

MODUL 3 TUGAS BESAR

Kelompok B2

Anggota: Felix Eduardo Sihalo (13219015), Marvin Bryan Juanethan (13222035), Justin Aprio Chan (13222039), Nicholas Darren (13222044), Irfan Nurhakim Hilmi (13222048)

Asisten: Galih Siswandi (13221015) dan Serena Kristin Hasianna (13221008)

Tanggal Presentasi: 23/05/2025

EL3017-Praktikum Sistem Tenaga Elektrik

Laboratorium Dasar Teknik Elektro - Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB

Abstrak

Pada modul 3 Tugas Besar dari Praktikum Sistem Tenaga Elektrik ini, praktikan diminta untuk melakukan perancangan desain sebuah sistem tenaga listrik pada skala kota berdasarkan spesifikasi beban nyata yang telah diberikan, diantaranya terdiri dari beban rumah tangga, industri, prioritas, dan publik dan sosial. Simulasi dari perancangan ini dilakukan menggunakan SimPowerSystems™ dan Simulink® pada MATLAB. Praktikan pertama-tama melakukan analisis beban untuk setiap jenis beban berdasarkan jenis dan waktu operasi dalam sehari, kemudian merancang sistem suplai daya yang sesuai dan kuat menyuplai setiap kategori beban, yaitu dirancang dengan kapasitas pembangkit memiliki total kapasitas daya maksimum sekitar 40% diatas total seluruh aliran daya yang dibutuhkan oleh beban. Modul ini menekankan pentingnya perhitungan teknis yang meliputi kapasitas pembangkit, sistem transmisi, serta evaluasi kondisi operasi seperti saat beban berada pada kondisi puncak operasi. Selain itu, desain sistem tenaga listrik pada modul ini juga dilakukan pada beberapa kondisi nyata, seperti pada kasus darurat dengan hanya beban prioritas yang disuplai, kondisi symmetrical fault, serta kondisi pensuplaian daya dengan pembangkit yang berbeda, seperti PLTS dan genset. Modul ini dilakukan agar praktikan memahami tantangan nyata dalam perencanaan sistem tenaga listrik dan mampu mengintegrasikan aspek teknis serta operasional dalam satu rancangan sistem yang komprehensif.

Kata kunci: Simulink, Sistem Tenaga Listrik, Aliran Daya, Sistem Suplai Daya, Beban, Pembangkit Listrik

1. PENDAHULUAN

Pada tugas besar ini, dirancang sebuah sistem yang spesifikasi beban, jaringan transmisi, dan batasan-batasan lainnya telah diberikan. Simulasi perancangan ini dilakukan menggunakan Simulink di MATLAB.

Pertama-tama dibuat jadwal seluruh beban untuk rentang waktu tertentu, lalu didesain jadwal penggunaan pembangkit untuk tiap rentang waktu dan ditentukan juga kapasitas line dan trafo untuk sistem tenaga di kota A. Setelah itu, dibuat desain minimal penggunaan pembangkit untuk kasus darurat dimana hanya beban prioritas

yang disupply oleh pembangkit, lalu dilakukan desain line dan trafo bila 2 dari 3 line terputus, serta dibuat simulasi gangguan tiga fasa pada rangkaian. Lalu, dibuat desain kapasitas pembangkit dalam kondisi khusus untuk menyuplai seluruh beban yang ada di rangkaian. Kondisi pertama adalah Beban Rumah Tangga RT-1, RT-2, dan RT-3, beban Rumah Ibadah dan beban Penerangan Jalan Umum yang mampu disuplai secara mandiri oleh Pembangkit Tambahan dari Tenaga Surya (PLTS). Kondisi kedua adalah Beban Rumah Tangga RT-4, dan RT-5, beban Sekolah dan Universitas, seluruh beban Industri, pada kondisi darurat yang harus mampu disuplai oleh genset masing-masing. Kondisi terakhir adalah ketika kasus kondisi pertama dan kondisi kedua terjadi secara bersamaan.

Modul ini memiliki beberapa tujuan, yaitu:

- Mampu mendesain jadwal penggunaan pembangkit dan beban
- Mampu membuat sistem tenaga listrik yang spesifikasinya telah diberikan
- Mampu membuat analisa tentang gangguan hubung singkat
- Mampu membuat desain kapasitas pembangkit dalam kondisi-kondisi khusus

2. DASAR TEORI

2.1 ANALISIS ALIRAN DAYA

Analisis aliran daya menghitung tegangan, arus, daya aktif dan reaktif, serta faktor daya (pf) pada suatu sistem tenaga. Perancangan dan pengoperasian sistem tenaga membutuhkan perhitungan-perhitungan tersebut untuk menganalisis performansi sistem pada kondisi mantap dalam berbagai macam kondisi operasi.

Pada tugas besar ini, analisis aliran daya dilakukan menggunakan Simulink di MATLAB. Segala permasalahan dipecahkan dengan cara menemukan aliran daya pada setiap saluran dan

transformator di jaringan, serta besar tegangan dan sudut fasa pada setiap busbar di jaringan, setelah data konsumsi daya pada titik-titik beban dan produksi daya pada sisi generator diketahui.

Analisa aliran daya memudahkan untuk mengetahui performansi dari sebuah sistem tenaga yang memiliki kriteria tertentu seperti:

- Pembebanan komponen dan rangkaian
- Tegangan bus pada kondisi mantap
- Aliran daya reaktif
- Rugi-rugi sistem

2.2 GENERATOR, JARINGAN TRANSMISI DAN BEBAN

Generator adalah perangkat utama yang digunakan dalam sistem tenaga listrik. Generator ini mengubah mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator sinkron umumnya digunakan pada sistem tenaga karena mampu menghasilkan tegangan dengan frekuensi dan besaran yang stabil.

Generator memiliki 3 mode operasi yaitu:

- Voltage controller
- Reactive power controller
- Power Factor controller

Generator pada umumnya memiliki governor dan AVR. Governor adalah alat yang berfungsi untuk menjaga kecepatan rotasi dari generator. Contohnya ketika beban naik, maka kecepatan rotasi akan turun, sehingga governor membuka katup bahan bakar lebih lebar dan akan menyebabkan kecepatan rotasi akan konstan lagi. AVR (Automatic Voltage Regulator) adalah alat yang mengatur tegangan output generator dengan cara mengendalikan arus eksitasi motor.

Jaringan transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit menuju pusat beban dalam skala besar dan dengan jarak yang jauh. Jaringan ini beroperasi pada tegangan tinggi untuk mengurangi kerugian daya akibat arus. Jaringan transmisi ini berbeda dengan jaringan distribusi. Dimana jaringan transmisi biasanya menggunakan tegangan diatas 70kV sementara jaringan distribusi biasanya hanya menggunakan tegangan sampai 33kV.

Beban adalah komponen yang mengonsumsi energi listrik. Beban dapat bersifat resistif, induktif, atau kapasitif, tergantung pada karakteristiknya. Beban ini memiliki 2 tipe yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis adalah beban yang

tidak berubah terhadap waktu, contohnya seperti lampu dan TV. Beban dinamis adalah beban yang berubah terhadap waktu tergantung operasinya. Contohnya motor listrik (bergantung dari kebutuhan) dan AC (Bergantung dari suhu luar dan demand pengguna)

2.3 ANALISIS HUBUNG SINGKAT

Analisis hubung singkat digunakan untuk mengetahui besar arus yang mengalir melalui saluran-saluran sistem tenaga di interval waktu tertentu ketika sebuah gangguan hubung singkat terjadi. Besar arus yang mengalir melalui saluran-saluran pada sistem tenaga pada saat sebuah gangguan hubung singkat terjadi akan berubah terhadap waktu sampai dengan besar arus tersebut mencapai kondisi mantapnya. Pada interval waktu tersebutlah sistem proteksi harus dirancang untuk mendeteksi, memutus dan mengisolasi gangguan tersebut.

Ada beberapa gangguan yang dapat terjadi pada sistem, yang pertama adalah symmetrical fault dimana hubung singkat ini melibatkan 3 fasa secara sekaligus pada sistem, lalu ada unsymmetrical fault yang terjadi ketika 1 atau 2 fasanya memiliki gangguan. Ada 3 tipe dari unsymmetrical fault, yaitu:

- Phase to phase fault
- Single line to ground fault
- Double line to ground fault.

Symmetrical fault memiliki ciri bahwa arus gangguan ketiga fasanya sama. Hal ini menyebabkan arus yang sangat besar dan biasanya merusak komponen lain dalam sistem tenaga. Namun, symmetrical fault ini paling jarang terjadi. Unsymmetrical fault memiliki ciri ketika terjadi gangguan bahwa arus dan tegangannya tidak seimbang. Unsymmetrical fault ini lebih sering terjadi.

