebesar 19,16 kV atau 95,80 %. Mengacu pada Standar Perusahaan Umum Listrik Negara atau SPLN yang menetapkan batas minimum tegangan operasional pada 90 %, kondisi kelistrikan pada Skenario 12 ini dikategorikan aman dan andal karena seluruh titik ujung penyulang berhasil beroperasi di atas batas kritis tersebut.

Selain mempertahankan profil tegangan dalam batas standar pelayanan, pengoperasian Skenario 12 dengan mengaktifkan seluruh unit pembangkit PLTM WSE berstatus ON dan PLTM SKE berstatus ON secara bersamaan memberikan dinamika tersendiri terhadap efisiensi rugi-rugi daya jaringan. Pada skenario ini, sistem mencatatkan susut daya aktif sebesar 1,10 MW dan susut daya reaktif sebesar 3,24 MVAR. Akan tetapi, evaluasi susut daya ini juga mengindikasikan bahwa pengoperasian seluruh kapasitas pembangkit secara maksimal berpotensi memicu peningkatan rugi-rugi jaringan akibat adanya lonjakan aliran daya dari pembangkit terdistribusi yang melebihi titik serap optimal beban lokal.

4.4 Perbandingan Profil Tegangan dan Rugi – Rugi Daya Setelah Dilakukan Perubahan Skenario Operasi.

Setelah hasil aliran daya pada kedua belas skenario operasi berhasil didapatkan dan dianalisis secara individual, tahapan selanjutnya adalah melakukan studi komparatif secara menyeluruh. Evaluasi komparatif ini bertujuan untuk melihat respons jaringan distribusi 20 kV ULP Muara Labuh terhadap berbagai manuver interkoneksi pembangkit tersebar, terutama untuk mengukur tingkat efisiensi sistem sebelum dan sesudah penambahan generator 5 MW pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro WSE. Perbandingan ini sangat esensial untuk menemukan titik operasi paling optimal dalam menjaga mutu tegangan pelayanan sekaligus menekan tingkat kerugian energi pada konduktor saluran distribusi utama.

4.4.1 Analisis Perbandingan Profil Tegangan Ujung Penyulang

Berdasarkan keseluruhan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh data hasil perbandingan profil tegangan ujung penyulang untuk kondisi normal dan kedua belas skenario operasi disajikan pada Tabel 4.42.

Tabel 4. 41 Profil Tegangan Ujung Penyulang pada Berbagai Skenario Operasi

Penyulang	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5	Skenario 6
F. Mitra	19,95	20,06	20,37	20,54	20,64	20,63

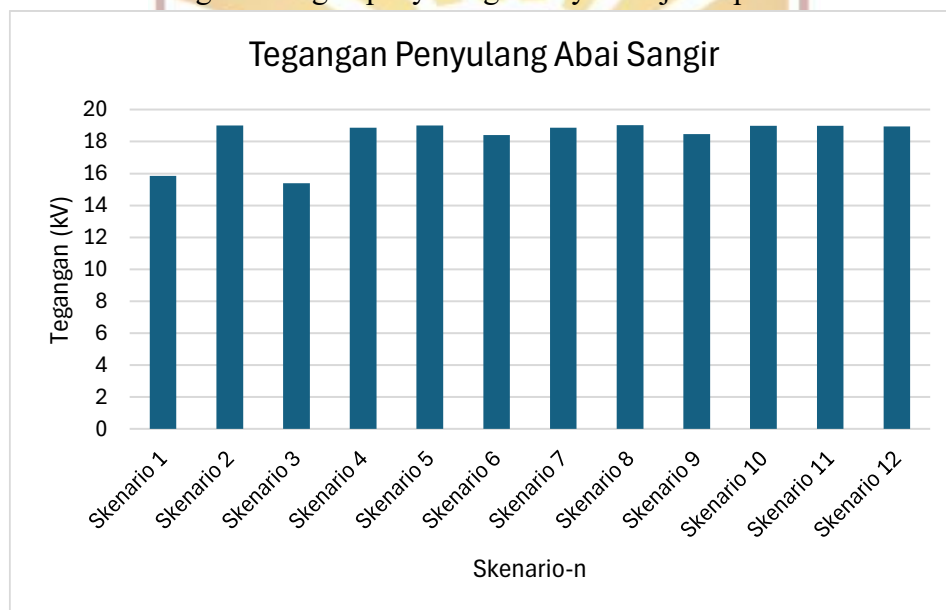
Penyulang	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5	Skenario 6
F. Pinang Awan	20	20,11	20,42	20,59	20,69	20,68
F. Supreme	20,18	20,3	20,6	20,77	20,86	20,86
F. Exp Pekonina	19,24	19,38	19,77	19,98	20,1	20,1
F. Kota Lubuk Gadang	16,35	20,14	17,03	20,2	20,33	19,77
F. Lubuak Malako	15,23	19,27	15,96	19,32	19,46	18,88
F. Sei Lambai	16,37	20,14	17,04	20,19	20,33	19,77
F. Tandai	16,25	20,04	16,93	20,09	20,23	20,77
F. Abai Sangir	14,63	18,81	15,4	18,87	19,01	18,41
F. Balai Janggo	14,91	19,03	15,67	19,08	19,23	18,65
F. Muaralabuh	18,84	18,99	19,39	19,61	19,74	19,74
F. Surian	18,74	18,89	19,3	19,52	19,65	19,64

