

ANALISA PENGARUH PERUBAHAN BEBAN TERHADAP KARAKTERISTIK GENERATOR SINKRON PLTMG DI TANJUNG SELOR

Linda Sartika¹, Abdul Muis Praselia², Joko Sejati³, Ebiet Vebryan⁴, Alfian Ramadhani⁵, Ferdiayansyah⁶,
Ahmad Setiawan⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

¹Lindasartika75@gmail.com

²Praselia.Electric@Borneo.ac.Id

³jokosejati186@gmail.com

Abstract— *Electricity is an essential need for the community for various activities, with demand continuing to increase in line with population growth and development. Daily fluctuations in electricity consumption cause changes in the load received by generators at power plants, which has an impact on the electricity system. This study aims to analyze the characteristics of synchronous generators at the Tanjung Selor PLTMG when load changes occur. The analysis was conducted by calculating the active power, terminal voltage, and armature current using operational data for one week.*

The results show that the average active power peaked at 5,390 kW at 20:00 WITA, with a decrease in terminal voltage when the active power increased. In addition, the armature current increased significantly, reaching an average of 2,150 A at the same time during peak load. These findings confirm the close relationship between load changes and generator electrical parameters. Therefore, proper field current regulation is necessary to maintain terminal voltage stability and power quality.

Keywords— *Synchronous generator, active power, armature, terminal voltage*

Intisari— Energi listrik merupakan kebutuhan esensial bagi masyarakat untuk berbagai aktivitas, yang permintaannya terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan pembangunan. Konsumsi listrik yang tidak tetap setiap harinya menyebabkan perubahan beban yang diterima oleh generator pada pembangkit, yang berdampak pada sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik generator sinkron pada PLTMG di Tanjung Selor saat terjadi perubahan beban. Analisis dilakukan dengan perhitungan terhadap daya aktif, tegangan terminal, dan arus armatur menggunakan data operasional selama satu minggu.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya aktif rata-rata mencapai puncak sebesar 5.390 kW pada jam 20:00 WITA, dengan penurunan tegangan terminal pada saat daya aktif naik. Selain itu, arus armatur meningkat secara signifikan, mencapai rata-rata 2.150 A pada jam yang sama saat beban puncak. Temuan ini menegaskan adanya hubungan erat antara perubahan beban dengan parameter kelistrikan generator. Oleh karena itu, pengaturan arus medan yang tepat sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan tegangan terminal dan kualitas daya listrik.

Kata Kunci— Generator sinkron, daya aktif, armature, tegangan terminal

Energi listrik merupakan tulang punggung pembangunan ekonomi dan sosial di era modern ini. Permintaan listrik global yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan aktivitas industri menuntut sistem pembangkitan yang andal dan efisien [6]. Khususnya di Indonesia, pembangkit listrik tenaga mesin gas (PLTMG) menjadi salah satu opsi pembangkit yang banyak digunakan karena kecepatan start-up-nya dan kemampuan menyesuaikan beban yang dinamis [9]. Namun, pengoperasian PLTMG menghadapi tantangan utama berupa variasi beban yang tidak stabil, yang secara langsung mempengaruhi performa generator sinkron sebagai komponen penghasil daya listrik.

Generator sinkron berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan output tegangan dan frekuensi yang konstan. Perubahan beban yang signifikan dan cepat dapat menyebabkan fluktuasi pada tegangan terminal, arus armatur, serta gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan generator. Kondisi ini dapat menimbulkan ketidakstabilan sistem tenaga listrik serta menurunkan kualitas daya yang diberikan kepada konsumen. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami karakteristik generator sinkron dalam menanggapi perubahan beban, guna mengoptimalkan pengoperasian pembangkit dan menjaga kestabilan jaringan [3].

Pada PLTMG di Tanjung Selor, yang melayani kebutuhan listrik wilayah Tanjung Selor, variasi beban yang berlangsung setiap harinya memerlukan analisis mendalam terkait pengaruh perubahan beban terhadap karakteristik generator sinkron. Beban puncak di sektor perumahan dan komersial yang terjadi pada waktu tertentu meningkatkan arus beban yang harus ditangani oleh generator, sehingga menimbulkan perubahan signifikan pada parameter listrik [5]. Pengetahuan mengenai batas beban yang dapat diterima generator tanpa menurunkan kualitas kinerja sangat diperlukan.

Menurut [4], kestabilan operasional generator sinkron ditentukan oleh kemampuan sistem proteksi dalam mendeteksi dan merespon perubahan beban dan gangguan yang terjadi. Pengaturan proteksi yang tepat membantu mencegah kerusakan pada generator akibat fluktuasi beban dan menjaga kontinuitas suplai listrik. Disparitas dalam pengaturan setting proteksi dapat menyebabkan pemadaman yang tidak diinginkan dan kerugian ekonomi.

Analisis karakteristik generator sinkron terhadap

I. PENDAHULUAN

variabilitas beban mencakup pengamatan hubungan arus beban, tegangan terminal, dan arus eksitasi. Hasil penelitian [3] menunjukkan bahwa perubahan beban secara langsung mempengaruhi nilai-nilai tersebut, di mana peningkatan beban menyebabkan kenaikan arus beban dan arus medan, serta perubahan tegangan induksi yang dapat mempengaruhi kestabilan generator. Kondisi ini mempertegas pentingnya pengaturan arus eksitasi yang akurat untuk menjaga tegangan terminal dalam batas yang dapat diterima.