Untuk menghindari kerusakan pada peralatan dan sistem yang disebabkan oleh gangguan short circuit tersebut, dibuatlah sistem proteksi. Sistem proteksi ini meminimalisir dampak kerusakan yang disebabkan oleh gangguan dan mempermudah isolasi gangguan pada sistem tersebut. Sistem proteksi ini harus memiliki waktu respons yang cepat dan selalu berfungsi ketika dibutuhkan. Beberapa contoh komponen sistem proteksi yang paling sering digunakan adalah:

- Relay, alat ini mendeteksi adanya gangguan pada arus atau tegangan dan bila terjadi gangguan akan mengirim sinyal kepada circuit breaker

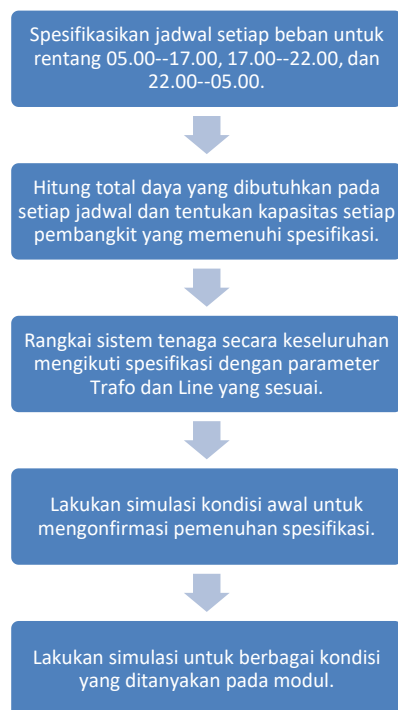
- Circuit breaker, alat ini memutus hubungan aliran listrik bila menerima sinyal dari relay
- Recloser, mampu memutus dan menyambung kembali aliran listrik secara otomatis
- Fuse, alat ini akan meleleh ketika adanya arus yang melebihi batasnya
- Load Break Switch, saklar ini memutus dan menghubungkan arus listrik khusus ketika kondisi berbeban
- Disconnecting switch, saklar ini mengisolasi sistem tenaga ketika kondisi tanpa beban.

3. PERANCANGAN SISTEM

Alat dan bahan yang digunakan di tugas besar ini adalah:

1. Laptop
2. Perangkat lunak MATLAB
3. Simulink

Berikut adalah tahapan dari perancangan sistem ini:



Gambar 3-1. Tahapan perancangan sistem tenaga kota A.

3.1 PENENTUAN JADWAL BEBAN

Sistem tenaga Kota A yang telah dirancang terdiri dari empat kawasan utama, yaitu kawasan rumah tangga, kawasan industri, kawasan prioritas, serta kawasan publik dan sosial. Kawasan industri dan prioritas ditetapkan menyala selama 24 jam.

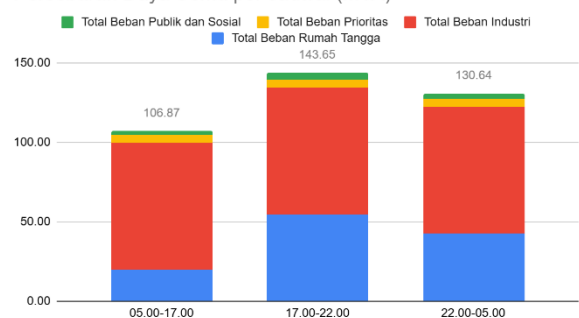
Sedangkan, kawasan rumah tangga serta publik dan sosial ditetapkan mengikuti jadwal di bawah.

Tabel 3-1. Jadwal penggunaan beban pada setiap kawasan.

Kawasan	Jenis Beban	Rentang Penggunaan		
		05.00-17.00	17.00-22.00	22.00-05.00
Rumah Tangga	Televisi		✓	
	Lampu		✓	✓
	Kulkas	✓	✓	✓
	AC			✓
	Dispenser	✓	✓	✓
	Pemanas Air			✓
	PC	✓	✓	
Industri / Komersial	Industri Kecil	✓	✓	✓
	Industri Sedang	✓	✓	✓
	Industri Besar	✓	✓	✓
	UKM	✓	✓	✓
	Restoran - Toko	✓	✓	✓
	Mall dan Hotel	✓	✓	✓
Prioritas	Rumah Sakit	✓	✓	✓
	Pusat Server Data	✓	✓	✓
	Kantor Lembaga Negara	✓	✓	✓
	Istana Negara	✓	✓	✓
	Pangkalan Militer	✓	✓	✓
Publik dan Sosial	Rumah Ibadah	✓	✓	✓
	Sekolah dan Universitas	✓	✓	
	Penerangan Jalan Umum		✓	✓

Berdasarkan penjadwalan di atas serta spesifikasi setiap beban yang diberikan, total daya yang diperlukan untuk kota ini dapat dilihat pada grafik di bawah.

Persebaran Daya Semu per Jadwal (MVA)



Gambar 3-2. Persebaran total daya semu yang diperlukan pada Kota A.

Grafik di atas menunjukkan bahwa kebutuhan daya mencapai maksimum pada waktu 17.00–

22.00WIB sebesar 143.65MVA. Sedangkan, kebutuhan minimumnya tercapai pada waktu 05.00 – 17.00WIB sebesar 106.87MVA.

3.2 PENENTUAN KAPASITAS PEMBANGKIT

Pada kota ini, terdapat empat pembangkit yang digunakan, yaitu PLTP, PLTU, PLTA, dan PLTB. Spesifikasi yang diberikan untuk setiap pembangkit ini adalah sebagai berikut.

- PLTP berperan sebagai generator *swing* yang digunakan sepanjang hari. Kapasitas maksimalnya adalah sebesar 80% kapasitas PLTU;
- PLTU berperan sebagai generator utama PV yang digunakan sepanjang hari. Kapasitas harus tetap dan ditentukan sendiri;
- PLTA berperan sebagai generator *swing* yang digunakan pada malam hari. Kapasitas maksimalnya adalah sebesar 30% kapasitas PLTU; serta
- PLTB berperan sebagai generator *backup* PV yang digunakan pada malam hari. Kapasitas maksimalnya adalah sebesar 10% kapasitas PLTB.

Selain dari spesifikasi di atas, keempat pembangkit ini harus dapat menyediakan daya yang tidak hanya cukup untuk memenuhi beban maksimum, tetapi juga ditambahkan rentang toleransi batas aman, yaitu sekitar +40%.

Berdasarkan persyaratan-persyaratan sebelumnya, berikut merupakan tabel kapasitas pembangkit yang telah ditentukan. Besar *power factor* (pf) yang digunakan untuk setiap pembangkit adalah 0.85, mengikuti referensi PLTU Cirebon Unit 2 [1].

Tabel 3-2. Kapasitas daya aktif maksimum pembangkit untuk setiap jadwal.

Jadwal	Kapasitas Maksimum Pembangkit (MW)			
	PLTP	PLTU	PLTA	PLTB
05.00-17.00	80.00	100.00	0.00	0.00
17.00-22.00	80.00	100.00	30.00	10.00
22.00-05.00	80.00	100.00	30.00	10.00

Tabel 3-3. Kapasitas daya semu maksimum pembangkit untuk setiap jadwal.

Jadwal	Kapasitas Maksimum Pembangkit (MVA)			
	PLTP	PLTU	PLTA	PLTB
05.00-17.00	94.12	117.65	0.00	0.00
17.00-22.00	94.12	117.65	35.29	11.76
22.00-05.00	94.12	117.65	35.29	11.76

Berdasarkan penentuan kapasitas ini, besar perbandingannya dengan total beban dapat dilihat pada kedua tabel di bawah.

Tabel 3-4. Perbandingan total daya aktif maksimum pembangkit dengan total beban untuk setiap jadwal.

Jadwal	Perbandingan Total Daya		
	Kapasitas Pembangkit (MW)	Total Beban (MW)	Perbedaan Maksimum (%)
05.00-17.00	180.00	97.19	46.01%
17.00-22.00	220.00	131.93	40.03%
22.00-05.00	220.00	119.67	45.60%

Tabel 3-5. Perbandingan total daya semu maksimum pembangkit dengan total beban untuk setiap jadwal.

Jadwal	Perbandingan Total Daya		
	Kapasitas Pembangkit (MVA)	Total Beban (MVA)	Perbedaan Maksimum (%)
05.00-17.00	211.76	106.87	49.54%
17.00-22.00	258.82	143.65	44.50%
22.00-05.00	258.82	130.64	49.53%

Seperti yang dapat dilihat pada kedua tabel perbandingan di atas, besar rentang maksimum sudah melebihi batas +40%.

3.3 DESAIN RANGKAIAN AWAL

Pada sistem tenaga ini, terdapat empat nilai tegangan yang digunakan pada jalur transmisi dan distribusi. Rincian dari setiap jalur ini adalah sebagai berikut.

- Jalur transmisi 150kV menghubungkan pembangkit dengan jaringan gardu;
- Jalur transmisi 70kV menghubungkan jaringan antara setiap gardu;
- Jalur distribusi 20kV mendistribusikan beban industri/komersial dan prioritas; serta
- Jalur distribusi 380V mendistribusikan beban rumah tangga dan publik sosial.