Tabel 4. 42 Profil Tegangan Ujung Penyulang pada Berbagai Skenario Operasi (Lanjutan)

Penyulang	Skenario 7	Skenario 8	Skenario 9	Skenario 10	Skenario 11	Skenario 12
F. Mitra	20,55	20,66	20,56	20,59	20,57	20,5
F. Pinang Awan	20,6	20,71	20,61	20,64	20,62	20,55
F. Supreme	20,78	20,89	20,79	20,82	20,8	20,73
F. Exp Pekonina	19,99	20,13	20,01	20,05	20,02	19,93
F. Kota Lubuk Gadang	20,2	20,34	19,82	20,31	20,3	20,27
F. Lubuak Malako	19,33	19,48	18,92	19,44	19,43	19,4
F. Sei Lambai	20,19	20,34	19,81	20,3	20,29	20,27
F. Tandai	20,1	20,24	20,76	20,2	20,2	20,17

Penyulang	Skenario 7	Skenario 8	Skenario 9	Skenario 10	Skenario 11	Skenario 12
F. Abai Sangir	18,87	19,02	18,46	18,99	18,98	18,95
F. Balai Janggo	19,09	19,24	18,68	19,2	19,19	19,16
F. Muaralabuh	19,63	19,77	19,64	19,68	19,65	19,56
F. Surian	19,53	19,68	19,55	19,59	19,56	19,46

Adapun tren perubahan parameter kelistrikan pada setiap skenario operasi, visualisasi grafik batang perbandingan profil tegangan ujung Penyulang Abai Sangir yang merupakan penyulang dengan kondisi profil tegangan paling rawan dan kritis dibandingkan dengan penyulang lainnya disajikan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Grafik Perbandingan Profil Tegangan Ujung Penyulang Abai Sangir pada Berbagai Skenario Operasi

Berdasarkan hasil rekapitulasi pada Tabel 4.42 dan Gambar 4.15, analisis komparatif terhadap keseluruhan dua belas skenario operasi memperlihatkan variasi profil tegangan yang sangat dipengaruhi oleh kombinasi status unit pembangkit terdistribusi. Dari seluruh pengujian, Skenario 1 dan Skenario 3 teridentifikasi secara jelas sebagai kondisi operasi yang paling buruk dan tidak relevan untuk diterapkan di lapangan. Hal ini dikarenakan kedua skenario tersebut mencatatkan jatuh tegangan yang sangat parah hingga menembus ke bawah batas minimum standar operasi SPLN yakni 90 % atau di bawah ambang 18,00 kV. Pada Skenario 1 dengan beban 10,35 MW, tegangan ujung Penyulang Abai Sangir merosot tajam hingga 14,63 kV. Kondisi kritis serupa juga terlihat pada Skenario 3

saat total beban meningkat menjadi 20,29 MW, di mana tegangannya anjlok di angka 15,40 kV. Kondisi ekstrem di bawah standar operasi ini terjadi karena sistem murni hanya mengandalkan suplai daya jarak jauh dari gardu induk utama tanpa dukungan injeksi energi dari pembangkit lokal, sehingga panjangnya rute penghantar menuju pusat beban menyebabkan susut tegangan yang masif dan sangat berisiko memicu gangguan sistem perlindungan jaringan.

Sebaliknya, Skenario 2, Skenario 4, beserta Skenario 5 hingga Skenario 12 mampu menunjukkan performa operasional yang jauh lebih baik karena seluruh profil tegangan ujung penyulang berhasil dipertahankan di atas ambang batas kritis 90 %. Di antara kelompok skenario yang memenuhi kelayakan standar tersebut, Skenario 8, Skenario 11, dan Skenario 12 tampil sebagai konfigurasi manuver yang paling baik dan optimal saat sistem distribusi memikul pembebanan berat sebesar 20,29 MW. Keunggulan teknis ini dicapai berkat strategi manuver yang mengaktifkan unit Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro WSE berstatus beroperasi serta Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro SKE berstatus beroperasi yang lokasinya sangat berdekatan dengan area padat beban. Interkoneksi pembangkit lokal yang beroperasi pada ketiga skenario optimal tersebut terbukti paling efektif dalam memikul sebagian beban arus secara lokal, sehingga sukses mendongkrak tegangan pada titik paling rawan yakni Penyulang Abai Sangir hingga menyentuh level 19,02 kV pada Skenario 8 dan 18,98 kV pada Skenario 11. Fakta analisis ini memberikan kesimpulan kuat bahwa pola operasi desentralisasi dengan menyiagakan pembangkit tersebar merupakan solusi utama yang paling direkomendasikan untuk menjamin mutu dan keandalan tegangan pelayanan.

