

ANALISIS ALIRAN DAYA TERHADAP FLUKTUASI PEMBEBANAN DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP 1000 MW

Priagung Rahmat Sobirin*¹, Daru Tri Nugroho², Mulki Indana Zulfa³
^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia
*e-mail: priagungrahmatsobirin@gmail.com

Abstrak

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi keandalan pembangkit dalam memproduksi listrik adalah permintaan beban yang berubah-ubah. Ketika beban yang diminta oleh konsumen (PLN) berfluktuasi, aliran daya yang mengalir pun juga akan berubah-ubah mengikuti kondisi beban. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis fluktuasi pembebanan terhadap aliran daya yang mengalir, besar rugi daya, dan jatuh tegangan pada PLTU 1000 MW. Metode yang digunakan adalah menggunakan simulasi *load flow* pada *software* ETAP 19.0.1, dengan metode iterasi aliran dayanya menggunakan metode Newton-Raphson. Metode Newton-Raphson lebih sering digunakan karena lebih efisien dan presisi. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah daya aktif dan reaktif tertinggi yang mengalir untuk beban PLN sebesar 921.183 MW dan 113.567 MVar. Rugi daya aktif dan reaktif tertinggi terjadi di percabangan CW Water Pump Motor dengan nilai persentasenya sebesar 1.32% dan 1.36%. Jatuh tegangan tertinggi sebesar 1.83%. Nilai dari rugi daya dan jatuh tegangan pada semua percabangan masih memenuhi standar PLN karena tidak ada yang melebihi 2%. Berdasarkan simulasi ETAP, generator mengalami peringatan *overload* pada waktu-waktu tertentu dengan beban tertingginya mencapai 973.112 MW, tetapi masih berada dalam kondisi *marginal*. Sementara itu, kabel pada Pemakaian Sendiri masih dapat mengalirkan arus secara normal tanpa ada peringatan *overload*.

Kata kunci: aliran daya; jatuh tegangan; pembebanan; rugi daya.

Abstract

One factor that can influence the reliability of a generator in producing electricity is changing load demand. When the load requested by consumers (PLN) fluctuates, the flow of power will also change according to load conditions. This research aims to analyze load fluctuations in the flow of power, large power losses and voltage drops at a 1000 MW PLTU. The method used is using load flow simulation in ETAP 19.0.1 software, with the power flow iteration method using the Newton-Raphson method. The Newton-Raphson method is more often used because it is more efficient and precise. The results obtained in this research are the highest active and reactive power flowing for PLN loads of 921,183 MW and 113,567 MVar. The highest active and reactive power losses occurred at the CW Water Pump Motor branch with percentage values of 1.32% and 1.36%. The highest voltage drop is 1.83%. The value of power losses and voltage drops at all branches still meets PLN standards because none of them exceeds 2%. Based on the ETAP simulation, the generator experiences overload warnings at certain times with the highest load reaching 973,112 MW, but is still in marginal condition. Meanwhile, cables for private use can still carry current normally without any overload warnings.

Keywords: power flow; voltage drop; loading; power loss.