Berdasarkan besar tegangan tersebut, parameter resistansi dan induktansi dari setiap jalur yang digunakan dapat dilihat di bawah. Nilai-nilai parameter tersebut didapatkan dari katalog SUCACO Supreme Cable [2], [3].

Tabel 3-6. Data parameter setiap jalur transmisi.

Jalur	Besar Parameter			
	Tegangan	Panjang	Resistansi	Induktansi

	(Vline)	(km)	(ohm/km)	(mH/km)
Gardu 1-2, 1-4, 2-4	70kV	20	0.0601	0.6550
Gardu 1/2/4 - 3	70kV	5	0.0601	0.6550
Gardu 1 - PLTP	150kV	100	0.0601	0.6550
Gardu 2 - PLTU	150kV	100	0.0601	0.6550
Gardu 3 - PLTA	150kV	50	0.0601	0.6550
Gardu 4 - PLTB	150kV	20	0.0601	0.6550
Gardu 1 - Beban 1	20kV	3	0.2530	0.5530
Gardu 4 - Beban 4	20kV	3	0.2530	0.5530
Gardu 2 - Beban 2	20kV	0	0.2530	0.5530
Gardu 3 - Beban 3	20kV	0	0.2530	0.5530

Sedangkan, parameter trafo yang digunakan mengambil dari dokumen SPLN 61 dan SLPN 50 [4], [5]. Nilai-nilai parameter ini dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 3-7. Data Parameter Setiap Trafo

Trafo	Konfigurasi	Besar Parameter	
		S (MVA)	Z (pu)
20kV/70kV	Wye-Delta	30	0.125
70kV/150kV	Wye-Delta	100	0.125
150kV/70kV	Delta-Wye	100	0.125
70kV/20kV	Delta-Wye	30	0.125
20kV/380V	Delta-Wye	2.5	0.070

Berdasarkan semua desain parameter ini, hasil desain rangkaian awal untuk sistem tenaga kota A adalah sebagai berikut.



Gambar 3-3. Desain rangkaian awal sistem tenaga kota A.

4. HASIL DAN ANALISIS

4.1 SIMULASI KONDISI AWAL

Pengujian sistem tenaga ini diawali dengan simulasi kondisi awal untuk setiap jadwalnya. Berikut merupakan ketiga tabel pengukuran pada kondisi awal tanpa perubahan.

Tabel 8- Data pengukuran kondisi awal tanpa perubahan pada jadwal 05.00-17.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	14.6642	28.2493
	PLTU	1.0000	100.0000	12.9207
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	0.9170	4.2882	1.4126
	RT2	0.9170	6.7771	2.2282
	RT3	0.9170	2.5225	0.8324
	RT4	0.9170	1.2612	0.4120
	RT5	0.9170	1.2612	0.4120
Industri / Komersial	Industri Besar	0.9594	8.7438	2.8739
	Industri Kecil	0.9594	5.3457	2.8853
	Industri Sedang	0.9594	41.4180	20.0596
	Mall dan Hotel	0.9594	0.7731	0.4994
	Restoran dan Toko	0.9594	3.9117	2.4242
	UKM	0.9594	5.3843	2.6078
Prioritas	Istana Negara	0.9619	0.8326	0.4033
	Kantor Lembaga Negara	0.9619	0.8326	0.4033
	Pangkalan Militer	0.9619	1.8734	0.9074
	Pusat Server Data	0.9619	0.0208	0.0101
	Rumah Sakit	0.9619	0.8882	0.2590
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.9502	1.0130	0.6278
	Sekolah dan Universitas	0.9502	0.7674	0.4756

Tabel 4-1. Data pengukuran kondisi awal tanpa perubahan pada jadwal 17.00-22.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	21.0461	6.4404
	PLTU	1.0000	100.0000	-7.8852
	PLTA	1.0000	28.5748	14.6752
	PLTB	1.0000	10.0000	19.2099
Rumah Tangga	RT1	0.8704	16.6135	5.4621
	RT2	0.8704	13.3181	4.3788
	RT3	0.8704	4.9469	1.6212
	RT4	0.8704	2.4697	0.8106
	RT5	0.8704	2.2045	0.7273
Industri / Komersial	Industri Besar	0.9815	9.1523	3.0082
	Industri Kecil	0.9815	5.5954	3.0201
	Industri Sedang	0.9815	43.3528	20.9967
	Mall dan Hotel	0.9815	0.8093	0.5227

	Restoran dan Toko	0.9815	4.0944	2.5375
	UKM	0.9815	5.6359	2.7296
Prioritas	Istana Negara	0.9885	0.8794	0.4259
	Kantor Lembaga Negara	0.9885	0.8794	0.4259
	Pangkalan Militer	0.9885	1.9788	0.9584
	Pusat Server Data	0.9885	0.0220	0.0107
	Rumah Sakit	0.9885	0.9381	0.2736
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9772	1.6233	1.0061
	Rumah Ibadah	0.9772	1.0714	0.6640
	Sekolah dan Universitas	0.9772	0.8117	0.5030

Tabel 4-2. Data pengukuran kondisi awal tanpa perubahan pada jadwal 22.00-05.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	17.3787	6.0315
	PLTU	1.0000	100.0000	-8.6383
	PLTA	1.0000	22.9697	14.7884
	PLTB	1.0000	10.0000	16.3999
Rumah Tangga	RT1	0.8936	12.6256	4.1526
	RT2	0.8936	10.9486	3.6016
	RT3	0.8936	4.1926	1.3816
	RT4	0.8936	2.2840	0.7507
	RT5	0.8936	2.5315	0.8305
Industri / Komersial	Industri Besar	0.9823	9.1672	3.0131
	Industri Kecil	0.9823	5.6045	3.0250
	Industri Sedang	0.9823	43.4237	21.0311
	Mall dan Hotel	0.9823	0.8106	0.5236
	Restoran dan Toko	0.9823	4.1011	2.5416
	UKM	0.9823	5.6451	2.7341
Prioritas	Istana Negara	0.9894	0.8810	0.4267
	Kantor Lembaga Negara	0.9894	0.8810	0.4267
	Pangkalan Militer	0.9894	1.9822	0.9601
	Pusat Server Data	0.9894	0.0220	0.0107
	Rumah Sakit	0.9894	0.9397	0.2741
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9800	1.6328	1.0120
	Rumah Ibadah	0.9800	1.0777	0.6679
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Berdasarkan pengukuran kondisi awal ini, terdapat beberapa hal yang dapat diambil, yaitu

- Besar tegangan beban Rumah Tangga masih jauh dari spesifikasi, bahkan mencapai 0.8704pu (saat 17.00-22.00) dari minimum 0.96pu;

- Besar tegangan beban Industri saat pagi hari (05.00-17.00) masih di bawah batas minimum, yaitu 0.9594pu dari batas 0.98pu; serta
- Generator PLTP berkontribusi lebih sedikit daripada PLTA, walaupun memiliki kapasitas yang lebih besar (80% untuk PLTP, 30% untuk PLTA).

Selain dari ketiga permasalahan tersebut, besar pengukuran yang lain telah memenuhi spesifikasi. Untuk mengatasi kekurangan-kekurangan sebelumnya, berikut merupakan hal yang telah dilakukan.

- Penambahan jalur paralel pada 20kV beban Rumah Tangga serta pengubahan nilai tapping sebesar -5% pada trafo distribusi Rumah Tangga. Kedua hal ini diperlukan untuk meningkatkan tegangan secara signifikan;
- Pengubahan nilai *tapping* sebesar -2.5% pada trafo distribusi beban Industri untuk mengatasi *undervoltage*; serta
- Penambahan jalur paralel pada transmisi dari PLTP sehingga pembangkit tersebut dapat mengeluarkan daya yang lebih besar.

Dengan ketiga perubahan ini, hasil simulasi kondisi awalnya menjadi seperti di bawah.