Stabilitas sinyal kecil pada generator sinkron juga menjadi aspek penting dalam menjaga operasi normal pada berbagai kondisi beban. Penelitian oleh [7] menunjukkan bahwa keberadaan Power System Stabilizer (PSS) dan Automatic Voltage Regulator (AVR) secara signifikan meningkatkan kestabilan sistem dengan meminimalkan osilasi tegangan dan arus akibat perubahan beban. Tanpa mekanisme stabilisasi ini, generator rentan mengalami gangguan yang berdampak pada keselamatan dan performa perangkat.

Dengan menggabungkan data operasional lapangan dan metode perhitungan numerik, penelitian ini bertujuan memberikan gambaran komprehensif mengenai pengaruh perubahan beban terhadap karakteristik generator sinkron pada PLTMG Di Tanjung Selor. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis untuk pengaturan eksitasi, proteksi, dan kontrol otomatis guna menjaga kualitas daya dan meningkatkan keandalan sistem pembangkit.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan studi kasus pada generator sinkron PLTMG milik PT Wijaya Karya Rekayasa Konstruksi di Tanjung Selor. Pendekatan kuantitatif dipilih untuk memperoleh data numerik yang dapat dianalisis secara matematis, sesuai dengan standar penelitian pada karakteristik generator sinkron.

Data yang digunakan merupakan data primer yang diperoleh langsung dari lapangan dengan mengakses log sheet operasi harian generator, meliputi data daya aktif, tegangan terminal, dan arus armatur selama rentang waktu tertentu. Selain itu, informasi spesifikasi teknis generator juga dikumpulkan guna mendukung perhitungan analisis karakteristik.

Analisis dilakukan dengan mengkalkulasi hubungan antara variasi beban dan parameter listrik generator seperti daya aktif, tegangan terminal, serta arus armatur. Perhitungan daya aktif dilakukan menggunakan rumus

$$P = \sqrt{3} \cdot V_t \cdot I_a \cdot \cos\phi \quad (1)$$

dimana V_t adalah tegangan terminal, I_a adalah arus armatur, dan $\cos\phi$ adalah power factor [8]. Tegangan terminal dan arus armatur dianalisis untuk melihat perubahan yang terjadi saat beban bertambah atau berkurang [3].

Analisis grafik kurva yang menggambarkan hubungan temporal antara beban dan parameter listrik juga dilakukan untuk mengidentifikasi pola kestabilan dan titik-titik kritis perubahan beban [4]. Selain itu, dilakukan perbandingan

hasil perhitungan dengan data log sheet untuk evaluasi error dan validasi ketelitian data.

Validasi data dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata hasil perhitungan dengan data lapangan serta nilai referensi dari literatur terkait [2]. Interpretasi hasil difokuskan pada pengaruh perubahan beban terhadap kinerja generator, termasuk potensi penurunan efisiensi dan kestabilan operasional.

Tahapan penelitian dimulai dari pengumpulan data primer dan sekunder, perhitungan parameter listrik terkait beban, analisis kuantitatif dan grafik, hingga validasi data. Hasil analisis digunakan untuk menarik kesimpulan dan rekomendasi teknis terkait pengaturan eksitasi dan proteksi pada generator sinkron PLTMG.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Generator yang ditampilkan pada Gambar 1 merupakan generator sinkron tipe MAN L51/60DF yang terdapat di PLTMG Tanjung Selor. Setiap unit generator ini mampu menghasilkan daya listrik sebesar 7,5 MW. Generator ini memiliki kemampuan dual-fuel, yaitu dapat menggunakan dua jenis bahan bakar, yakni gas dan solar, sehingga memberikan fleksibilitas dalam pengoperasiannya sesuai ketersediaan bahan bakar dan kebutuhan efisiensi. Pada pembangkit PLTMG Tanjung Selor, terdapat dua unit generator operasional yang bekerja secara paralel. Dengan demikian, total daya maksimal yang dapat dihasilkan mencapai 15 MW, yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik di kota Tanjung Selor dan sekitarnya. Perhitungan kapasitas total pembangkit ini merupakan penjumlahan daya dari kedua generator, yakni $7,5 + 7,5 = 15\text{MW}$.



Gambar 1. Generator sinkron yang terdapat pada PLTMG Tanjung Selor

Tabel I
Jenis dan Tipe Mesin PLTMG Tanjung Selor

Model Mesin	Tipe Mesin	Daya (MW)	Tegangan (KV)	Cos Phi
MAN G1	L51/60DF	7,5	11	0,9
MAN G2	L51/60DF	7,5	11	0,9

Tabel I menyajikan data *gross* atau *log sheet* dari Generator 1 (G1) yang digunakan selama satu minggu, mulai tanggal 1 Oktober 2021 hingga 7 Oktober 2021, dengan interval pengamatan selama 24 jam setiap harinya.

Data gross yang digunakan merupakan output langsung dari generator pada tegangan 11 kV sebelum dilakukan transformasi ke tegangan tinggi melalui trafo step-up menjadi 20 kV. Penggunaan data gross ini penting untuk mendapatkan gambaran akurat mengenai performa generator pada level output aslinya tanpa pengaruh peningkatan tegangan, sehingga analisis karakteristik daya dan parameter kelistrikan dapat dilakukan secara tepat. Pada penelitian ini penulis khusus membahas Analisa respon pada Generator 1.