1. PENDAHULUAN

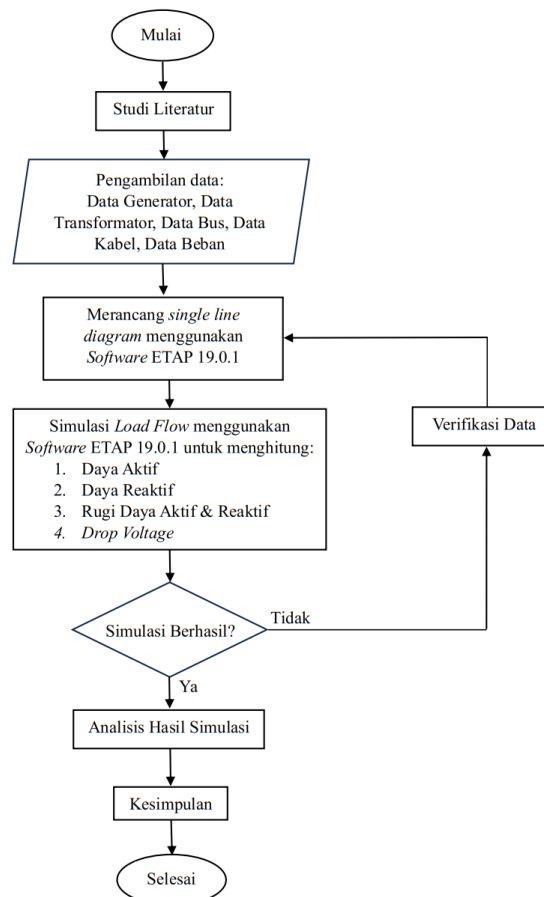
Selama periode 1971 hingga 2022, rata-rata konsumsi listrik penduduk Indonesia hampir selalu naik setiap tahunnya, hanya pada 1973, 1976, dan 1998 yang konsumsinya menurun (1). Kebutuhan listrik di Indonesia yang terus meningkat setiap tahun menjadi salah satu faktor terus beroperasinya PLTU. Salah satu cara untuk menentukan *equipment* pada sistem pembangkit masih berada dalam kondisi baik adalah dengan melakukan analisis aliran daya. Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif di berbagai titik pada jaringan listrik saat keadaan operasi normal (2) (3).

Pada tanggal 28 Agustus 2023 pukul 10.00 WIB hingga 29 Agustus 2023 pukul 09.00 WIB di PLTU 1000 MW, rata-rata beban yang diminta oleh PLN sebesar 864.448 MW atau hampir 90% dari kapasitas pembangkit. Besar daya yang diminta oleh PLN tersebut dapat mempengaruhi kinerja pembangkit ketika beroperasi karena terus berfluktuasi dalam periode satu hari. Oleh karena itu, perlu dilakukan simulasi aliran daya pada tiap simpul di sistem pembangkit untuk mengetahui aliran daya aktif dan reaktifnya, baik pada beban *grid* PLN maupun Pemakaian Sendiri (PS). Kelistrikan PS pada pembangkit disuplai oleh Unit Auxiliary Transformer (UAT) (4). Sebab aliran daya pada pembangkit dapat ikut berubah-ubah, maka dihitung pula besar rugi daya dan *drop voltage* yang diakibatkan oleh fluktuasi pembebanan tersebut.

Penelitian ini dikembangkan dari beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan. Beberapa penelitian tersebut adalah analisis aliran daya pada PLTGU Gresik yang bertujuan menghitung aliran daya aktif, daya reaktif, tegangan, dan *losses* (5). Selanjutnya, ada analisis aliran daya di PT. Sele Raya Merangin Dua yang menggunakan metode Newton-Raphson untuk metode iterasi aliran dayanya (6). Terakhir, ada analisis kelistrikan di PLTU Adipala yang menyimulasikan aliran daya pada bagian Pemakaian Sendiri (7).

2. METODE

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan simulasi *load flow* pada *software* ETAP 19.0.1, dengan metode iterasinya adalah Newton-Raphson. Diagram alur penelitiannya adalah sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

2.1 Tahap Persiapan

Tahap pertama penelitian ini dimulai dari tahap persiapan. Pada tahap ini, dilakukan identifikasi masalah untuk menentukan topik, batasan, tujuan, dan manfaat penelitian. Kemudian, penulis melakukan studi pustaka terhadap teori-teori yang berkaitan dengan topik penelitian dan mencari referensi dari berbagai sumber, seperti buku, jurnal ilmiah, makalah, dan artikel ilmiah.

2.2 Tahap Pengambilan Data

Pada tahap ini, penulis mengambil data yang dibutuhkan untuk penelitian di PLTU 1000 MW. Data yang diambil adalah data *real* di lapangan, hal ini dilakukan agar hasil dari simulasi lebih akurat. Dalam melakukan analisis aliran daya, data-data yang diperlukan adalah generator, *generator transformer*, *unit auxiliary transformer*, *bus*, kabel, dan *load*.

2.3 Tahap Perancangan dan Simulasi

Hal pertama yang dilakukan pertama kali pada tahap ini adalah merancang *single line diagram*. Dalam melakukan analisis aliran daya, *single line diagram* harus dirancang dengan lengkap dan sesuai dengan

keadaan yang sesungguhnya. Setelah *single line diagram* selesai dirancang pada *software* ETAP 19.0.1, spesifikasi dari tiap komponen dapat diisi mulai dari sumber hingga ke beban.