4.4.2 Analisis Perbandingan Rugi-Rugi Daya

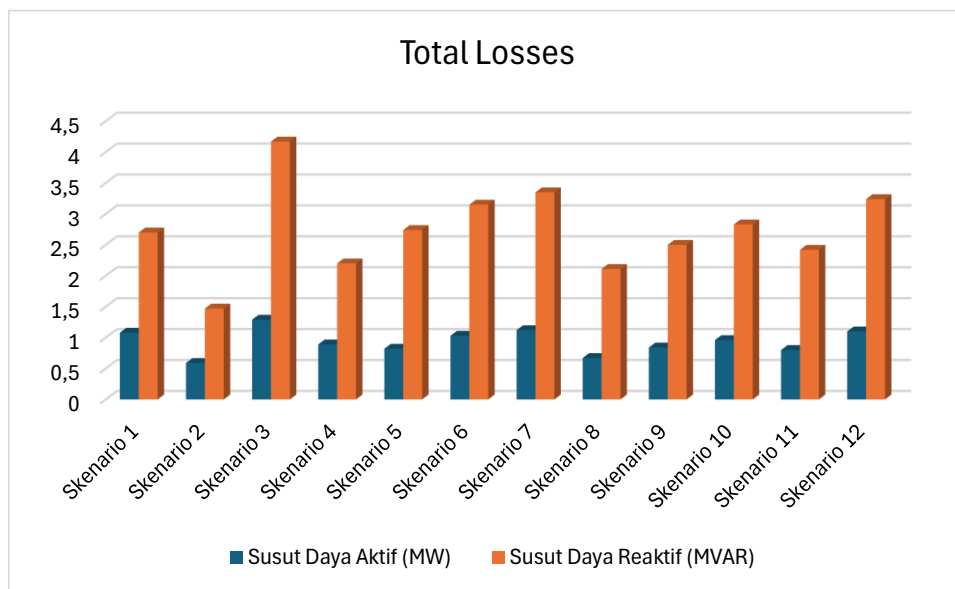
Berdasarkan keseluruhan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh juga data perbandingan total rugi-rugi daya jaringan yang mencakup daya aktif dan daya reaktif untuk seluruh kondisi pembebanan disajikan pada Tabel 4.43.

Tabel 4. 42 Total Rugi-Rugi Daya Sistem pada Berbagai Skenario Operasi

Skenario Operasi	Susut Daya Aktif (MW)	Susut Daya Reaktif (MVAR)
Skenario 1	2,22	6,8
Skenario 2	1,55	4,67
Skenario 3	1,29	4,17
Skenario 4	1,80	5,12
Skenario 5	0,82	2,74
Skenario 6	1,03	3,15
Skenario 7	1,12	3,35
Skenario 8	0,67	2,11

Skenario Operasi	Susut Daya Aktif (MW)	Susut Daya Reaktif (MVAR)
Skenario 9	0,84	2,5
Skenario 10	0,96	2,83
Skenario 11	0,8	2,42
Skenario 12	1,1	3,24

Adapun grafik total rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif pada setiap scenario ditampilkan pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Rugi-Rugi Daya Sistem pada Berbagai Skenario Operasi

Berdasarkan data rekapitulasi pada Tabel 4.43 dan Gambar 4.16, analisis komparatif terhadap keseluruhan dua belas skenario operasi memperlihatkan fluktuasi nilai rugi-rugi daya yang bervariasi. Nilai susut daya tertinggi kini tercatat secara berurutan pada Skenario 1 dengan rugi-rugi daya aktif mencapai 2,22 MW, diikuti oleh Skenario 4 sebesar 1,80 MW, Skenario 2 sebesar 1,55 MW, dan Skenario 3 sebesar 1,29 MW. Tingginya kerugian daya pada kelompok skenario ini dominan disebabkan oleh minimnya kapasitas pembangkit lokal yang beroperasi, sehingga pemenuhan beban sangat mengandalkan suplai penuh dari gardu induk utama melalui saluran distribusi yang panjang. Di sisi lain, tingginya kerugian daya pada Skenario 12 yang mencapai 1,1 MW merupakan anomali teknis akibat fenomena aliran daya balik atau *reverse power flow*. Sebagai skenario paling akhir dengan total kapasitas pembangkit paling besar, Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro WSE berstatus beroperasi dan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro SKE berstatus beroperasi menghasilkan total daya yang melebihi kebutuhan

pembebanan di sekitarnya. Kelebihan daya ini mengalir balik menuju gardu induk utama, sehingga memicu peningkatan arus pada penghantar yang bermuara pada tingginya disipasi energi akibat resistansi jaringan.