Tabel II
Data Generator 1

Jam	Tanggal	Cos Phi	iR	iS	iT	Tegangan (KV)
8.00	01/10/ 2021	0,9	232	233	234	11,2
9.00			245	245	246	11,2
10.00			255	254	255	11,2
11.00			271	276	271	11,2
12.00			275	275	275	11,2
13.00			279	275	279	11,2
14.00			275	274	275	11,2
15.00			206	207	285	11,2
16.00			259	259	259	11,2
17.00			256	254	256	11,2
18.00			265	264	265	11,3
19.00			309	308	311	11,3
20.00			307	301	303	11,4
21.00			292	288	289	11,4
22.00			281	276	278	11,4
23.00			265	261	262	11,4
0.00			247	243	243	11,4
1.00			232	227	229	11,4
2.00			229	224	225	11,4
3.00			224	220	221	11,4
4.00			218	214	216	11,4
5.00			212	208	210	11,4
6.00			212	208	210	11,4
7.00			215	211	214	11,4

Data gross atau *log sheet* dari Generator 1 yang digunakan selama satu minggu merekam performa operasional generator selama 24 jam sehari. Data ini mencerminkan parameter kelistrikan utama seperti daya aktif (MW), tegangan terminal (kV), dan arus armatur (A) pada output asli generator yaitu di tegangan 11 kV sebelum ditransformasikan ke 20 kV melalui step-up transformer.

Dari data *log sheet*, terlihat adanya fluktuasi daya aktif harian yang mengikuti pola beban konsumsi listrik di

wilayah Tanjung Selor. Beban puncak biasanya terjadi pada malam hari sekitar jam 19.00-21.00 WITA, dengan daya mendekati kapasitas maksimum unit yaitu sekitar 7,5 MW. Hal ini menunjukkan bahwa generator bekerja optimal dalam kondisi mendekati kapasitas penuh selama waktu puncak.

Tegangan terminal pada output 11 kV relatif stabil dengan sedikit penurunan saat terjadi lonjakan beban. Penurunan tegangan ini wajar dalam karakteristik generator sinkron ketika beban meningkat, disebabkan oleh penurunan tegangan akibat peningkatan arus armatur dan reaktansi internal generator. Namun, kestabilan tegangan tetap terjaga dalam batas toleransi yang aman untuk operasi dan kelangsungan suplai listrik bagi konsumen.

Arus armatur mengikuti perubahan beban dengan peningkatan signifikan pada saat beban mencapai puncaknya. Kenaikan arus armatur ini menunjukkan respons langsung generator terhadap permintaan daya yang meningkat. Arus yang terlalu tinggi sebagai akibat beban berlebih dapat menyebabkan pemanasan berlebih dan potensi kerusakan, sehingga data arus armatur penting untuk monitoring keamanan operasional.

Analisis data *log sheet* memberikan gambaran efisiensi operasional generator selama minggu pengamatan. Selama periode tersebut, data menunjukkan bahwa efisiensi generator cenderung menurun sedikit pada beban rendah dan naik mendekati kapasitas maksimum. Ini konsisten dengan karakteristik generator sinkron yang memiliki efisiensi kerja terbaik pada beban penuh atau mendekati penuh ([3], [7]).

A. Perhitungan Daya Aktif Generator

Berikut ini merupakan perhitungan daya aktif selama 24 jam dengan perhitungan selang waktu 1 jam. Perhitungan daya aktif 8:00 :

$$i_{total} = \frac{IR + iS + iT}{3}$$

$$i_{total} = \frac{232 + 233 + 234}{3}$$

$$= 233 \text{ Ampere}$$

Maka, dapat diketahui total beban arus yang terhitung pada jam 8:00 adalah sebesar 233 ampere. Sehingga dapat diketahui daya total pada jam 8:00 yaitu dengan menggunakan persamaan:

$$p_{total} = \sqrt{3} \cdot v \cdot i \cdot \cos\phi$$

$$p_{total} = \sqrt{3} \cdot 11,2 \cdot 233 \cdot 0,9$$

$$= 4063,1472 \text{ watt} \times 1000 = 4,1 \text{ MW}$$

Maka, dari hasil perhitungan diatas diperoleh hasil perhitungan daya aktif seperti pada Tabel III.

Tabel III menyajikan data perhitungan daya aktif (MW) Generator 1 yang dikalkulasi berdasarkan arus armatur, tegangan terminal, dan faktor daya dengan interval pengukuran 1 jam. Dari data ini dapat dianalisis beberapa aspek penting mengenai kinerja generator.

Tabel III
Perhitungan Daya Aktif (MW) Generator 1

Jam/ Tgl	01/ 10/ 2021	02/ 10/ 2021	03/ 10/ 2021	04/ 10/ 2021	05/ 10/ 2021	06/ 10/ 2021	07/ 10/ 2021
08.00	4,1	3,7	3,8	3,9	3,9	4,1	3,6
09.00	4,3	3,6	3,8	4,0	4,3	4,5	5,1
10.00	4,4	3,6	3,7	4,2	4,4	4,5	4,2
11.00	4,8	3,7	3,7	4,3	4,5	4,6	4,6
12.00	4,8	4,0	3,9	4,3	4,7	4,7	4,9
13.00	4,8	3,9	4,1	4,4	4,9	4,9	5,0
14.00	4,8	4,0	4,2	4,6	5,1	4,8	5,2
15.00	4,1	4,2	4,2	4,8	5,2	4,9	5,2
16.00	4,5	4,3	4,2	4,6	5,3	4,8	5,2
17.00	4,5	4,3	4,4	4,5	5,1	4,7	5,0
18.00	4,7	4,4	4,2	4,8	5,1	4,8	4,8
19.00	5,4	5,4	5,5	5,3	5,7	0,0	5,7
20.00	5,4	5,4	5,4	5,4	5,7	4,7	5,6
21.00	5,1	5,3	5,3	5,3	5,7	4,3	5,5
22.00	4,9	5,0	4,9	4,9	5,3	4,3	5,2
23.00	4,7	4,8	4,5	4,5	4,9	4,1	4,9
00.00	4,3	4,5	4,3	4,4	4,9	3,9	4,6
01.00	4,1	4,6	6,1	4,4	4,6	3,9	4,5
02.00	4,0	4,4	4,2	4,3	4,6	3,8	4,3
03.00	3,9	4,2	4,1	4,0	4,4	3,6	4,2
04.00	3,8	4,2	3,9	4,0	4,2	3,6	4,0
05.00	3,7	4,0	3,9	3,9	4,2	3,7	3,8
06.00	3,7	4,0	3,9	3,9	4,1	3,7	3,8
07.00	3,8	3,9	3,8	3,9	4,3	3,6	3,9