Tabel 4-3. Data pengukuran kondisi awal setelah perubahan pada jadwal 05.00-17.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	22.9891	28.8914
	PLTU	1.0000	100.0000	4.2300
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	1.0000	5.1003	1.6801
	RT2	1.0000	8.0605	2.6501
	RT3	1.0000	3.0002	0.9901
	RT4	1.0000	1.5001	0.4900
	RT5	1.0000	1.5001	0.4900
Industri / Komersial	Industri Besar	0.9935	9.3760	3.0818
	Industri Kecil	0.9935	5.7322	3.0939
	Industri Sedang	0.9935	44.4128	21.5101
	Mall dan Hotel	0.9935	0.8290	0.5355
	Restoran dan Toko	0.9935	4.1945	2.5995
	UKM	0.9935	5.7737	2.7963
Prioritas	Istana Negara	0.9729	0.8518	0.4126

	Kantor Lembaga Negara	0.9729	0.8518	0.4126
	Pangkalan Militer	0.9729	1.9166	0.9283
	Pusat Server Data	0.9729	0.0213	0.0103
	Rumah Sakit	0.9729	0.9086	0.2650
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.9612	1.0366	0.6425
	Sekolah dan Universitas	0.9612	0.7853	0.4867

Tabel 4-4. -Data pengukuran kondisi awal setelah perubahan pada jadwal 17.00-22.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	34.8919	4.8241
	PLTU	1.0000	100.0000	-8.6084
	PLTA	1.0000	26.9540	12.9924
	PLTB	1.0000	10.0000	15.7175
Rumah Tangga	RT1	0.9689	20.5876	6.7686
	RT2	0.9689	16.5039	5.4262
	RT3	0.9689	6.1303	2.0090
	RT4	0.9689	3.0604	1.0045
	RT5	0.9689	2.7319	0.9012
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0075	9.6426	3.1694
	Industri Kecil	1.0075	5.8952	3.1819
	Industri Sedang	1.0075	45.6754	22.1216
	Mall dan Hotel	1.0075	0.8526	0.5507
	Restoran dan Toko	1.0075	4.3138	2.6734
	UKM	1.0075	5.9378	2.8758
Prioritas	Istana Negara	0.9897	0.8815	0.4269
	Kantor Lembaga Negara	0.9897	0.8815	0.4269
	Pangkalan Militer	0.9897	1.9833	0.9606
	Pusat Server Data	0.9897	0.0220	0.0107
	Rumah Sakit	0.9897	0.9402	0.2742
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9779	1.6257	1.0076
	Rumah Ibadah	0.9779	1.0730	0.6650
	Sekolah dan Universitas	0.9779	0.8129	0.5038

Tabel 4-5. Data pengukuran kondisi awal setelah perubahan pada jadwal 22.00-05.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	28.4796	4.0570
	PLTU	1.0000	100.0000	-9.3326
	PLTA	1.0000	22.0102	12.9651

	PLTB	1.0000	10.0000	13.0042
Rumah Tangga	RT1	0.9845	15.3223	5.0396
	RT2	0.9845	13.2871	4.3709
	RT3	0.9845	5.0880	1.6766
	RT4	0.9845	2.7718	0.9110
	RT5	0.9845	3.0722	1.0079
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0083	9.6577	3.1743
	Industri Kecil	1.0083	5.9044	3.1869
	Industri Sedang	1.0083	45.7472	22.1564
	Mall dan Hotel	1.0083	0.8539	0.5516
	Restoran dan Toko	1.0083	4.3206	2.6776
	UKM	1.0083	5.9471	2.8803
Prioritas	Istana Negara	0.9905	0.8829	0.4276
	Kantor Lembaga Negara	0.9905	0.8829	0.4276
	Pangkalan Militer	0.9905	1.9866	0.9622
	Pusat Server Data	0.9905	0.0221	0.0107
	Rumah Sakit	0.9905	0.9418	0.2747
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9807	1.6352	1.0134
	Rumah Ibadah	0.9807	1.0792	0.6689
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Hasil simulasi di atas menunjukkan ketiga perubahan sebelumnya telah berhasil membuat seluruh sistem memenuhi spesifikasi pada setiap jadwal.

Terlihat bahwa beban Rumah Tangga sudah naik secara signifikan hingga mencapai 0.9689pu pada kondisi beban maksimumnya. Tegangan pada beban Industri pun sudah tidak lagi di bawah 0.98pu dengan paling kecil sebesar 0.9935pu.

Selain itu, terlihat juga bahwa penggunaan daya dari PLTP sudah lumayan meningkat sehingga PLTA tidak perlu bekerja terlalu banyak dan masih di bawah batas kapasitas 30MW, yaitu paling maksimum sebesar 26.9540MW.

Alhasil, pengujian kondisi awal ini menunjukkan desain sistem tenaga ini telah berhasil memenuhi semua spesifikasi, meskipun memerlukan beberapa jalur transmisi dan distribusi tambahan serta perubahan *tapping* trafo.

4.2 SIMULASI KONDISI DARURAT

Pengujian sistem tenaga ini dilakukan pada saat kondisi ketika beban prioritas saja yang terhubung.

Pada pengujian ini, beban prioritas yang akan disuplai adalah untuk beban seperti rumah sakit, kantor lembaga negara, istana negara, pangkalan militer, dan pusat server data. Desain minimal penggunaan pembangkit perlu

Pada rangkaian keseluruhan, didapatkan akan terdapat 4 pembangkit, yaitu PLTP, PLTU, PLTA, dan PLTB. Pembangkit utama yang digunakan adalah PLTA, dikarenakan memiliki kapasitas suplai yang cukup, dengan tegangan yang stabil dan respons yang cepat, fleksibel, dan efisien yang merupakan syarat penting dalam mensuplai beban prioritas dinamis seperti rumah sakit dan pusat data. Selain PLTA, PLTP dapat disiapkan sebagai *colde reserve* apabila PLTA gagal, ataupun sebagai *spinning reserve* jika terjadi lonjakan beban prioritas. Hal ini dikarenakan PLTP bersifat *base load* dan stabil, tapi tidak fleksibel dalam *start-up* atau perubahan daya mendadak. PLTU dan PLTB tidak digunakan dalam kondisi ini karena karakteristiknya yang kurang fleksibel dan tidak dapat diandalkan untuk menyuplai beban prioritas yang membutuhkan kontinuitas tinggi.

[illegible]

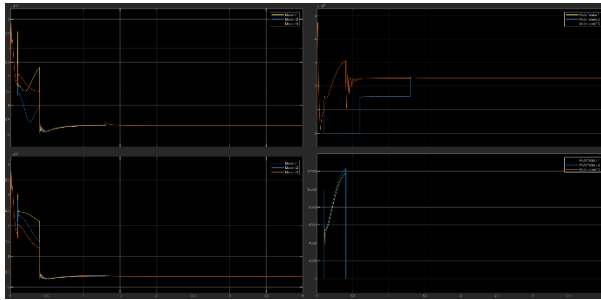
Hasil simulasi beban priortas menggunakan supply PLTA dapat dilihat sebagai berikut.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	12.7859	1.3211
Prioritas	Istana Negara	0.9981	0.8965	0.4342
	Kantor Lembaga Negara	0.9981	0.8965	0.4342
	Pangkalan Militer	0.9981	2.0172	0.9770
	Pusat Server Data	0.9981	0.0224	0.0109
	Rumah Sakit	0.9981	0.9563	0.2789

menghasilkan daya aktif sebesar 12.7859 MW dan daya reaktif sebesar 1.3211 MVAR, yang kemudian disuplai ke lima beban prioritas: istana negara, kantor lembaga negara, pangkalan militer, pusat server data, dan rumah sakit. Tegangan pada semua titik beban tercatat sangat stabil pada angka 0.9981 pu, menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi normal (Tidak undervoltage <0.95 dan overvoltage >1.05) dan tidak mengalami deviasi tegangan yang signifikan, selain itu tegangan juga sudah sesuai dengan spesifikasi yaitu berada diatas tegangan minimum 0.96 pu. Beban tertinggi tercatat pada Pangkalan Militer sebesar 2.0172 MW dan beban terendah pada Pusat Server Data sebesar 0.0224 MW.

Pengujian sistem tenaga ini dilakukan pada saat kondisi fault 2 fasa. Pada simulasi ini, fault 2 fasa ditaruh pada line gardu 2-3. Fasa yang mengalami fault adalah fasa A dan B. Fault terjadi pada waktu $t = 0.1 \text{ s} - 0.6 \text{ s}$, dan circuit breaker switching pada waktu $t = 0.4 \text{ s} - 1.3 \text{ s}$.

Laporan Praktikum - Laboratorium Dasar Teknik Elektro - STEI ITB 8



Gambar 4-3. Simulasi Fault 2 Fasa (2)

Keterangan:

Kiri atas: Arus PLTP

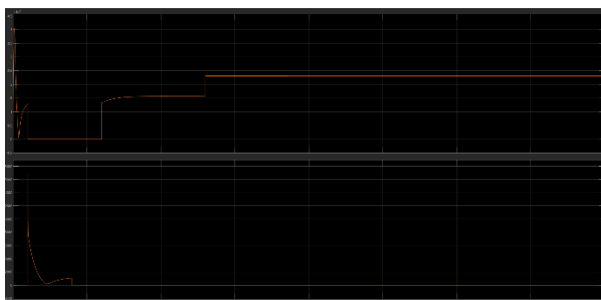
Kiri bawah: Arus PLTU

Kanan atas: Tegangan fault

Kanan bawah: Arus fault

Dari hasil simulasi diatas dapat diamati bahwa ada lonjakan arus fault fasa A dan fasa B yang menandakan adanya kondisi short circuit fault. Ketika $t = 0.1 \text{ s} - 0.4 \text{ s}$, fault aktif dan circuit breaker masih tertutup. Kondisi ini menyebabkan arus beban fasa A dan fasa B menjadi kecil, sementara fasa C yang tidak terpengaruh oleh short circuit fault tetap berjalan. Ketika $t = 0.4 \text{ s} - 0.6 \text{ s}$, fault masih aktif namun circuit breaker disekitar fault tersebut membuka. Hal tersebut menyebabkan pemutusan pada line generator ke beban yang menggunakan generator tersebut. Namun, pada kasus ini karena bebannya dibackup oleh generator yang lain, arusnya kembali ke normal. Pada $t = 1.3 \text{ s}$, circuit breaker kembali menutup dan kondisi circuitnya telah normal. Pada percobaan ini dapat diamati bahwa fasanya tidak simetris. Untuk percobaan dengan penempatan fault yang berbeda, hasilnya sama dengan simulasi diatas.