Sementara itu, tingkat efisiensi penyaluran daya pada level menengah teramati pada skenario transisi seiring dengan peningkatan kapasitas pembangkit secara bertahap. Skenario 7, Skenario 6, dan Skenario 10 masing-masing mencatatkan susut daya sebesar 1,12 MW, 1,03 MW, dan 0,96 MW. Efisiensi yang lebih baik mulai terlihat pada Skenario 9 sebesar 0,84 MW dan Skenario 5 sebesar 0,82 MW. Pada kelompok ini, penambahan kapasitas pasokan daya dari unit pembangkit terdistribusi mulai berhasil menekan sebagian volume arus yang ditarik dari gardu induk utama. Meskipun lebih efisien dibandingkan skenario awal, konfigurasi kapasitas pembangkit pada kelompok skenario transisi ini belum menyentuh titik kerugian energi paling minimal karena porsi penyerapan daya secara lokal belum sepenuhnya seimbang dengan total beban jaringan yang harus disuplai.

Performa penyaluran daya yang paling maksimal dan berstatus paling optimal secara nyata dicapai pada pengujian Skenario 8 dan Skenario 11. Kedua skenario ini sukses mencatatkan nilai rugi-rugi daya jaringan yang paling rendah secara keseluruhan, yakni hanya sebesar 0,67 MW pada Skenario 8, serta 0,8 MW pada Skenario 11. Pencapaian efisiensi energi yang sangat signifikan pada kedua skenario ini menegaskan bahwa kapasitas total pembangkit yang beroperasi telah berada pada titik keseimbangan yang paling proporsional terhadap kebutuhan suplai beban sistem. Fakta teknis ini membuktikan bahwa strategi pengaturan kapasitas suplai energi lokal yang presisi dan sejajar dengan penyerapan beban sangat krusial, sebab defisit kapasitas akan memperbesar rugi-rugi akibat penarikan arus dari gardu induk, sedangkan surplus kapasitas berlebih seperti pada skenario akhir justru memicu kerugian daya secara masif akibat aliran daya balik.

4.5 Analisis Proyeksi Pertumbuhan Beban Sistem Distribusi Berdasarkan RUPTL

Berdasarkan hasil evaluasi pada kondisi pembebanan awal (*existing*), nilai rugi-rugi daya tertinggi pada sistem tercatat pada Skenario 1 dengan susut daya aktif mencapai 2,22 MW dan susut daya reaktif sebesar 6,8 MVAR. Tingginya angka kerugian ini terjadi murni karena ketiadaan injeksi daya dari pembangkit terdistribusi. Di sisi lain, pengoperasian seluruh kapasitas pembangkitan secara maksimal termasuk penambahan generator 5 MW pada PLTM WSE seperti pada Skenario 12 juga tetap menghasilkan rugi-rugi daya jaringan yang relatif tinggi. Berbeda dengan Skenario 1, tingginya susut daya pada Skenario 12 disebabkan oleh kapasitas total pembangkitan yang telah melebihi kemampuan serap beban sistem lokal. Skenario 12 menjadi satu-satunya kondisi pengujian yang mengalami surplus daya, sehingga memicu terjadinya aliran daya balik (*reverse power flow*) menuju transmisi melalui Gardu Induk Muara Labuh.

Namun demikian, pembangunan dan ekspansi unit pembangkit baru merupakan bagian integral dari perencanaan strategis jangka panjang untuk mengantisipasi pertumbuhan kebutuhan energi listrik di masa mendatang. Oleh karena itu, dilakukan analisis proyeksi pertumbuhan beban untuk mengetahui pada kondisi pembebanan ke berapa penambahan generator 5 MW tersebut dapat terserap sepenuhnya tanpa memicu aliran daya balik, sehingga pemanfaatannya menjadi optimal. Proyeksi pertumbuhan beban pada penelitian ini mengacu pada dokumen Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero), dengan rata-rata laju pertumbuhan beban ditarik pada angka 4,04 % per tahun. sehingga asumsi pertumbuhan dihitung menggunakan persamaan 4.3 berikut [34].

$$P_n = P_0(1 + r)^n \quad (4.3)$$

Dimana:

- P_n = Total beban sistem pada tahun proyeksi ke- n
- P_0 = Total beban awal sistem pada kondisi *existing*
- r = Laju pertumbuhan beban per tahun (4,04% atau 0,0404)
- n = Rentang waktu proyeksi (tahun)

Simulasi dilakukan menggunakan fitur Load Scaling pada perangkat lunak DigSILENT PowerFactory. Berdasarkan evaluasi kondisi *existing* sebelumnya, Skenario 1 dan Skenario 3 dieliminasi dari tahap ini karena menghasilkan jatuh tegangan yang melewati batas kritis. Oleh sebab itu, simulasi proyeksi membandingkan sepuluh skenario tersisa yang terbukti memiliki kondisi profil tegangan yang baik, yaitu Skenario 2 dan Skenario 4 hingga Skenario 12. Evaluasi secara komprehensif difokuskan pada perubahan rugi-rugi daya sistem dan pergeseran profil tegangan pada Penyulang Abai Sangir. Penyulang ini digunakan sebagai satu-satunya parameter acuan penyusutan tegangan karena memiliki bentang topologi jaringan paling jauh dari sumber utama, sehingga merepresentasikan kondisi tegangan yang paling kritis dan paling rawan di antara kedua belas penyulang.