Data menunjukkan adanya pola beban yang konsisten setiap hari. Daya aktif rata-rata berkisar antara 3,6 MW di waktu beban rendah (seperti dini hari) hingga puncak beban malam hari yang mencapai lebih dari 5 MW pada jam 19.00 sampai 21.00. Pola ini mencerminkan kecenderungan konsumsi listrik di daerah dengan aktivitas tinggi pada malam hari, khas untuk area perumahan dan komersial.

Meski kapasitas maksimum Generator 1 adalah 7,5 MW, data menunjukkan bahwa selama periode pengamatan, generator beroperasi pada sekitar 50% sampai 70% dari kapasitas puncak. Hal ini dapat mengindikasikan pengoperasian dalam daerah yang efisien, karena generator sinkron umumnya memiliki efisiensi optimal pada beban penuh ataupun mendekati beban penuh [3].

Perubahan daya antar jam rata-rata tidak drastis, yang menandakan kestabilan operasi generator dan performa yang baik dalam merespons perubahan beban secara bertahap. Penurunan daya mendadak atau lonjakan ekstrim tidak terlihat, yang mengindikasikan sistem kontrol dan proteksi generator yang efektif.

Berdasarkan data, disarankan untuk menjaga pola operasi yang tidak terlalu sering mengalami beban sangat rendah atau sangat tinggi, guna mengoptimalkan

durabilitas dan efisiensi generator. Monitoring berkelanjutan terhadap data daya aktif ini penting untuk menyesuaikan strategi pengaturan beban dan pemeliharaan preventif.

B. Perhitungan Rata-rata Daya Aktif Setiap Jam Pada Generator

Cara mendapatkan daya aktif rata-rata pada tabel diatas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{rata-rata} = \frac{P_{total\ jam}}{n}$$

$$P_{rata-rata} = \frac{4,1 + 3,7 + 3,8 + 3,9 + 3,9 + 4,1 + 3,6}{7}$$

$$= 3,9 \text{ MW}$$

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas diperoleh tabel daya rata-rata tiap jamnya, sebagai berikut:

Tabel IV
Rata-rata Daya Aktif Generator

Jam (Wita)	Daya aktif (MW)
08.00	3,9
09.00	4,2
10.00	4,2
11.00	4,3
12.00	4,5
13.00	4,6
14.00	4,7
15.00	4,7
16.00	4,7
17.00	4,6
18.00	4,7
19.00	4,7
20.00	5,4
21.00	5,2
22.00	4,9
23.00	4,6
00.00	4,4
01.00	4,6
02.00	4,2
03.00	4,0
04.00	4,0
05.00	3,9
06.00	3,9
07.00	3,9

Tabel IV menyajikan nilai rata-rata daya aktif (MW) yang dihasilkan oleh Generator 1 pada setiap jam dalam waktu 24 jam sepanjang satu minggu pengamatan. Analisis data ini memberikan gambaran lebih terperinci tentang pola beban harian yang diterima oleh generator.

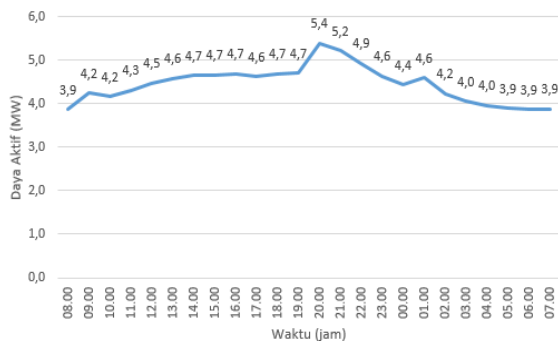
Data menunjukkan adanya pola fluktuasi daya aktif yang sistematis, di mana daya aktif pada jam dini hari (00.00-06.00) berada pada level rendah sekitar 3,9 MW, mencerminkan permintaan listrik yang rendah pada waktu tersebut. Sebaliknya, daya aktif meningkat secara bertahap mulai pagi hari dan mencapai puncaknya sekitar 5,4 MW

antara pukul 20.00 hingga 21.00, menandakan peningkatan konsumsi listrik pada waktu malam hari. Pola ini konsisten dengan karakteristik kebutuhan listrik umum yang meningkat di malam hari akibat aktivitas rumah tangga dan sektor komersial.

Generator 1, dengan kapasitas maksimum 7,5 MW, beroperasi rata-rata pada kisaran 50% sampai 72% dari kapasitasnya pada sebagian besar jam kerja. Ini menunjukkan pengoperasian pada beban optimal yang memungkinkan efisiensi kerja yang baik, memperpanjang umur mesin, dan menjaga konsumsi bahan bakar yang efisien sesuai dengan standar pengoperasian generator sinkron [3].