Pada tahap perancangan, data yang diambil akan diperhitungkan dengan menggunakan Persamaan 1 dan 2 berikut (7):

$$P_{1ph} = V \times I \times \cos\phi \quad (1)$$

$$P_{3ph} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \quad (2)$$

Kedua persamaan tersebut digunakan untuk mencari daya aktif dan daya reaktif pada rangkaian tiga fasa berdasarkan data aktual tegangan, arus, dan faktor daya. Selanjutnya, nilai daya aktif dan reaktif tersebut akan dimasukkan ke *lumped load* maupun beban motor.

Selanjutnya, metode iterasi yang digunakan adalah Newton-Raphson. Solusi Newton-Raphson merupakan algoritma untuk menyelesaikan persamaan nonlinier pada sistem komputer karena aritmatika nyata memerlukan referensi memori dua kali lebih banyak untuk melakukan jumlah operasi yang sama seperti aritmatika kompleks (8)(9). Setelah itu, simulasi aliran daya dapat dilakukan dengan *me-running* ikon *load flow*. Ketika *running load flow* dijalankan pada *software* ETAP 19.0.1, terdapat kemungkinan simulasi tidak berhasil. Hal yang dapat dilakukan saat simulasi tidak berhasil adalah dengan memverifikasi data. Data-data yang dimaksud terdiri atas spesifikasi komponen maupun nilai parameter listrik yang dimasukkan. Spesifikasi komponen yang dimaksud di sini adalah generator, GT, UAT, *bus*, dan kabel. Sementara itu, parameter listriknya adalah beban daya aktif dan reaktif, baik pada beban campuran (*lumped load*) maupun beban motor.

Skenario simulasi aliran daya pada penelitian ini adalah menjalankan kondisi beban *grid* PLN dan Pemakaian Sendiri (PS) sebanyak 24 kali. Hal ini karena data yang diambil merupakan data aktual dalam 24 jam sehingga terdapat 24 data beban yang berbeda-beda. Jadi, dapat diketahui pengaruh fluktuasi pembebanan terhadap aliran daya yang mengalir pada sistem pembangkit.

2.4 Tahap Akhir

Pada tahap ini, dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang telah dilakukan. Beberapa faktor yang akan dianalisis adalah aliran daya pada sistem pembangkit, baik untuk *grid* PLN maupun pada sistem Pemakaian Sendiri (PS). Kemudian, menganalisis pengaruh fluktuasi pembebanan terhadap kinerja *equipment*, dengan menggunakan Persamaan 3 untuk menghitung persentase *drop voltage* dan Persamaan 4 untuk menghitung persentase rugi daya, baik daya aktif maupun daya reaktif yang tersalurkan ke beban (10).

$$V_R = \frac{V_S - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (3)$$

$$\%P_{loss} = \frac{P_{loss}}{P} \times 100\% \quad (4)$$

Persamaan 3 dan 4 tersebut digunakan untuk menganalisis apakah persentase dari rugi daya dan *drop voltage* masih memenuhi SPLN No. 72 Tahun 1987 dan SPLN No. 1 Tahun 1995.

3. HASIL PENELITIAN

3.1 Spesifikasi Peralatan

Pada percobaan simulasi aliran daya, terdapat beberapa komponen yang spesifikasinya harus dimasukkan ke dalam *software* ETAP 19.0.1. Komponen-komponen tersebut adalah generator, Unit Auxiliary Transformer (UAT), Generator Transformer (GT), kabel, dan beban. Generator memiliki kapasitas sebesar 1000 MW, dengan PF sebesar 0.85%, serta tegangan keluaran sebesar 27 kV. Selanjutnya, UAT memiliki kapasitas sebesar 80 MVA, dengan tegangan masukannya sebesar 27 kV dan tegangan keluarannya sebesar 10 kV. GT memiliki kapasitas 1220 MVA, dengan tegangan masukannya sebesar 27 kV dan tegangan keluarannya sebesar 500 kV. Kabel pada Pemakaian Sendiri memiliki panjang dan luas penampang yang berbeda-beda. Panjang kabelnya mulai dari 26 hingga 2237 meter, lalu untuk luas penampangnya mulai dari 3x50 hingga 3x120 mm. Beban-beban pada Pemakaian Sendiri juga dibedakan menjadi dua, yaitu *motor load* dan *lumped load*.