4.5.1 Analisis Profil Tegangan Penyulang Abai Sangir terhadap Pertumbuhan Beban

Evaluasi pertama terhadap proyeksi pertumbuhan beban difokuskan pada kemampuan sistem dalam mempertahankan profil tegangan sesuai batas minimum operasional Standar Perusahaan Umum Listrik Negara (SPLN), yakni sebesar 90 % atau tidak kurang dari 18,00 kV. Sebagai representasi batas akhir keandalan operasional sistem, hasil simulasi penurunan tegangan pada Penyulang Abai Sangir dari kondisi sekarang (*existing*) hingga Tahun ke-7 disajikan pada Tabel 4.44.

Tabel 4. 43 Proyeksi Pertumbuhan Beban terhadap Profil Tegangan Ujung Penyulang Abai Sangir

Skenario	Tahun Pembebanan						
	Tahun ke-1 105,00 %	Tahun ke-2 110,25 %	Tahun ke-3 115,76 %	Tahun ke-4 121,55 %	Tahun ke-5 127,63 %	Tahun ke-6 134,01%	Tahun ke-7 140,71%
Skenario 2	18,46	18,08	17,65	17,16	16,6	15,93	15,09
Skenario 4	18,62	18,58	18,42	18,26	18,08	17,99	17,78
Skenario 5	18,86	18,78	18,59	18,19	17,73	17,22	16,62
Skenario 6	18,17	17,87	17,52	17,09	16,53	Tidak Konvergen	Tidak Konvergen
Skenario 7	18,85	18,71	18,57	18,42	18,36	18,18	17,99
Skenario 8	18,89	18,83	18,67	18,43	18,06	17,64	17,15
Skenario 9	18,36	18,21	18,05	17,9	17,68	17,44	17,18
Skenario 10	18,87	18,75	18,62	18,49	18,34	18,28	18,11
Skenario 11	18,93	18,78	18,64	18,3	17,93	17,52	17,05
Skenario 12	18,84	18,72	18,59	18,45	18,41	18,25	18,09

Berikut adalah revisi narasinya. Saya telah membulatkan nilai dayanya menjadi 2 angka di belakang koma dan menghilangkan penggunaan tanda kurung dengan cara mengintegrasikan persentase dan nilai MW tersebut langsung ke dalam struktur kalimat.

Berdasarkan Tabel 4.44, peningkatan beban dari tahun ke tahun menyebabkan profil tegangan pada seluruh skenario mengalami penurunan secara bertahap. Pada Tahun ke-1 dengan persentase beban 104,04 % atau setara 21,11 MW, kesepuluh skenario yakni Skenario 2 dan scenario 4 hingga 12 masih beroperasi dalam kondisi aman. Tegangan di ujung Penyulang Abai Sangir pada seluruh skenario tersebut berhasil dipertahankan dengan baik di atas ambang batas kritis 18,00 kV.

Memasuki Tahun ke-2 saat beban mencapai 108,24 % atau 21,96 MW, Skenario 6 menjadi konfigurasi pertama yang gagal mempertahankan tegangannya,

di mana nilainya turun di bawah standar menjadi 17,87 kV. Penurunan tegangan pada Skenario 6 ini terus memburuk secara signifikan seiring berjalannya waktu, hingga akhirnya mengalami kondisi Tidak Konvergen mulai dari Tahun ke-6 dengan beban 25,73 MW sampai dengan Tahun ke-7 pada level 26,77 MW. Kondisi Tidak Konvergen ini menyatakan bahwa simulasi aliran daya atau *load flow* tidak bisa lagi dijalankan karena jatuh tegangan atau *voltage drop* yang terjadi pada jaringan sudah sangat besar, sehingga perangkat lunak tidak dapat menyelesaikan persamaan matematisnya. Selanjutnya pada Tahun ke-3 saat pembebanan berada di angka 112,62 % atau 22,85 MW, Skenario 2 menyusul gagal beroperasi di atas standar karena tegangannya merosot menjadi 17,65 kV.

Penurunan kemampuan sistem terus merambat pada Tahun ke-4 di mana total beban menyentuh 117,17 % atau 23,77 MW. Pada fase ini Skenario 9 mulai tidak mampu menopang beban dengan nilai tegangan yang turun menjadi 17,90 kV. Kemudian pada Tahun ke-5 dengan beban 121,90 % atau 24,73 MW, dua skenario sekaligus secara berurutan ikut menyerah. Skenario 5 dan Skenario 11 tercatat mengalami jatuh tegangan masing-masing menjadi 17,73 kV dan 17,93 kV.