Pengujian sistem tenaga dibawah ini dilakukan pada saat kondisi fault 3 fasa. Pada simulasi ini, fault 3 fasa ditaruh pada gardu 1-2. Fault terjadi pada waktu $t = 0.1 \text{ s} - 0.6 \text{ s}$, dan circuit breaker switching pada waktu $t = 0.4 \text{ s} - 1.3 \text{ s}$. Kondisi dari pengujian ini adalah siang hari sehingga hanya PLTP dan PLTU yang aktif. Berikut ini adalah hasilnya:

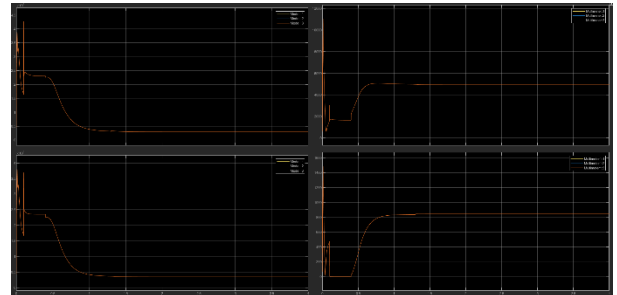


Gambar 4-4. Simulasi Fault 3 Fasa

Keterangan:

Atas: Tegangan fault

Bawah: Arus fault



Gambar 4-5. Simulasi Fault 3 Fasa (2)

Keterangan:

Kiri atas: Arus PLTP

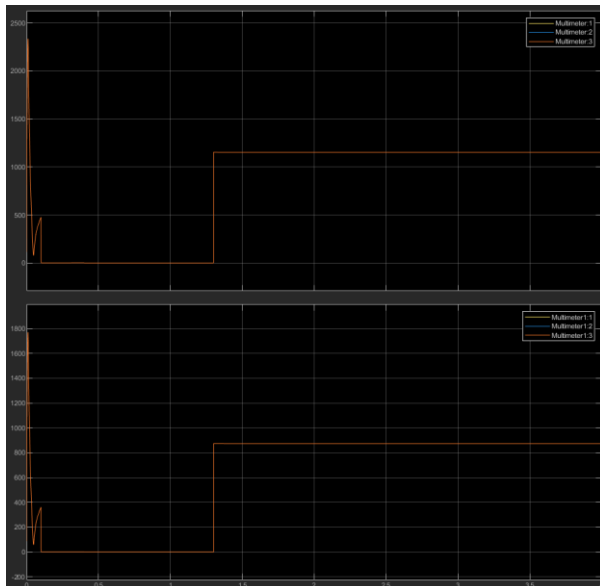
Kiri bawah: Arus PLTU

Kanan atas: Arus Beban A RT 1

Kanan bawah: Arus Industri sedang

Dapat diamati bahwa arus faultnya melonjak ke 17kA ketika $t = 0.1 \text{ s}$. Kondisi tersebut menandakan kondisi fault sudah benar. Ketika $t = 0.1 \text{ s} - 0.4 \text{ s}$, fault aktif namun circuit breaker masih tertutup dan akan menyebabkan arus beban menjadi kecil. Ketika $t = 0.4 \text{ s} - 0.6 \text{ s}$, fault masih aktif namun circuit breaker sudah terbuka. Hal ini menyebabkan beban yang tidak terkena pemutusan bisa menerima tegangan normal lagi sementara beban yang mengalami pemutusan dari circuit breaker arusnya tetap kecil. Namun pada kondisi ini dimana satu generator dibantu oleh generator lainnya, ketika salah satu gardu mengalami fault generator lainnya akan menyuplai daya kepada beban tersebut sehingga arus dari beban yang terkena pemutusan akan kembali ke normal saat circuit breaker aktif dan mengisolasi fault.

Untuk memperjelas analisis tersebut, dilakukan kondisi dimana terjadi symmetrical fault pada line beban Publikasi dan Sosial. Berikut adalah hasil simulasinya:



Gambar 4-6. Simulasi Asymetrical Fault Rumah Ibadah dan Sekolah dan Universitas

Keterangan:

Atas: Beban A Rumah Ibadah

Bawah: Beban A Sekolah dan Universitas

Dari simulasi diatas dapat diamati bahwa ketika terjadi fault dan circuit breaker belum membuka pada waktu $t = 0.1 \text{ s} - 0.4 \text{ s}$, arus pada beban akan menjadi rendah karena arus pada fault sangat tinggi. Pada waktu $t = 0.4 \text{ s} - 0.6 \text{ s}$ dimana fault masih aktif namun circuit breaker sudah terbuka, beban di sisi circuit breaker akan padam. Pemadaman ini akan terus berlangsung hingga circuit breaker ditutup kembali yaitu pada saat $t = 1.3 \text{ s}$. Setelah circuit breaker ditutup, arus dan tegangan pada beban akan kembali normal.

Pada kondisi symmetrical fault ini, arus fault akan melonjak sangat tinggi. Oleh karena itu, symmetrical fault adalah gangguan yang paling berbahaya untuk sistem tenaga. Namun symmetrical fault ini paling jarang terjadi dibandingkan jenis-jenis unsymmetrical fault.

4.4 SIMULASI KONDISI PENAMBAHAN PLTS

Pengujian sistem tenaga listrik yang dilakukan ketika PLTS digunakan untuk menyuplai daya kepada RT-1, RT-2, RT-3, Rumah Ibadah, dan Penerangan Jalan Umum menyebabkan adanya penurunan daya yang perlu diberikan oleh keempat generator sebagai pembangkit listrik lainnya.

Penggunaan PLTS ini dimodelkan dengan "Comment Out" atau dilakukan penghapusan sementara pada bagian-bagian yang dayanya sudah disuplai secara otomatis dari PLTS.

Hasil yang didapat terbagi menjadi 3, sesuai dengan pembagian waktu untuk masing-masing beban, dengan hasil sebagai berikut

Tabel 4-8. Data pengukuran kondisi penggunaan PLTS pada pukul 05.00-17.00.

HASIL JADWAL 05.00-17.00				
Kawasan	Generator/Beban	Nilai Parameter		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	6.0683	26.5512
	PLTU	1.0000	100	1.2216
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0258	1.5784	0.5156
	RT5	1.0258	1.5784	0.5156
Industri	Industri Besar	0.9967	9.4381	3.1022
	Industri Kecil	0.9967	5.7702	3.1144
	Industri Sedang	0.9967	44.707	21.6526
	Mall dan Hotel	0.9967	0.8345	0.5391
	Restoran dan Toko	0.9967	4.2223	2.6168
	UKM	0.9967	5.8119	2.8149
Prioritas	Istana Negara	0.9766	0.8583	0.4157
	Kantor Lembaga Negara	0.9766	0.8583	0.4157
	Pangkalan Militer	0.9766	1.9312	0.9354
	Pusat Server Data	0.9766	0.0215	0.0104
	Rumah Sakit	0.9766	0.9155	0.267
	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
Publik dan Sosial	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.968	0.7964	0.4936

Tabel 4-9. Data pengukuran kondisi penggunaan PLTS pada pukul 17.00-22.00.

HASIL JADWAL 17.00-22.00				
Kawasan	Generator/Beban	Nilai Parameter		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	7.8380	2.1070
	PLTU	1.0000	100.0000	-11.5408
	PLTA	1.0000	6.2496	13.1891
	PLTB	1.0000	10.0000	4.9262
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0000	3.2600	1.0700
	RT5	1.0000	2.9100	0.9600
Industri	Industri Besar	1.0107	9.704	3.1896
	Industri Kecil	1.0107	5.9327	3.2021
	Industri Sedang	1.0107	45.9664	22.2625
	Mall dan Hotel	1.0107	0.858	0.5543
	Restoran dan Toko	1.0107	4.3413	2.6905
	UKM	1.0107	5.9756	2.8941
Prioritas	Istana Negara	0.993	0.8874	0.4298
	Kantor Lembaga Negara	0.993	0.8874	0.4298
	Pangkalan Militer	0.993	1.9966	0.9671
	Pusat Server Data	0.993	0.0222	0.0107
	Rumah Sakit	0.993	0.9466	0.2761
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.9877	0.8293	0.514

Tabel 4-10. Data pengukuran kondisi penggunaan PLTS pada pukul 22.00-05.00.