3.2 Langkah-Langkah Menjalankan Simulasi Aliran Daya pada ETAP

Simulasi aliran daya atau *load flow* pada *software* ETAP 19.0.1 dapat dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut.

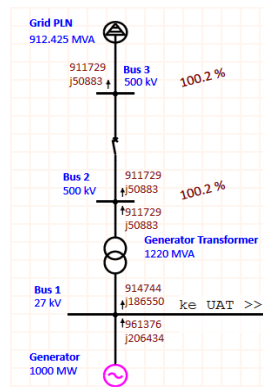
1. Menggambar *single line diagram* pada lembar kerja ETAP berdasarkan *single line* sistem tenaga listrik PLTU 1000 MW.
2. Memasukan parameter tiap-tiap komponen.
3. Mengeklik *toolbar load flow analysis*.
4. Memilih metode *load flow* dengan cara mengeklik *load flow study case*. Di sini terdapat beberapa pilihan metode, pilihlah metode Newton-Raphson.
5. Menjalankan *load flow* dengan cara mengeklik ikon *run load flow* pada *load flow toolbar*.
6. Melihat hasil secara lengkap dengan mengeklik *report manager* lalu pilih *complete*. Disini terdapat beberapa pilihan format untuk hasil aliran daya tersebut.

3.3 Aliran Daya untuk Grid PLN

Daya yang dikirim untuk PLN disalurkan dengan tegangan pengiriman sebesar 500 kV. Besarnya beban daya aktif dan reaktif PLN dapat dicari dengan menghitung arus, tegangan, dan faktor daya menggunakan persamaan 1 dan 2. Contoh perhitungan untuk menghitung beban PLN tersebut adalah sebagai berikut:

$$P_{3ph} = \sqrt{3} \times 509.5 \text{ kV} \times 1056.8 \text{ A} \times 0,961$$
$$P_{3ph} = 919.86 \text{ MW}$$
$$Q_{3ph} = \sqrt{3} \times 509.5 \text{ kV} \times 1056.8 \text{ A} \times 0,276$$
$$Q_{3ph} = 113.69 \text{ MVar}$$

Nilai daya aktif dan daya reaktif dari perhitungan tersebut merupakan beban PLN pada pukul 11.00 WIB yang selanjutnya akan di-input-kan ke *lumped load* pada *software* ETAP, serta berlaku pula untuk semua jam selama periode satu hari tersebut. Berikut merupakan hasil simulasi aliran daya untuk beban *grid* PLN.



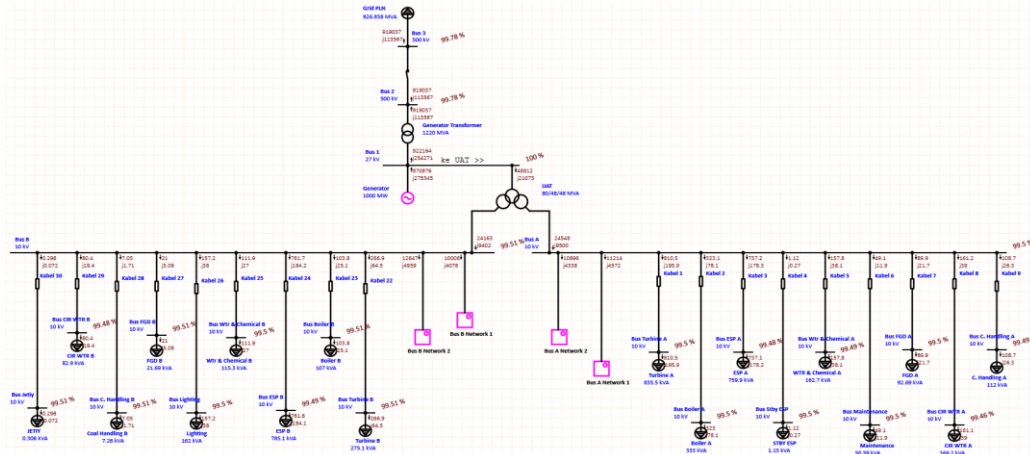
Gambar 2. Simulasi Aliran Daya untuk Beban PLN