Fase pelemahan sistem yang semakin meluas terlihat pada Tahun ke-6 saat beban berada di level 126,83 % atau 25,73 MW. Pada tahun ini, Skenario 4 dan Skenario 8 yang sebelumnya sanggup bertahan akhirnya ikut terperosok di bawah standar, masing-masing mencatatkan nilai 17,99 kV dan 17,64 kV. Terakhir pada Tahun ke-7 dengan proyeksi beban 131,95 % setara 26,77 MW, Skenario 7 menjadi konfigurasi selanjutnya yang runtuh dengan nilai tegangan jatuh ke angka 17,99 kV.

Kondisi kegagalan beruntun dari berbagai skenario tersebut menyisakan hanya dua skenario yang sukses bertahan, yaitu Skenario 10 dan Skenario 12. Meskipun terjadi lonjakan pertumbuhan beban yang masif hingga tahun ketujuh yang mencapai total pembebanan 26,77 MW, kedua skenario ini terbukti sebagai konfigurasi yang paling optimal dan tangguh karena sanggup mempertahankan tegangan di atas 18,00 kV. Nilai tegangannya tercatat sebesar 18,11 kV untuk Skenario 10 dan 18,09 kV untuk Skenario 12. Fakta teknis ini memberikan kesimpulan akhir yang jelas bahwa infrastruktur kelistrikan yang ada saat ini secara mutlak membutuhkan intervensi kapasitas baru secara penuh, sebagaimana direpresentasikan oleh konfigurasi pembangkit pada Skenario 10 dan 12, guna mengamankan keandalan dan kualitas tegangan sistem distribusi di masa mendatang.

4.5.2 Analisis Rugi-Rugi Daya terhadap Pertumbuhan Beban

Setelah memastikan kelayakan operasi melalui profil tegangan, parameter krusial selanjutnya yang dievaluasi adalah tingkat efisiensi sistem melalui analisis rugi-rugi daya aktif (MW). Seiring dengan proyeksi pertumbuhan beban sebesar 4,04 % per tahun, nilai rugi-rugi daya secara alamiah akan terus mengalami eskalasi akibat bertambahnya beban arus pada penghantar jaringan. Perbandingan nilai rugi-rugi daya untuk kesepuluh skenario disajikan pada Tabel 4.45.

Tabel 4. 44 Proyeksi Pertumbuhan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya Sistem

Skenario	Rugi Rugi Daya	Tahun Pembebanan						
		Tahun ke-1	Tahun ke-2	Tahun ke-3	Tahun ke-4	Tahun ke-5	Tahun ke-6	Tahun ke-7
		104,04 %	108,24 %	112,62 %	117,17 %	121,90 %	126,83 %	131,95 %
Skenario 2	Daya Aktif (MW)	1,72	1,92	2,15	2,43	2,77	3,19	3,74
	Daya Reaktif (MVar)	5,21	5,83	6,56	7,43	8,48	9,79	11,47
Skenario 4	Daya Aktif (MW)	1,95	2,1	2,29	2,51	2,78	3,08	3,46
	Daya Reaktif (MVar)	5,55	6,02	6,6	7,28	8,08	8,99	10,14
Skenario 5	Daya Aktif (MW)	0,91	1,01	1,12	1,26	1,43	1,63	1,88
	Daya Reaktif (MVar)	3	3,3	3,65	4,07	4,57	5,17	5,91
Skenario 6	Daya Aktif (MW)	1,24	1,49	1,81	2,22	2,76	Tidak Konvergen	Tidak Konvergen
	Daya Reaktif (MVar)	3,72	4,42	5,3	6,43	7,93		
Skenario 7	Daya Aktif (MW)	1,17	1,24	1,33	1,43	1,54	1,69	1,86
	Daya Reaktif (MVar)	3,51	3,72	3,98	4,28	4,62	5,05	5,56
Skenario 8	Daya Aktif (MW)	0,73	0,8	0,89	0,99	1,12	1,27	1,46
	Daya Reaktif (MVar)	2,30	2,52	2,78	3,09	3,46	3,91	4,43

Skenario	Rugi Rugi Daya	Tahun Pembebanan						
		Tahun ke-1	Tahun ke-2	Tahun ke-3	Tahun ke-4	Tahun ke-5	Tahun ke-6	Tahun ke-7
		104,04 %	108,24 %	112,62 %	117,17 %	121,90 %	126,83 %	131,95 %
Skenario 9	Daya Aktif (MW)	0,85	0,89	0,96	1,05	1,19	1,38	1,63
	Daya Reaktif (MVar)	2,55	2,67	2,87	3,14	3,53	4,04	4,72
Skenario 10	Daya Aktif (MW)	1	1,05	1,11	1,19	1,27	1,37	1,49
	Daya Reaktif (MVar)	2,94	3,08	3,26	3,47	3,73	4	4,34
Skenario 11	Daya Aktif (MW)	0,84	0,89	0,94	1,02	1,12	1,23	1,38
	Daya Reaktif (MVar)	2,52	2,64	2,8	3	3,25	3,57	3,97
Skenario 12	Daya Aktif (MW)	1,11	1,14	1,17	1,21	1,26	1,33	1,42
	Daya Reaktif (MVar)	3,26	3,3	3,37	3,47	3,59	3,77	4