Pola daya aktif ini memberikan informasi krusial bagi teknisi dan operator pembangkit dalam merancang strategi pengaturan beban, pemeliharaan preventif, serta pengaturan eksitasi maupun proteksi generator. Menjaga kestabilan daya aktif pada kisaran yang terus diobservasi membantu mencegah lonjakan beban mendadak yang bisa mengganggu kestabilan generator dan mengurangi risiko kerusakan.

Berdasarkan hasil dari tabel dan perhitungan dapat dihasilkan grafik kurva daya aktif generator 1 tiap jamnya seperti berikut.



Gambar 2. Kurva daya aktif generator 1

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh daya aktif kemudian dilakukan perhitungan error terhadap Log Sheet pada Generator 1 seperti berikut:

Penyelesaian :

$$\text{Error} = \frac{\text{Log Sheet}}{\text{Perhitungan}} \times 100\%$$

$$\text{Error} = \frac{4,4}{4,1} \times 100\% = 0,3\%$$

Maka dari hasil perhitungan error yang dilakukan maka dapat dibuat pada tabel berikut:

Tabel V
Error Perhitungan Terhadap Log Sheet Generator

Jam	Log sheet	Perhitungan	Error (%)
08.00	4,4	4,1	0,3
09.00	4,6	4,3	0,3
10.00	4,8	4,4	0,4
11.00	4,8	4,8	0
12.00	5,2	4,8	0,4

Tabel V
Error Perhitungan Terhadap Log Sheet Generator

Jam	Log sheet	Perhitungan	Error (%)
13.00	5,3	4,8	0,5
14.00	5,2	4,8	0,4
15.00	5,2	4,1	1,1
16.00	4,9	4,5	0,4
17.00	4,8	4,5	0,3
18.00	5,0	4,7	0,3
19.00	6,0	5,4	0,6
20.00	5,9	5,4	0,5
21.00	5,6	5,1	0,5
22.00	5,4	4,9	0,5
23.00	5,1	4,7	0,4
00.00	4,7	4,3	0,4
01.00	4,4	4,1	0,3
02.00	4,4	4,0	0,4
03.00	4,3	3,9	0,4
04.00	4,2	3,8	0,4
05.00	4,1	3,7	0,4
06.00	4,1	3,7	0,4
07.00	4,2	3,8	0,4

Tabel V menyajikan perbandingan antara data daya aktif yang dihitung secara matematis dan nilai daya aktif yang tercatat pada *log sheet* generator untuk Generator 1 selama periode pengamatan. *Error* atau selisih antara kedua data ini diukur sebagai persentase untuk mengetahui tingkat kesesuaian dan validitas data perhitungan dengan data operasi nyata.

Dari tabel terlihat bahwa *error* nilai daya aktif berkisar antara 0% hingga 1,1%, dengan mayoritas error berada di bawah 0,5%. Error terkecil yaitu 0% pada beberapa jam tertentu, menandakan kesesuaian data sangat baik, sedangkan error tertinggi sebesar 1,1% terjadi pada jam tertentu yang bisa dipengaruhi oleh ketidaktepatan pencatatan atau fluktuasi dalam kondisi operasi.

Tingkat *error* yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa metode perhitungan daya aktif yang digunakan cukup akurat dan sesuai untuk merefleksikan kondisi nyata operasi generator. Adanya perbedaan kecil bisa dimaklumi mengingat data *log sheet* bersifat real-time dan raw, yang dapat mengalami sedikit gangguan teknis atau pembulatan angka selama pencatatan.

Memahami margin error ini penting untuk evaluasi kualitas data dan perbaikan pengambilan data di masa depan. Validasi seperti ini membantu menjaga keakuratan monitoring kinerja generator dan menjadi dasar keputusan dalam pengaturan pengoperasian dan pemeliharaan.

Dari tabel diatas dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan rata-rata error generator 1 dapat dirumuskan sebagai berikut:

Pastikan bahwa simbol-simbol di dalam persamaan telah didefinisikan sebelum persamaan atau langsung mengikuti setelah persamaan muncul.

$$\begin{aligned} Error_{Rata-rata} &= \frac{\text{jumlah nilai}}{\text{banyak data}} \\ Error_{Rata-rata} &= \frac{10}{24} \\ &= 0,4\% \end{aligned}$$

C. Perhitungan Tegangan Terminal Generator 1

Berdasarkan hasil dari perhitungan daya aktif yang diperoleh, maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui tegangan terminal dan karakteristik tegangan ketika terjadinya perubahan daya aktif. Perhitungan tegangan terminal jam 08:00 tanggal (1/10/2021).

$$\begin{aligned} V_t &= 11,2 \text{ KV} = 11.200 \text{ Volt} \\ V_\phi &= \frac{V_t}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{11.200}{\sqrt{3}} \\ &= 6,47\text{V} \end{aligned}$$

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas diperoleh tabel tegangan terminal tiap jamnya selama 1 minggu, sebagai berikut:

Tabel VI
Perhitungan Tegangan Terminal (V0 Generator 1

Jam/ Tgl	01/ 10/ 2021	02/ 10/ 2021	03/ 10/ 2021	04/ 10/ 2021	05/ 10/ 2021	06/ 10/ 2021	07/ 10/ 2021
08.00	6,47	6,59	6,53	6,53	6,47	6,47	6,42
09.00	6,47	6,53	6,53	6,47	6,36	6,47	6,47
10.00	6,47	6,47	6,47	6,47	6,42	6,47	6,47
11.00	6,47	6,42	6,47	6,47	6,42	6,47	6,47
12.00	6,47	6,47	6,47	6,42	6,42	6,47	6,47
13.00	6,47	6,47	6,47	6,42	6,42	6,47	6,47
14.00	6,47	6,42	6,47	6,47	6,42	6,47	6,47
15.00	6,47	6,42	6,47	6,47	6,42	6,47	6,47
16.00	6,47	6,42	6,47	6,42	6,42	6,47	6,47
17.00	6,47	6,47	6,47	6,47	6,47	6,47	6,47
18.00	6,53	6,53	6,47	6,53	6,47	6,47	6,47
19.00	6,53	6,47	6,47	6,47	6,47	0,00	6,47
20.00	6,59	6,53	6,47	6,53	6,47	6,53	6,47
21.00	6,59	6,53	6,53	6,53	6,47	6,53	6,53
22.00	6,59	6,53	6,53	6,53	6,47	6,59	6,53
23.00	6,59	6,53	6,53	6,53	6,53	6,59	6,53
00.00	6,59	6,53	6,53	6,53	6,53	6,59	6,53
01.00	6,59	6,59	6,59	6,59	6,53	6,59	6,53
02.00	6,59	6,59	6,59	6,59	6,53	6,59	6,53
03.00	6,59	6,59	6,59	6,59	6,53	6,59	6,53
04.00	6,59	6,59	6,59	6,59	6,53	6,59	6,53
05.00	6,59	6,59	6,59	6,59	6,53	6,59	6,53
06.00	6,59	6,59	6,59	6,53	6,53	6,59	6,53
07.00	6,59	6,53	6,53	6,53	6,53	6,59	6,53

Tabel VI menyajikan nilai rata-rata tegangan terminal output Generator 1 selama 24 jam dalam periode pengamatan satu minggu. Data tegangan ini penting sebagai indikator kestabilan output listrik yang dihasilkan oleh generator.

Nilai tegangan terminal rata-rata berada di kisaran sekitar 6,4 sampai 6,5 kV, dengan variasi yang sangat kecil antar jam. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pengaturan tegangan pada generator cukup efektif dalam menjaga kestabilan tegangan output, meskipun terjadi perubahan beban sepanjang hari.

Tidak terdapat penurunan tegangan terminal yang signifikan selama periode puncak beban malam hari, yang biasanya akan menimbulkan penurunan tegangan akibat peningkatan arus armatur. Ini menunjukkan bahwa sistem eksitasi dan kontrol pengaturan tegangan di generator mampu menyesuaikan dengan perubahan beban secara baik dan cepat, mempertahankan tegangan pada level yang stabil.

Kestabilan tegangan terminal merupakan faktor penting untuk menjaga kualitas dan kontinuitas pasokan listrik. Tegangan yang stabil berarti mengurangi risiko kerusakan pada peralatan konsumen serta meningkatkan efisiensi operasional pembangkit. Pencapaian kestabilan ini memperlihatkan bahwa sistem proteksi dan regulator tegangan berfungsi optimal di PLTMG Tanjung Selor.

D. Perhitungan Rata-rata Tegangan Terminal Setiap Jam Pada Generator 1.

Cara mendapatkan tegangan terminal rata-rata pada tabel diatas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_{t_{rata-rata}} &= \frac{V_{t_{totaljam}}}{n} \\ V_{t_{rata-rata}} &= \frac{6,47+6,59+6,53+6,53+6,47+6,47+6,42}{7} \\ &= 6,50\text{V} \end{aligned}$$

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas diperoleh tabel tegangan terminal rata-rata tiap jamnya, sebagai berikut:

Tabel VII
Rata-rata Tegangan Terminal Generator 1

Jam	Tegangan terminal (V)
08.00	6,50
09.00	6,47
10.00	6,47
11.00	6,46
12.00	6,46
13.00	6,46
14.00	6,46
15.00	6,46
16.00	6,45
17.00	6,47
18.00	6,50
19.00	5,56
20.00	6,52

Tabel VII
Rata-rata Tegangan Terminal Generator 1

Jam	Tegangan terminal (V)
21.00	6,53
22.00	6,54
23.00	6,55
00.00	6,55
01.00	6,57
02.00	6,57
03.00	6,57
04.00	6,57
05.00	6,57
06.00	6,56
07.00	6,55

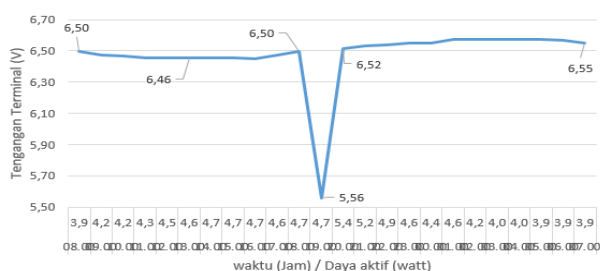
Tabel 7 menunjukkan nilai rata-rata tegangan terminal output Generator 1 selama 24 jam dalam periode pengamatan satu minggu. Data ini mengindikasikan kestabilan tegangan yang dihasilkan pada tingkat output sebelum transformasi lebih lanjut.

Tegangan terminal berkisar pada nilai sekitar 6,4 hingga 6,55 kV di sepanjang hari dengan variasi yang kecil antar jam. Variasi tegangan yang minimal menunjukkan bahwa sistem pengaturan eksitasi dan stabilisasi tegangan bekerja efektif menjaga output generator tetap berada pada batas yang diinginkan, walau terjadi perubahan beban.

Nilai tegangan relatif stabil meskipun ada fluktuasi beban yang terekam dalam data daya aktif. Hal ini penting karena tegangan yang stabil menjadi syarat utama kualitas daya listrik yang baik, tidak menyebabkan gangguan pada peralatan listrik konsumen.