Gambar simulasi di atas merupakan *single line Gas Insulated Switchgear (GIS)*. GIS merupakan sistem penyambungan dan pemutusan jaringan listrik yang dilindungi oleh gas SF6 bertekanan sebagai bahan insulasinya (11). Dapat dilihat bahwa generator mengirimkan daya dengan melewati GT terlebih dahulu. Tegangan keluaran generator sebesar 27 kV dinaikkan menjadi 500 kV oleh GT. Setelah melewati GT, daya yang disalurkan akan melewati Bus 2. Bus didefinisikan sebagai suatu titik dimana satu atau lebih cabang terhubung (12). Bus mewakili simpul-simpul sistem kelistrikan dan dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi beban (13). Kemudian, terdapat Circuit Breaker (CB) 500 kV yang berfungsi untuk memutus dan menyambungkan aliran listrik. Apabila pembangkit sedang mengalami *maintenance* atau *shut down*, maka CB ini akan terbuka yang menyebabkan aliran listrik tidak tersambung ke *grid* PLN. Terakhir, terdapat Bus 3 yang terhubung langsung ke *grid* PLN atau SUTET 500 kV. Pembangkit menyuplai jaringan listrik *Alternating Current (AC)* yang menopang tiga jenis beban, yaitu resistif, induktif, dan kapasitif (14).

3.4 Aliran Daya untuk Pemakaian Sendiri (PS)

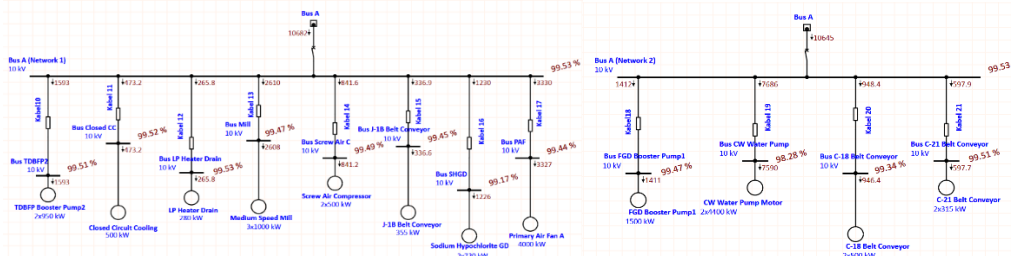
Pada simulasi aliran daya untuk *single line diagram* PS, terdapat *lumped load* dan beberapa *network* di Bus A maupun Bus B yang di dalamnya terdapat beban-beban motor 10 kV. Distribusi listrik pada PS hampir

serupa seperti distribusi untuk rumah atau pemukiman yang terdiri atas tegangan menengah dan tegangan rendah (15). Tegangan dari generator sebesar 27 kV akan diturunkan menjadi 10 kV oleh UAT. Tegangan keluaran dari UAT tersebut akan langsung tersambung ke beban motor 10 kV. Sementara itu, tegangan 10 kV pada percabangan *lumped load* akan diturunkan lagi oleh *transformer* yang lebih kecil menjadi 0.4 kV. Berikut merupakan *single line diagram* utama PS beserta *network-network* di dalamnya.

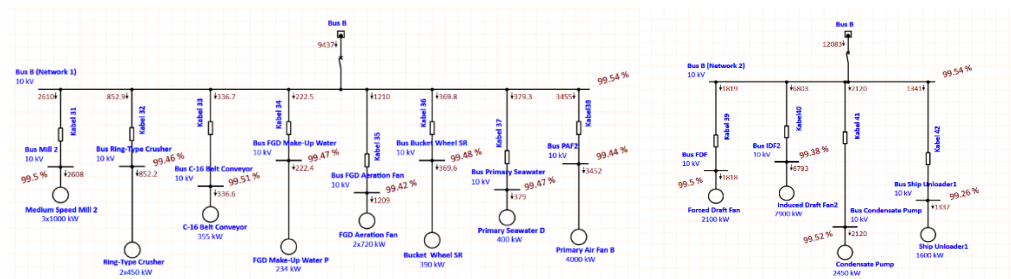


Gambar 3. *Single Line Diagram* Pemakaian Sendiri

Beban PS di PLTU 1000 MW pada *software* ETAP dikelompokkan menjadi *lumped load* dan *motor load*. Hal ini menyesuaikan dengan beban yang ada pada PLTU 1000 MW tersebut. Gambar 3 di atas merupakan *single line diagram* utama yang mencakup *lumped load*, serta beban motornya dapat dilihat pada gambar-gambar di bawah ini.