HASIL JADWAL 22.00-05.00				
Kawasan	Generator/Beban	Nilai Parameter		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	7.3770	2.1233
	PLTU	1.0000	100.0000	-11.5982
	PLTA	1.0000	5.7426	13.2232
	PLTB	1.0000	10.0000	4.4570
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0347	3.0618	1.0063
	RT5	1.0347	3.3936	1.1134
Industri	Industri Besar	1.0107	9.7052	3.19
	Industri Kecil	1.0107	5.9335	3.2025
	Industri Sedang	1.0107	45.9721	22.2653
	Mall dan Hotel	1.0107	0.8581	0.5543
	Restoran dan Toko	1.0107	4.3418	2.6908
	UKM	1.0107	5.9764	2.8945
Prioritas	Istana Negara	0.993	0.8875	0.4299
	Kantor Lembaga Negara	0.993	0.8875	0.4299
	Pangkalan Militer	0.993	1.9969	0.9672
	Pusat Server Data	0.993	0.0222	0.0107
	Rumah Sakit	0.993	0.9467	0.2761
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Dari ketiga hasil yang didapatkan pada penggunaan PLTS sebagai sumber daya tambahan, terjadi peningkatan tegangan rata-rata yang tidak terlalu signifikan (ada sedikit overvoltage pada sistem tenaga listrik). Nilai Daya Reaktif juga semakin mendekati 0 bahkan negatif, hal ini perlu untuk diperhatikan karena memiliki peluang untuk menyebabkan aliran reaktif balik, seperti pada PLTU di kondisi malam hari, dimana beban dari penerangan jalan dan rumah ibadah turun sehingga menyebabkan penurunan beban total yang cukup signifikan.

Pengurangan beban ini juga menyebabkan daya yang disuplai berlebih sebesar 5-8MW, terjadi kondisi “underloaded” yang berdampak positif berupa penurunan beban pada PLTP, PLTA, dan PLTB sehingga emisi di unit mesin dapat dikurangi, namun terjadi dampak negatif yaitu daya reaktif yang tinggi menyebabkan tegangan beberapa saluran naik mendekati batas 1.05 pu. Pembangkit yang digunakan juga menjadi kurang efisien karena memiliki beban yang sedikit.

Modifikasi dapat dilakukan dengan melakukan kontrol tegangan pada PLTS, supaya daya yang diberikan tidak berlebih. Dapat juga ditambahkan Tap Trafo untuk menurunkan tegangan dari sumber ketika beberapa beban telah menggunakan PLTS sebagai penyuplai daya.

4.5 SIMULASI KONDISI PENGGUNAAN GENSET

Pengujian sistem tenaga ini dilakukan pada saat kondisi ketika Genset digunakan untuk menyalakan seluruh beban Industri, beban Sekolah dan Universitas, beban RT4, dan beban RT5.

Penambahan Genset ini dimodelkan menggunakan mesin sinkron dengan nilai PQ yang sama dengan beban yang ditunjangnya. Di

bawah ini merupakan ketiga tabel pengukuran pada kondisi tersebut.

Tabel 4-11. Data pengukuran kondisi penggunaan Genset pada jadwal 05.00-17.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-46.1211	20.3286
	PLTU	1.0000	100.0000	-18.5033
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	1.0208	5.3143	1.7506
	RT2	1.0208	8.3987	2.7614
	RT3	1.0208	3.1261	1.0316
	RT4	1.0208	1.5630	0.5106
	RT5	1.0208	1.5630	0.5106
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0191	8.7438	2.8739
	Industri Kecil	1.0191	5.3457	2.8853
	Industri Sedang	1.0191	41.4180	20.0596
	Mall dan Hotel	1.0191	0.7731	0.4994
	Restoran dan Toko	1.0191	3.9117	2.4242
	UKM	1.0191	5.3843	2.6078
Prioritas	Istana Negara	0.9931	0.8876	0.4299
	Kantor Lembaga Negara	0.9931	0.8876	0.4299
	Pangkalan Militer	0.9931	1.9970	0.9672
	Pusat Server Data	0.9931	0.0222	0.0107
	Rumah Sakit	0.9931	0.9467	0.2761
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.9836	1.0854	0.6727
	Sekolah dan Universitas	0.9836	0.8223	0.5096

Tabel 4-12. Data pengukuran kondisi penggunaan Genset pada jadwal 17.00-22.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-0.0576	3.2359
	PLTU	1.0000	100.0000	-21.1621
	PLTA	1.0000	-12.9475	12.2030
	PLTB	1.0000	10.0000	-4.7761
Rumah Tangga	RT1	0.9835	21.2127	6.9742
	RT2	0.9835	17.0050	5.5909
	RT3	0.9835	6.3164	2.0700
	RT4	0.9835	3.1534	1.0350
	RT5	0.9835	2.8148	0.9286
Industri /	Industri Besar	1.0221	9.9236	3.2617

Komersial	Industri Kecil	1.0221	6.0670	3.2746
	Industri Sedang	1.0221	47.0066	22.7664
	Mall dan Hotel	1.0221	0.8775	0.5668
	Restoran dan Toko	1.0221	4.4395	2.7514
	UKM	1.0221	6.1109	2.9596
Prioritas	Istana Negara	0.9968	0.8942	0.4331
	Kantor Lembaga Negara	0.9968	0.8942	0.4331
	Pangkalan Militer	0.9968	2.0119	0.9744
	Pusat Server Data	0.9968	0.0224	0.0108
	Rumah Sakit	0.9968	0.9538	0.2782
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9846	1.6481	1.0214
	Rumah Ibadah	0.9846	1.0877	0.6742
	Sekolah dan Universitas	0.9846	0.8241	0.5107

Tabel 4-13. Data pengukuran kondisi penggunaan Genset pada jadwal 22.00-05.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-6.0498	2.6577
	PLTU	1.0000	100.0000	-21.7927
	PLTA	1.0000	-17.3886	12.3155
	PLTB	1.0000	10.0000	-6.8690
Rumah Tangga	RT1	0.9988	15.7729	5.1878
	RT2	0.9988	13.6778	4.4994
	RT3	0.9988	5.2377	1.7259
	RT4	0.9988	2.8533	0.9378
	RT5	0.9988	3.1626	1.0376
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0227	9.9370	3.2661
	Industri Kecil	1.0227	6.0752	3.2790
	Industri Sedang	1.0227	47.0700	22.7971
	Mall dan Hotel	1.0227	0.8786	0.5676
	Restoran dan Toko	1.0227	4.4455	2.7551
	UKM	1.0227	6.1191	2.9636
Prioritas	Istana Negara	0.9975	0.8954	0.4337
	Kantor Lembaga Negara	0.9975	0.8954	0.4337
	Pangkalan Militer	0.9975	2.0147	0.9758
	Pusat Server Data	0.9975	0.0224	0.0108
	Rumah Sakit	0.9975	0.9551	0.2786
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9848	1.6488	1.0219
	Rumah Ibadah	0.9848	1.0882	0.6745
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Berdasarkan hasil simulasi di atas, terlihat dengan jelas bahwa penggunaan Genset pada berbagai beban tertentu mengakibatkan dua hal utama.

Pertama, terjadi peningkatan tegangan pu pada semua beban. Pengukuran maksimum tercapai di beban Industri, yaitu 1.0221pu pada jam 17.00-22.00WIB. Hal ini terjadi dikarenakan daya dari pembangkit sudah berlebih dan harus diserap oleh beban lainnya.

Kedua, terjadi penyerapan daya oleh generator *swing* yang ditunjukkan dengan angka minus. Penyerapan maksimum tercapai oleh PLTP, yaitu -46.1211MW pada jam 05.00-17.00WIB. Hal ini dikarenakan total daya yang disediakan sudah jauh melebihi beban sehingga generator *swing* perlu menyerap kelebihan daya tersebut.

Selain itu, karena peningkatan tegangan maksimum hanya mencapai 1.0221pu, seluruh beban masih berada dalam rentang tegangan yang aman dan tidak mencapai *overvoltage*. Hal ini menunjukkan penyerapan daya oleh generator *swing* berhasil membuat seluruh sistem stabil dan dapat beroperasi dengan nilai tegangan yang normal.

Kemudian, pengujian juga dilakukan jika beban yang memiliki Genset diisolasi dari rangkaian sehingga dapat berjalan dengan sendiri. Genset yang digunakan pun menggunakan mode *swing* dengan kapasitas MVA yang telah disesuaikan dengan beban terkait.

Di bawah ini merupakan ketiga tabel hasil pengukuran tersebut.