Kestabilan tegangan ini berkontribusi pada peningkatan keandalan pasokan listrik. Sistem kontrol eksitasi generator tampaknya mampu melakukan penyesuaian cepat dan akurat terhadap perubahan beban untuk menjaga tegangan terminal tetap stabil. Hal ini merupakan indikator positif dari desain dan pengoperasian PLTMG Tanjung Selor.

Berdasarkan hasil dari tabel dan perhitungan pada generator 1 dapat dihasilkan grafik kurva tegangan terminal (V) terhadap daya aktif (watt) tiap jamnya seperti berikut:



Gambar 3. Kurva G1 tegangan terminal (V) terhadap daya aktif (Watt)

E. Perhitungan Rata-rata Arus Armature

Berdasarkan hasil dari perhitungan daya aktif yang diperoleh, maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui arus armature (I_a) terhadap terjadinya perubahan daya aktif. Berikut ini merupakan perhitungan arus armature pada generator 1 selama 24 jam dengan perhitungan selang waktu 1 jam dengan perhitungan daya aktif 8:00.

$$\begin{aligned}
 p &= 4.1 \text{ MW} \\
 V_t &= 11,2 \text{ KV} = 11.200 \text{ volt} \\
 \cos\phi &= 0,9 \\
 I_{a\text{rata-rata}} &= \frac{p}{\sqrt{3} \cdot V_t \cdot \cos\phi} \\
 I_{a\text{rata-rata}} &= \frac{233 + 209 + 217 + 222 + 222 + 234 + 208}{7} \\
 &= 1.547 \text{ ampere}
 \end{aligned}$$

Maka untuk menghitung arus armature (I_a) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{p}{\sqrt{3} \cdot V_t \cdot \cos\phi} \\
 I_a &= \frac{4.1}{\sqrt{3} \cdot 11.200 \cdot 0,9} \\
 &= 233 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas diperoleh tabel tegangan terminal tiap jamnya selama 1 minggu, sebagai berikut:

Tabel VIII
Perhitungan Arus Armature (A) Generator 1

Jam/ Tgl	01/ 10/ 2021	02/ 10/ 2021	03/ 10/ 2021	04/ 10/ 2021	05/ 10/ 2021	06/ 10/ 2021	07/ 10/ 2021
8.00	233	210	217	222	223	235	208
9.00	245	207	215	230	252	259	292
10.00	255	208	213	242	252	260	243
11.00	273	213	214	247	259	263	266
12.00	275	228	221	247	274	272	283
13.00	278	225	236	255	281	279	288
14.00	275	230	239	262	293	274	300
15.00	233	243	241	275	302	283	299
16.00	259	246	241	264	305	278	298
17.00	255	246	252	257	290	269	284
18.00	265	251	243	273	291	277	275
19.00	309	312	314	301	325	0	324
20.00	304	310	310	304	330	269	324
21.00	290	300	300	299	328	246	315
22.00	278	283	281	278	304	244	294
23.00	263	274	258	254	279	234	280

Tabel VIII menyajikan data arus armature (I_a) yang dihitung berdasarkan data daya aktif, tegangan terminal, dan faktor daya untuk Generator 1 selama satu minggu dengan pengukuran tiap jam.

Arus armature menunjukkan pola kenaikan dan penurunan yang sejalan dengan fluktuasi beban generator.

Saat beban meningkat, arus armature juga meningkat, mencapai nilai tertinggi sekitar 2.150 Ampere pada jam puncak beban. Sebaliknya, arus armature berkurang pada jam-jam beban rendah seperti dini hari, mengindikasikan respons generator terhadap permintaan daya.

Korelasi positif antara daya aktif dan arus armature mengkonfirmasi karakteristik dasar generator sinkron, di mana peningkatan beban listrik dibarengi dengan peningkatan arus pengalir. Hal ini penting untuk pengaturan eksitasi dan perlindungan generator agar dapat menghindari kondisi overcurrent yang dapat merusak mesin [3].

Variasi arus armature yang terpantau dalam rentang aman menunjukkan bahwa generator beroperasi dalam kondisi yang relatif stabil. Pemantauan arus armature secara rutin membantu memastikan bahwa generator tidak mengalami overloading yang berpotensi menyebabkan kerusakan dini atau gangguan operasional.

Data ini menjadi dasar penting untuk penyusunan strategi pemeliharaan preventif dan pengaturan parameter proteksi. Arus armature yang selalu dipantau secara ketat memungkinkan tindakan korektif cepat jika terjadi lonjakan, serta menjaga efisiensi operasional sistem kelistrikan.

F. Perhitungan Rata-rata Arus Armature (I_a) Setiap Jam Pada Generator 1

Cara mendapatkan tegangan terminal rata-rata pada tabel diatas dapat dirumuskan sebagai berikut:

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas diperoleh tabel tegangan terminal rata-rata tiap jamnya, sebagai berikut:

Tabel IX
Rata-rata Arus Armature Generator 1

Jam (Wita)	Arus armature (A)
08.00	1.547
09.00	1.702
10.00	1.672
11.00	1.735
12.00	1.800
13.00	1.842
14.00	1.873
15.00	1.876
16.00	1.892
17.00	1.854
18.00	1.875
19.00	1.886
20.00	2.150
21.00	2.077
22.00	1.962
23.00	1.841
00.00	1.757
01.00	1.819
02.00	1.673
03.00	1.601
04.00	1.566
05.00	1.538

Tabel IX
Rata-rata Arus Armature Generator 1

Jam (Wita)	Arus armature (A)
06.00	1.532
07.00	1.642

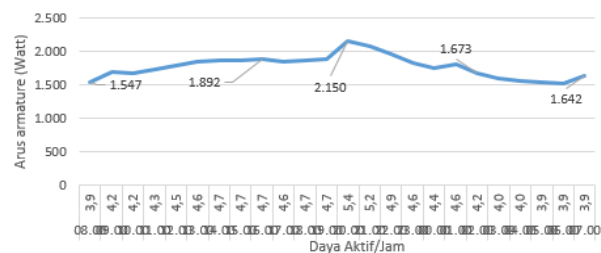
Tabel 9 menunjukkan nilai rata-rata arus armature (I_a) yang mengalir pada Generator 1 pada tiap jam selama satu minggu observasi. Arus armature merupakan salah satu parameter krusial yang menggambarkan beban listrik yang dipikul oleh generator.