Gambar 4. Network 1 dan 2 pada Bus A



Gambar 5. Network 1 dan 2 pada Bus B

Tabel 1. Daftar Beban Motor di Bus A dan Bus B (16)

Beban Motor Bus A		Beban Motor Bus B	
Nama Motor	Kapasitas (kW)	Nama Motor	Kapasitas (kW)
TDBFP Booster Pump Motor	2x950	Medium Speed Mill Motor	3x1000
Closed Circuit Cooling Water Pump Motor	500	Ring Type Crusher	2x450
LP Heater Drain Water Pump Motor	280	C-16 Belt Conveyor	355
Medium Speed Mill Motor	3x1000	FGD Make-Up Water Pump	234
Screw Air Compressor	2x500	FGD Aeration Fan	2x720
J-1B Belt Conveyor	355	Bucket Wheel Stacker Reclaimer	390
Sodium Hypochlorite Generation Device	2x730	Primary Seawater Desalination	400

Primary Air Fan Motor A	4000	Primary Air Fan Motor B	4000
FGD Booster Pump	1500	Forced Draft Fan Motor	2100
CW Water Pump Motor	2x4400	Induced Draft Fan Motor	7900
C-18 Belt Conveyor	2x500	Condensate Pump Motor	2450
C-21 Belt Conveyor	2x315	Ship Unloader	1600

Beban campuran pada *software* ETAP cukup diisi pada bagian nominal tegangan, daya aktif, dan daya reaktifnya. Nilai dari kVA, %PF, dan Amp akan otomatis terisi jika nilai kW dan kVar sudah diisi. Sementara itu, pada beban motor terdapat lebih banyak parameter yang harus dimasukkan. Parameter-parameter tersebut seperti kapasitas motor, jumlah kutub, nominal tegangan, serta data aktual ketika motor tersebut bekerja.

3.5 Alert View pada Simulasi Aliran Daya di Software ETAP 19.0.1

ETAP merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik (17). Keunggulan ETAP versi 19.0.1 daripada versi-versi sebelumnya adalah terdapat fitur penilaian kapasitas dan pertimbangan kelebihan beban, ukuran kabel yang lebih lengkap, serta resolusi yang lebih tinggi (18). Pada *software* ETAP 19.0.1, terdapat fitur yang bernama Alert View. Tujuan utama dari adanya fitur ini adalah untuk menyediakan daftar langsung terkait semua peringatan yang dihasilkan oleh perhitungan aliran daya. Peringatan tersebut meliputi pesan ketika komponen/peralatan yang ada dalam sistem mengalami kondisi *marginal* ataupun *critical*. Pesan *critical* dalam beberapa kasus mungkin harus ditinjau ulang. Sementara itu, pesan *marginal* tidak sepeenting pesan *critical*, tetapi pesan tersebut mungkin mengandung sebab terjadinya perbedaan ataupun peringatan dini. Berikut merupakan contoh *output* dari Alert View.

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating	Phase Type
Generator	Generator	Overload	1000 MW	961.376	96.1	3-Phase

Gambar 6. Alert View pada Software ETAP

Pada *output* Alert View di atas, generator mengalami peringatan *overload* ketika beban mencapai 96.1% dari kapasitasnya. Namun, kondisi ini masih dalam kondisi *marginal* pada simulasi *load flow*. Secara *real*-nya, generator juga masih dapat melayani beban PLN dengan baik. Pada simulasi *load flow* ini, peralatan yang mendapat peringatan tersebut hanyalah generator. Sementara itu, peralatan lain seperti *transformer*, kabel, dan *bus* tidak mendapat peringatan apapun. Generator mengalami *overload* ketika beban melebihi 95% dari kapasitasnya, atau 950 MW (12).