Dalam menentukan skenario operasi yang paling optimal, evaluasi efisiensi harus diselaraskan dengan kelayakan profil tegangan. Aturan teknis yang digunakan adalah membandingkan nilai rugi-rugi daya terkecil hanya pada skenario yang tegangannya masih berada di atas ambang batas standar minimum operasi PLN, yakni 18 kV. Mengacu pada hasil analisis sebelumnya di mana Skenario 10 dan Skenario 12 berhasil mempertahankan tegangan di atas 18 kV hingga Tahun ke-7 dengan total pembebanan mencapai 26,77 MW, maka evaluasi komparatif pada sub-bab ini akan dilakukan secara menyeluruh hingga rentang Tahun ke-7.

Berdasarkan Tabel 4.45, pada rentang Tahun ke-1 104,04 % atau 21,10 MW hingga Tahun ke-5 121,90 % atau 24,73 MW, Skenario 8 mendominasi secara mutlak sebagai konfigurasi operasi yang paling efisien. Pada periode ini, tegangan Skenario 8 masih sangat stabil di atas batas minimum, dan secara konsisten menghasilkan rugi-rugi daya aktif terkecil dibandingkan seluruh skenario relevan

lainnya. Nilai kerugian daya pada Skenario 8 dimulai dari 0,73 MW pada Tahun ke-1 dimana total pembebanan 21,10 MW, kemudian naik secara proporsional menjadi 0,80 MW pada Tahun ke-2 (108,24 % atau 21,96 MW), 0,89 MW pada Tahun ke-3 (112,62 % atau 22,85 MW), 0,99 MW pada Tahun ke-4 (117,17 % atau 23,77 MW), dan mencapai 1,12 MW pada Tahun ke-5 (24,73 MW).

Memasuki Tahun ke-6 (126,83 % atau 25,73 MW), terjadi pergeseran kelayakan operasi. Beban kelistrikan yang semakin berat mengakibatkan Skenario 8 tidak sanggup lagi mempertahankan tegangannya (jatuh di bawah 18 kV), sehingga harus tereliminasi dari pilihan operasi yang relevan. Pada tahun ini, opsi skenario yang masih memenuhi standar tegangan minimum hanya menyisakan Skenario 7, Skenario 10, dan Skenario 12. Dari ketiga opsi yang tersisa tersebut, Skenario 12 mengambil alih posisi sebagai konfigurasi kelistrikan paling efisien dengan mencatatkan rugi-rugi daya aktif terkecil sebesar 1,33 MW. Nilai ini lebih optimal dibandingkan Skenario 10 yang mencatatkan susut daya 1,37 MW maupun Skenario 7 sebesar 1,69 MW.

Fase seleksi terakhir yang paling ketat terjadi pada Tahun ke-7 131,95 % di mana total pembebanan melonjak hingga 26,77 MW. Pada titik pembebanan ini, Skenario 7 ikut gugur dari standar operasi, sehingga hanya tersisa dua skenario yang masih relevan beroperasi karena sukses mempertahankan tegangannya di atas 18,00 kV, yaitu Skenario 10 dan Skenario 12. Di antara dua skenario paling tangguh tersebut, Skenario 12 kembali terbukti beroperasi dengan tingkat efisiensi yang lebih baik. Rugi-rugi daya aktif pada Skenario 12 tercatat sebesar 1,42 MW, yang mana nilai ini lebih rendah dan lebih optimal dibandingkan Skenario 10 yang mendisipasikan rugi-rugi daya aktif sebesar 1,49 MW pada tingkat pembebanan yang sama.

Secara keseluruhan, analisis efisiensi daya ini membuktikan bahwa konfigurasi operasi yang optimal di wilayah distribusi ini bersifat dinamis. Penentuan skenario terbaik harus terus dievaluasi setiap tahunnya menyesuaikan dengan kemampuan masing-masing konfigurasi dalam mempertahankan profil tegangan di atas batas standar operasi minimum PLN.

4.5.3 Transisi Efisiensi dan Penentuan Skenario Operasi Paling Optimal

Hasil evaluasi profil tegangan dan rugi-rugi daya menunjukkan bahwa penentuan skenario operasi yang paling optimal pada sistem distribusi 20 kV ULP Muara Labuh dipengaruhi oleh keseimbangan antara kebutuhan beban sistem dan kapasitas pembangkit yang dioperasikan. Semakin sesuai kapasitas pembangkit dengan kebutuhan beban, semakin baik profil tegangan yang dihasilkan dan semakin kecil rugi-rugi daya pada sistem.