Tabel 4-14. Data pengukuran kondisi penggunaan Genset terisolasi pada jadwal 05.00-17.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-48.9744	23.7580
	PLTU	1.0000	100.0000	-16.7508
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	1.0195	5.3013	1.7463
	RT2	1.0195	8.3782	2.7546
	RT3	1.0195	3.1184	1.0291
	RT4	1.0000	1.5000	0.4900
	RT5	1.0000	1.5000	0.4900
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0000	9.5000	3.1225
	Industri Kecil	1.0000	5.8080	3.1348
	Industri Sedang	1.0000	45.0000	21.7945
	Mall dan Hotel	1.0000	0.8400	0.5426
	Restoran dan Toko	1.0000	4.2500	2.6339
	UKM	1.0000	5.8500	2.8333
Prioritas	Istana Negara	0.9915	0.8848	0.4285

	Kantor Lembaga Negara	0.9915	0.8848	0.4285
	Pangkalan Militer	0.9915	1.9907	0.9642
	Pusat Server Data	0.9915	0.0221	0.0107
	Rumah Sakit	0.9915	0.9438	0.2753
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.9836	1.0854	0.6727
	Sekolah dan Universitas	1.0000	0.8500	0.5268

Tabel 4-15. Data pengukuran kondisi penggunaan Genset terisolasi pada jadwal 17.00-22.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-1.4138	4.5557
	PLTU	1.0000	100.0000	-20.2782
	PLTA	1.0000	-14.5796	13.6906
	PLTB	1.0000	10.0000	-3.3664
Rumah Tangga	RT1	0.9825	21.1703	6.9602
	RT2	0.9825	16.9710	5.5798
	RT3	0.9825	6.3038	2.0659
	RT4	1.0000	3.2600	1.0700
	RT5	1.0000	2.9100	0.9600
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0000	9.5000	3.1225
	Industri Kecil	1.0000	5.8080	3.1348
	Industri Sedang	1.0000	45.0000	21.7945
	Mall dan Hotel	1.0000	0.8400	0.5426
	Restoran dan Toko	1.0000	4.2500	2.6339
	UKM	1.0000	5.8500	2.8333
Prioritas	Istana Negara	0.9968	0.8942	0.4331
	Kantor Lembaga Negara	0.9968	0.8942	0.4331
	Pangkalan Militer	0.9968	2.0119	0.9744
	Pusat Server Data	0.9968	0.0224	0.0108
	Rumah Sakit	0.9968	0.9538	0.2782
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9841	1.6464	1.0204
	Rumah Ibadah	0.9841	1.0866	0.6735
	Sekolah dan Universitas	1.0000	0.8500	0.5268

Tabel 4-16. Data pengukuran kondisi penggunaan Genset terisolasi pada jadwal 22.00-05.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-7.5570	3.9609
	PLTU	1.0000	100.0000	-20.9426
	PLTA	1.0000	-19.1555	13.7976

	PLTB	1.0000	10.0000	-5.5903
Rumah Tangga	RT1	0.9981	15.7506	5.1805
	RT2	0.9981	13.6585	4.4931
	RT3	0.9981	5.2303	1.7235
	RT4	1.0000	2.8600	0.9400
	RT5	1.0000	3.1700	1.0400
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0000	9.5000	3.1225
	Industri Kecil	1.0000	5.8080	3.1348
	Industri Sedang	1.0000	45.0000	21.7945
	Mall dan Hotel	1.0000	0.8400	0.5426
	Restoran dan Toko	1.0000	4.2500	2.6339
	UKM	1.0000	5.8500	2.8333
Prioritas	Istana Negara	0.9970	0.8946	0.4333
	Kantor Lembaga Negara	0.9970	0.8946	0.4333
	Pangkalan Militer	0.9970	2.0129	0.9749
	Pusat Server Data	0.9970	0.0224	0.0108
	Rumah Sakit	0.9970	0.9543	0.2783
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.9846	1.6480	1.0213
	Rumah Ibadah	0.9846	1.0877	0.6741
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Pengujian untuk kondisi ini memberikan efek yang hampir sama seperti sebelumnya, yaitu peningkatan tegangan beban dan penyerapan daya oleh generator *swing*.

Hanya saja, besar peningkatan dan penyerapan untuk kondisi ini lebih sedikit karena efek daya tambahan dari setiap Genset telah diisolasi. Pada kondisi ini, besar tegangan maksimum yang didapatkan adalah 1.0195pu untuk beban Rumah Tangga pada jam 05.00-17.00WIB. Sedangkan, penyerapan daya maksimum juga terjadi pada jam tersebut sebesar -48.9744MW oleh PLTP.

Selain itu, setiap beban yang terisolasi juga memiliki besar tegangan tepat 1.0000pu karena terhubung langsung dengan Genset tanpa gangguan.

4.6 SIMULASI KONDISI GABUNGAN

Pengujian sistem tenaga ini dilakukan pada saat kondisi ketika PLTS digunakan untuk menyuplai daya pada beban RT1, RT2, RT3, Rumah Ibadah, dan Penerangan Jalan Umum, serta genset digunakan untuk menyuplai daya pada beban RT4, RT5, Sekolah dan Universitas, dan Industri.

Pada simulasi ini, PLTS tidak dimodelkan dan dilakukan dengan memberikan "comment" pada RT1, RT2, RT3, Rumah Ibadah, dan Penerangan Jalan Umum, sehingga beban-beban tersebut tidak ikut disuplai dari pembangkit. Selain itu, genset

dimodelkan dengan mesin sinkron mode PQ yang daya keluarannya disesuaikan dengan masing-masing beban.

Dikarenakan tidak terdapatnya ketentuan pasti untuk penggunaan genset, maka akan dilakukan 2 jenis percobaan, yaitu saat genset dan beban masih terhubung dengan pembangkit dan saat genset dan beban tidak terhubung dengan pembangkit. Pada tabel, gabungan 1 adalah saat genset dan beban masih terhubung dengan pembangkit dan gabungan 2 adalah saat genset dan beban tidak terhubung dengan pembangkit.

Berikut adalah tabel analisis load flow untuk tiga kondisi waktu.

Tabel 4-17. Data pengukuran kondisi gabungan 1 pada jadwal 05.00-17.00.

<i>Kawasan</i>	<i>Generator/ Beban</i>	<i>Besar Pengukuran</i>		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-63.2447	19.0465
	PLTU	1.0000	100	-21.321
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0467	1.6433	0.5368
	RT5	1.0467	1.6433	0.5368
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0222	9.927	3.2628
	Industri Kecil	1.0222	6.0691	3.2757
	Industri Sedang	1.0222	47.0226	22.7741
	Mall dan Hotel	1.0222	0.8778	0.567
	Restoran dan Toko	1.0222	4.441	2.7523
	UKM	1.0222	6.1129	2.9606
Prioritas	Istana Negara	0.9966	0.8938	0.4329
	Kantor Lembaga Negara	0.9966	0.8938	0.4329
	Pangkalan Militer	0.9966	2.0111	0.974
	Pusat Server Data	0.9966	0.0223	0.0108
	Rumah Sakit	0.9966	0.9534	0.2781
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.9902	0.8334	0.5165

Tabel 4-18 Data pengukuran kondisi gabungan 1 pada jadwal 17.00-22.00.

<i>Kawasan</i>	<i>Generator/ Beban</i>	<i>Besar Pengukuran</i>		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-27.2398	1.3495
	PLTU	1.0000	100	-23.9624
	PLTA	1.0000	-33.6446	13.1011
	PLTB	1.0000	10	-15.1836
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0491	3.5881	1.1777
	RT5	1.0491	3.2029	1.0566
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0251	9.9831	3.2813
	Industri Kecil	1.0251	6.1034	3.2942
	Industri Sedang	1.0251	47.2884	22.9028
	Mall dan Hotel	1.0251	0.8827	0.5702
	Restoran dan Toko	1.0251	4.4661	2.7678
	UKM	1.0251	6.1475	2.9774
Prioritas	Istana Negara	0.9999	0.8999	0.4358
	Kantor Lembaga Negara	0.9999	0.8999	0.4358
	Pangkalan Militer	0.9999	2.0247	0.9807
	Pusat Server Data	0.9999	0.0225	0.0109
	Rumah Sakit	0.9999	0.9599	0.28
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.9944	0.8405	0.5209

Tabel 4-19. Data pengukuran kondisi gabungan 1 pada jadwal 22.00-05.00.