3.6 Analisis Aliran Daya Aktif dan Reaktif

Pada aliran daya aktif dan reaktif di Pemakaian Sendiri, terdapat beberapa hubungan yang dapat disimpulkan ketika beban PLN berfluktuasi. Berikut merupakan jumlah daya yang mengalir pada bus A maupun bus B, serta daya yang dikirim untuk PLN.

Tabel 2. Perbandingan Daya Aktif dan Reaktif untuk Generator, PLN, dan PS

Pukul	Generator (MW)	PLN (MW)	PS (MW)	%	Generator (MVar)	PLN (MVar)	PS (MVar)
10.00	969.957	919.037	47.793	5.20	271.928	106.615	20.657
11.00	970.050	919.701	47.886	5.21	274.970	113.567	20.699
12.00	891.372	844.408	44.346	5.25	217.458	80.633	19.016
13.00	968.771	918.318	47.382	5.16	243.354	84.985	20.367
14.00	970.461	919.252	48.128	5.24	246.208	86.823	20.759
15.00	967.729	916.521	48.143	5.25	247.401	88.664	20.810
16.00	964.928	915.054	46.838	5.33	228.252	69.285	20.067
17.00	903.219	855.913	44.621	5.21	191.135	51.571	18.725
18.00	971.775	920.747	47.936	5.21	220.962	61.400	20.451
19.00	969.910	919.318	47.497	5.17	229.712	70.072	20.376
20.00	973.112	921.183	48.812	5.08	236.165	75.843	21.073
21.00	968.976	917.939	47.966	5.23	219.390	60.613	20.583

22.00	970.663	919.135	48.471	5.27	203.635	45.346	20.700
23.00	966.147	914.359	48.753	5.33	180.169	22.862	20.691
00.00	842.928	796.414	44.211	5.55	127.332	5.181	18.522
01.00	801.355	754.286	45.007	5.97	117.213	5.706	18.728
02.00	803.694	756.360	45.268	5.98	107.551	-4.339	18.901
03.00	792.012	745.280	44.709	5.99	92.853	-16.727	18.549
04.00	789.884	744.115	43.752	5.88	94.523	-14.354	18.076
05.00	868.475	820.547	45.472	5.54	143.993	14.398	19.085
06.00	894.316	845.194	46.530	5.51	166.834	30.525	19.648
07.00	788.432	742.097	44.322	5.97	138.662	29.427	18.633
08.00	957.745	908.274	46.453	5.11	196.794	41.293	19.709
09.00	961.376	911.729	46.633	5.11	206.434	50.883	19.884

Keterangan:

- = Nilai Tertinggi
- = Nilai Terendah
- = Generator mengalami *overload*

Daya aktif dan reaktif tertinggi untuk Pemakaian Sendiri terjadi pada pukul 20.00 WIB. Permintaan daya reaktif yang diminta oleh PLN sangat bervariasi di setiap waktunya. Nilai daya reaktif tertinggi untuk beban PLN adalah sebesar 113.567 MVar, lalu nilai terkecilnya sebesar -16.727 MVar. Nilai negatif untuk daya reaktif pada sistem tenaga listrik menunjukkan bahwa beban bersifat kapasitif. Dari persentase di atas, besarnya beban Pemakaian Sendiri terhadap beban PLN masih berada di kisaran 5% untuk semua waktu. Persentase tersebut adalah perbandingan daya aktif PLN dengan PS. Hal ini karena rata-rata beban pada PLTU merupakan *motor load* sehingga besarnya daya yang mengalir hampir selalu berbanding lurus dengan PLN. Hanya *lumped load* yang tidak berbanding lurus karena merupakan beban untuk penerangan, *control room*, maupun perkantoran pada PLTU. Pada tabel tersebut, generator juga mengalami peringatan *overload* pada waktu-waktu tertentu. Tanda *overload* di atas didapat dari Alert View pada hasil simulasi. Namun, kondisi tersebut masih berada dalam kondisi *marginal* yang berarti generator masih dapat melayani beban dengan baik.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Daya Aktif Generator, PLN, dan PS