Secara umum, pengintegrasian PLTM WSE ke dalam sistem distribusi ULP Muara Labuh memberikan pengaruh positif terhadap perbaikan profil tegangan, khususnya pada penyulang dengan kondisi tegangan terendah seperti Penyulang Abai Sangir. Akan tetapi, pengoperasian PLTM WSE juga menyebabkan

bertambahnya wilayah suplai hingga mencakup daerah Kresik Tuo, sehingga total beban sistem meningkat dari 10,35 MW menjadi 20,29 MW pada kondisi *existing*. Apabila kapasitas pembangkit yang dioperasikan melebihi kebutuhan beban, akan terjadi aliran daya balik (*reverse power flow*) menuju GI Muara Labuh yang menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya. Oleh karena itu, dengan asumsi pertumbuhan beban sebesar 4,04% per tahun, diperlukan penyesuaian konfigurasi operasi pembangkit secara bertahap agar sistem tetap bekerja secara efisien.

Berdasarkan hasil simulasi, transisi skenario operasi yang optimal pada sistem distribusi 20 kV ULP Muara Labuh dapat dijelaskan berdasarkan perkembangan pertumbuhan beban tahunan. Pada kondisi *existing* hingga Tahun ke-3, kebutuhan beban sistem masih relatif rendah sehingga Skenario 2 menjadi konfigurasi operasi yang paling optimal. Pada skenario ini, sistem disuplai oleh GI Muara Labuh dan satu unit PLTM SKE. Konfigurasi tersebut mampu mempertahankan profil tegangan di atas batas minimum 18,00 kV sesuai standar PLN, sekaligus menghasilkan rugi-rugi daya aktif yang paling rendah, yaitu meningkat secara bertahap dari 0,59 MW pada kondisi *existing* menjadi 0,85 MW pada Tahun ke-3. Pada periode ini, pengoperasian PLTM WSE belum diperlukan karena kapasitas pembangkit yang lebih besar belum sebanding dengan kebutuhan beban sehingga berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya.

Memasuki Tahun ke-4, peningkatan beban menyebabkan Skenario 2 tidak lagi memenuhi batas minimum tegangan karena nilai tegangan terendah turun menjadi 17,95 kV. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit yang sebelumnya mencukupi mulai tidak mampu mempertahankan profil tegangan sesuai standar. Oleh karena itu, pengoperasian kapasitas *existing* PLTM WSE mulai diperlukan sehingga konfigurasi operasi berpindah ke Skenario 8, yaitu dua unit PLTM WSE dan satu unit PLTM SKE. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Skenario 8 mampu mempertahankan profil tegangan dalam batas yang diizinkan sekaligus menghasilkan rugi-rugi daya aktif terendah sebesar 1,11 MW. Namun, pada Tahun ke-5 pertumbuhan beban yang terus meningkat menyebabkan Skenario 8 kembali tidak memenuhi batas tegangan. Berdasarkan hasil simulasi, konfigurasi operasi yang memberikan kinerja paling baik pada kondisi tersebut adalah Skenario 4 dengan rugi-rugi daya aktif sebesar 1,22 MW.

Pada Tahun ke-6, peningkatan beban menyebabkan hampir seluruh konfigurasi operasi tidak lagi mampu mempertahankan profil tegangan sesuai standar, termasuk skenario yang masih layak pada tahun sebelumnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit *existing* telah mendekati batas kemampuannya dalam melayani pertumbuhan beban sistem. Pada tahap ini, penambahan satu unit generator baru berkapasitas 5 MW pada PLTM WSE menjadi alternatif yang paling efektif. Kondisi tersebut direpresentasikan oleh Skenario 12, yaitu seluruh unit generator PLTM WSE sebanyak tiga unit dan PLTM SKE sebanyak dua unit beroperasi secara bersamaan. Dengan total kapasitas pembangkit sebesar 22,5 MW, keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dan kebutuhan

beban menjadi lebih baik sehingga fenomena reverse power flow dapat diminimalkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Skenario 12 mampu mempertahankan tegangan minimum sebesar 18,02 kV sekaligus menghasilkan rugi-rugi daya aktif terendah sebesar 1,46 MW dibandingkan skenario lain yang masih memenuhi batas operasi.

Meskipun demikian, pada Tahun ke-7 seluruh skenario operasi tidak lagi mampu mempertahankan profil tegangan di atas batas minimum 18,00 kV. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan beban telah melampaui kemampuan sistem yang ada sehingga diperlukan pengembangan infrastruktur kelistrikan atau penambahan kapasitas pembangkit sebelum memasuki periode tersebut.

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa penambahan satu unit generator berkapasitas 5 MW pada PLTM WSE belum perlu dioperasikan pada tahun-tahun awal karena kapasitas pembangkit *existing* masih mampu memenuhi kebutuhan sistem. Pengoperasian generator tambahan menjadi optimal pada Tahun ke-6, ketika pertumbuhan beban telah mencapai tingkat yang memerlukan tambahan kapasitas pembangkit untuk mempertahankan profil tegangan dan meningkatkan efisiensi sistem. Setelah Tahun ke-6, diperlukan pengembangan sistem lebih lanjut agar keandalan dan kualitas penyaluran tenaga listrik tetap terjaga pada periode berikutnya.