Dari data terlihat pola fluktuasi arus armature yang mengikuti perubahan beban harian pada generator. Arus armature tertinggi tercatat pada jam-jam puncak beban, sesuai dengan peningkatan kebutuhan daya dari konsumen. Nilai arus ini turun di waktu beban rendah (pagi dan dini hari), menandakan adanya hubungan langsung antara arus armature dan variasi beban listrik.

Kestabilan dan besaran arus armature dalam kisaran yang wajar menunjukkan respons generator terhadap permintaan beban berlangsung lancar dan sesuai dengan kapasitas yang ditentukan. Pengukuran arus armature ini juga menjadi indikator penting untuk mendeteksi potensi overcurrent yang dapat mengancam keamanan perangkat dan harus diwaspadai oleh tim operasional.

Pengetahuan mengenai pola arus armature membantu dalam perencanaan pemeliharaan dan pengaturan sistem proteksi, agar dapat mendeteksi dan mengatasi penyimpangan operasional dini seperti lonjakan arus atau gangguan beban tiba-tiba. Pemantauan rutin parameter ini berguna dalam menjaga efisiensi dan ketahanan generator.

Berdasarkan hasil dari tabel dan perhitungan pada generator 1 dapat dihasilkan grafik kurva arus armature (I_a) terhadap daya aktif (watt) tiap jamnya seperti berikut:



Gambar 4. Kurva G_1 arus armature (A) terhadap daya aktif (Watt)

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan beban pada pembangkit PLTMG 15 MW PT. Wijaya Karya Rekayasa Konstruksi Tanjung Selor sangat dipengaruhi oleh kebutuhan konsumen baik dari sektor industri maupun perumahan. Data pemakaian listrik memperlihatkan peningkatan beban rata-rata mulai dari pukul 19:00 hingga 24:00 WITA yang merupakan waktu puncak konsumsi listrik.

Perubahan beban ini mulai terjadi dari pukul 08:00 hingga 21:00, yang berdampak langsung pada peningkatan dan penurunan daya aktif yang dihasilkan oleh generator. Dalam penghitungan daya aktif terdapat perbedaan kecil antara data hasil perhitungan dan log sheet karena data log

sheet tidak bersifat real-time, dengan rata-rata error sebesar 0,4% pada generator 1.

Tegangan terminal pada output generator dipengaruhi secara signifikan oleh daya aktif; saat daya aktif naik, tegangan terminal cenderung turun, dan sebaliknya. Oleh karena itu, pengaturan arus medan atau eksitasi sangat penting untuk menjaga kestabilan tegangan terminal agar suplai listrik tetap berkualitas dan stabil.

Dari segi arus armature, diperoleh bahwa arus armature (I_a) sebanding dengan perubahan daya aktif; kenaikan daya aktif menyebabkan peningkatan arus armature. Ini menunjukkan respons langsung generator terhadap variasi beban, yang perlu dimonitor untuk menghindari kondisi beban berlebih yang dapat merusak generator.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya pemantauan dan pengaturan parameter beban, arus, dan tegangan secara tepat pada PLTMG 15 MW guna menjaga performa dan keandalan pasokan listrik di Tanjung Selor.

REFERENSI

- [1] Annisa, W. D. (2019). Analisis Pengaruh Perubahan Beban terhadap Karakteristik Generator Sinkron. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 11, 33-57.
- [2] Ermawati, F. M., et al. (2023). Analisa Karakteristik Generator Sinkron terhadap Perubahan Beban Daya Aktif. *Jurnal Teknik Elektro*.
- [3] Fitrayanto, A. (2017). Pengaruh Perubahan Beban terhadap Tegangan Terminal Generator. *Jurnal Energi*, 9(2), 102-110
- [4] Marbun, R. (2016). Sistem Proteksi pada Generator Sinkron dan Dampaknya terhadap Kestabilan Sistem Tenaga. *Jurnal Teknik dan Aplikasi Tenaga Listrik*, 14(1), 23-30.
- [5] Purmadani, L. (2016). Karakteristik Beban Listrik pada Sektor Perumahan dan Komersial di Indonesia. *Jurnal Energi Terbarukan*, 5(4), 67-74.
- [6] Susanto, M. (tanpa tahun). Sistem Distribusi Tenaga Listrik dan Tantangan Variasi Beban. Makalah Seminar Nasional Energi.
- [7] Widodo, S. (2023). Analisis Stabilitas Sinyal Kecil pada Generator Sinkron dengan PSS dan AVR. *Jurnal Teknik Elektro UGM*, 15(1), 88-98.
- [8] Wibisono, A. (2024). Analisis Kinerja Generator Sinkron Tiga Fasa. *Jurnal Teknik Elektro*.
- [9] Yusniati, R., Sari, N., & Nugroho, H. (2020). Studi Pengoperasian PLTMG pada Kondisi Variasi Beban Dinamis. *Jurnal Teknik Mesin dan Energi*, 10(3), 55-62.