<i>Kawasan</i>	<i>Generator/ Beban</i>	<i>Besar Pengukuran</i>		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-27.2442	1.3632
	PLTU	1.0000	100	-23.9562
	PLTA	1.0000	-33.6462	13.1161
	PLTB	1.0000	10	-15.1217
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0491	3.1479	1.0346
	RT5	1.0491	3.4891	1.1447
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0251	9.983	3.2812
	Industri Kecil	1.0251	6.1033	3.2942
	Industri Sedang	1.0251	47.2877	22.9025
	Mall dan Hotel	1.0251	0.8827	0.5702
	Restoran dan Toko	1.0251	4.4661	2.7678

	UKM	1.0251	6.1474	2.9773
Prioritas	Istana Negara	0.9999	0.8998	0.4358
	Kantor Lembaga Negara	0.9999	0.8998	0.4358
	Pangkalan Militer	0.9999	2.0247	0.9806
	Pusat Server Data	0.9999	0.0225	0.0109
	Rumah Sakit	0.9999	0.9598	0.28
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Tabel 4-20. Data pengukuran kondisi gabungan 2 pada jadwal 05.00-17.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-66.633	22.5072
	PLTU	1.0000	100	-19.707
	PLTA	0.0000	0.0000	0.0000
	PLTB	0.0000	0.0000	0.0000
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0000	2.86	0.94
	RT5	1.0000	3.17	1.04
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0000	9.5	3.1225
	Industri Kecil	1.0000	5.808	3.1348
	Industri Sedang	1.0000	45	21.7945
	Mall dan Hotel	1.0000	0.84	0.5426
	Restoran dan Toko	1.0000	4.25	2.6339
	UKM	1.0000	5.85	2.8333
	UKM	1.0000	5.85	2.8333
Prioritas	Istana Negara	0.9951	0.8912	0.4317
	Kantor Lembaga Negara	0.9951	0.8912	0.4317
	Pangkalan Militer	0.9951	2.0053	0.9713
	Pusat Server Data	0.9951	0.0223	0.0108
	Rumah Sakit	0.9951	0.9507	0.2773
	Rumah Sakit	0.9951	0.9507	0.2773
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	1.0000	0.85	0.5268

Tabel 4-21. Data pengukuran kondisi gabungan 2 pada jadwal 17.00-22.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran
---------	---------------------	------------------

		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-29.2273	2.6817
	PLTU	1.0000	100	-23.189
	PLTA	1.0000	-35.8269	14.644
	PLTB	1.0000	10	-14.0227
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0000	2.86	0.94
	RT5	1.0000	3.17	1.04
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0000	9.5	3.1225
	Industri Kecil	1.0000	5.808	3.1348
	Industri Sedang	1.0000	45	21.7945
	Mall dan Hotel	1.0000	0.84	0.5426
	Restoran dan Toko	1.0000	4.25	2.6339
	UKM	1.0000	5.85	2.8333
Prioritas	Istana Negara	0.9995	0.8991	0.4355
	Kantor Lembaga Negara	0.9995	0.8991	0.4355
	Pangkalan Militer	0.9995	2.023	0.9799
	Pusat Server Data	0.9995	0.0225	0.0109
	Rumah Sakit	0.9995	0.9591	0.2797
	Rumah Sakit	0.9995	0.9591	0.2797
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	1.0000	0.85	0.5268

Tabel 4-22. Data pengukuran kondisi gabungan 2 pada jadwal 22.00-05.00.

Kawasan	Generator/ Beban	Besar Pengukuran		
		V (pu)	P (MW)	Q (MVAR)
Pembangkit	PLTP	1.0000	-29.2273	2.6817
	PLTU	1.0000	100	-23.189
	PLTA	1.0000	-35.8269	14.644
	PLTB	1.0000	10	-14.0227
Rumah Tangga	RT1	0.0000	0.0000	0.0000
	RT2	0.0000	0.0000	0.0000
	RT3	0.0000	0.0000	0.0000
	RT4	1.0000	2.86	0.94
	RT5	1.0000	3.17	1.04
Industri / Komersial	Industri Besar	1.0000	9.5	3.1225
	Industri Kecil	1.0000	5.808	3.1348
	Industri Sedang	1.0000	45	21.7945
	Mall dan Hotel	1.0000	0.84	0.5426
	Restoran dan Toko	1.0000	4.25	2.6339
	UKM	1.0000	5.85	2.8333
Prioritas	Istana Negara	0.9995	0.8991	0.4355

	Kantor Lembaga Negara	0.9995	0.8991	0.4355
	Pangkalan Militer	0.9995	2.023	0.9799
	Pusat Server Data	0.9995	0.0225	0.0109
	Rumah Sakit	0.9995	0.9591	0.2797
Publik dan Sosial	Penerangan Jalan Umum	0.0000	0.0000	0.0000
	Rumah Ibadah	0.0000	0.0000	0.0000
	Sekolah dan Universitas	0.0000	0.0000	0.0000

Berdasarkan hasil yang diperoleh, penambahan PLTS dan genset untuk menyuplai daya ke beban yang sudah ditentukan membuat total daya yang harus disuplai oleh pembangkit PLTP, PLTU, PLTA, dan PLTB berkurang. Pada hasil analisis load flow, daya aktif dari PLTP (dan PLTA pada malam hari) bernilai negatif. Hal ini terjadi karena PLTP (dan PLTA) adalah generator swing yang mampu menyerap daya jika terjadi overload. Pada kasus ini, daya yang disuplai oleh generator PV berlebih, sehingga perlu diserap oleh generator swing. Penyerapan ini memberikan dampak positif untuk rangkaian keseluruhan, sehingga menghindari adanya overload yang bisa berdampak buruk.

Nilai pada bagian Vpu meningkat jika dibandingkan dengan kondisi normal (tanpa keadaan khusus dan darurat). Hal ini disebabkan daya dari pembangkit sudah menyuplai daya yang cukup ke beban. Nilai Vpu maksimum pada beban adalah 1.0251 yaitu untuk industri pada malam hari untuk rangkaian gabungan 1. Nilai ini cukup baik dan normal yang disebabkan adanya penyerapan daya oleh generator swing. Penyerapan daya oleh bus swing ini juga dapat mencegah adanya overvoltage.

Selain hal di atas, jika diperhatikan, nilai penyerapan daya oleh PLTA lebih besar dari PLTP. Hal ini dapat disebabkan karena PLTA lebih dekat dengan beban dibandingkan PLTP. Hal yang perlu diperhatikan adalah nilai penyerapan dari PLTA melebihi kapasitas maksimumnya yang dalam jangka panjang dapat merusak mesin. Langkah yang mungkin dilakukan untuk mengatasi ini adalah mengatur ulang keseimbangan beban dan pembangkit, penambahan kapasitas generator, atau memperbaiki kontrol sistem antar pembangkit.

5. KESIMPULAN

Berikut merupakan kesimpulan yang didapatkan dari pengerjaan tugas besar ini.

- Praktikan telah berhasil membuat jadwal penggunaan pembangkit dan beban. Terdapat 4 pembangkit yang digunakan,

PLTP dan PLTU digunakan sepanjang hari dan PLTA dan PLTB digunakan hanya pada malam hari. Ada 4 kawasan beban yaitu beban industri dan beban prioritas yang aktif sepanjang hari serta beban rumah tangga dan publik & sosial. Pada perancangan ini, kapasitas pembangkit memiliki total kapasitas daya maksimum sekitar 40% diatas total seluruh aliran daya yang dibutuhkan oleh beban.

- Praktikan telah berhasil membuat rancangan sistem tenaga yang desainnya dapat dilihat pada gambar 3.3. dan hasil simulasi kondisi awalnya dapat dilihat pada percobaan 4.1.
- Praktikan telah melakukan analisa tentang hubungan singkat simetris dan tidak simetris pada percobaan 4.5. dan 4.6.
- Praktikan telah membuat desain kapasitas pembangkit yang sesuai dengan spesifikasi yang sesuai. Pada percobaan 4.2 disimulasikan kondisi darurat dimana hanya beban prioritas yang disuplai, pada percobaan 4.4 dilakukan simulasi penambahan PLTS, pada percobaan 4.5 dilakukan simulasi kondisi penambahan genset, pada percobaan 4.6 dilakukan simulasi kondisi 4.4. dan 4.5 secara bersamaan.

6. SARAN

Dalam pelaksanaan praktikum Sistem Tenaga Elektrik, alangkah baiknya jika disertakan penjelasan yang lebih rinci mengenai tahapan dalam mendesai sebuah sistem tenaga listrik. Penambahan informasi cara mendesain akan sangat membantu praktikan dalam memahami proses perancangan, khususnya dalam menentukan konfigurasi sistem, pemilihan parameter pembangkit, serta analisis daya yang diperlukan oleh sistem. Selain itu, akan lebih baik apabila terdapat pemaparan awal mengenai tugas besar secara menyeluruh sebelum dimulai. Dengan demikian, praktikan dapat memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai tujuan, ruang lingkup, dan alur pengerjaan dari tugas besar, sehingga pengerjaan dapat dilakukan dengan lebih maksimal.

7. LOGBOOK

Tanggal	Pekerjaan
14 Mei 2025	Desain Awal Rangkaian serta

	Penentuan Beban dan Pembangkit
15 Mei 2025	Asistensi ke-1
16 Mei 2025	Pembuatan Rangkaian Sistem Tenaga dalam Simulink
18 Mei 2025	Asistensi ke-2 Pembuatan laporan, paper dan PPT

Daftar Pustaka

- [1] "Teknologi – Cirebon Power." Diakses: 18 Mei 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.cirebonpower.co.id/id/cirebon-power/teknologi/>
- [2] "Product Catalogue Medium Voltage." PT SUCACO Tbk.
- [3] "Product Catalogue High Voltage." PT SUCACO Tbk.
- [4] "SPLN 61 (1997) - Spesifikasi Transformator Tenaga Tegangan Tinggi." PT Perusahaan Listrik Negara (PLN), 1 April 1997.
- [5] "SPLN 50 (1997) - Spesifikasi Transformator Distribusi." PT Perusahaan Listrik Negara (PLN), 8 Juli 1997.