Dari ketiga grafik di atas, generator masih memiliki kemampuan yang optimal untuk menyuplai beban PLN. Kemudian, grafik daya aktif Pemakaian Sendiri memiliki bentuk yang hampir sama pula. Pada beberapa waktu, terdapat selisih yang sedikit berbeda jika dibandingkan dengan grafik daya aktif PLN maupun generator. Namun, hal ini masih terbilang normal karena beban pada Pemakaian Sendiri juga dipengaruhi oleh *lumped load*. Dapat dilihat pula bahwa pada pukul 12.00 WIB dan 17.00 WIB, permintaan daya aktif mengalami penurunan. Permintaan yang berkurang tersebut dapat disebabkan karena pada pukul 12.00 WIB rata-rata penduduk atau masyarakat yang menggunakan listrik sedang beristirahat. Sementara itu, pada pukul 17.00 WIB dapat disebabkan karena sedang terjadi pergantian *shift* pada industri-industri yang disuplai oleh pembangkit. Jadi, permintaan beban juga cenderung turun.

Selanjutnya, perbandingan daya reaktif generator, PLN, dan Pemakaian Sendiri dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Daya Reaktif Generator, PLN, dan PS

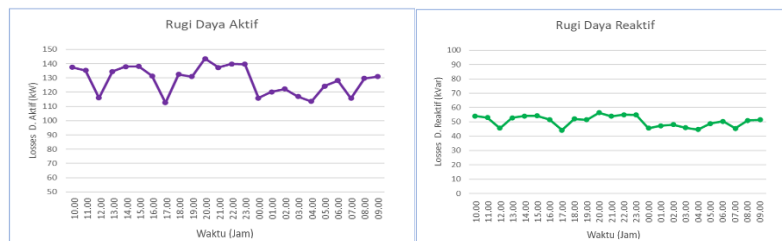
Dari grafik di atas, generator masih dapat memenuhi permintaan beban PLN tersebut karena bentuk grafiknya hampir sama. Sementara itu, bentuk grafik dari daya reaktif untuk Pemakaian Sendiri cenderung sama dengan grafik daya aktifnya. Hal ini dapat terjadi karena rata-rata beban daya aktif pada Pemakaian Sendiri selalu terpengaruh oleh beban PLN. Selain itu, peralatan-peralatan pada internal PLTU juga didominasi oleh beban motor. Jadi, besarnya daya reaktif PLN berpengaruh terhadap produksi daya reaktif generatornya saja.

3.7 Analisis Rugi Daya Aktif dan Reaktif

Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses	
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar
Kabel 19	7.968	3.125	-7.864	-3.083	103.5	41.9

Gambar 9. Contoh *Output* Rugi Daya pada *Software* ETAP

Gambar di atas merupakan contoh *output* rugi daya aktif dan reaktif pada salah satu cabang. Besarnya aliran daya yang mengalir menyebabkan rugi daya yang bervariasi. Persentase rugi daya aktif dan reaktif tertinggi pada periode satu hari tersebut adalah sebesar 1.32% dan 1.36%. Nilai persentase tersebut didapat dari perhitungan menggunakan Persamaan 4. Persentase tertinggi terjadi di percabangan CW Water Pump Motor.



Gambar 10. Grafik Rugi Daya Aktif dan Reaktif

Pada grafik di atas, nilai tertinggi untuk rugi daya berbanding lurus dengan nilai tertinggi beban PLN. Namun, nilai terendahnya tidak berbanding lurus atau tidak terjadi pada pukul 07.00 WIB sebagai beban terendahnya, melainkan terjadi pada pukul 17.00 WIB. Hal ini dapat terjadi karena faktor daya pada pukul 17.00 WIB lebih rendah daripada pukul 07.00 WIB. Dapat disimpulkan bahwa besarnya daya reaktif mempengaruhi pula rugi dayanya karena memperkecil faktor daya, walaupun perbedaan rugi daya di antara kedua waktu tersebut masih terbilang kecil. Jadi, persentase rugi daya aktif dan reaktif masih memenuhi standar PLN No. 72 Tahun 1987 karena semua nilainya berada di bawah 5%.

3.8 Analisis Drop Voltage

Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vinag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	
Kabel 19	7.968	3.125	-7.864	-3.083	103.5	41.9	99.5	98.2	1.30

Gambar 11. Contoh *Output Drop Voltage* pada *Software* ETAP

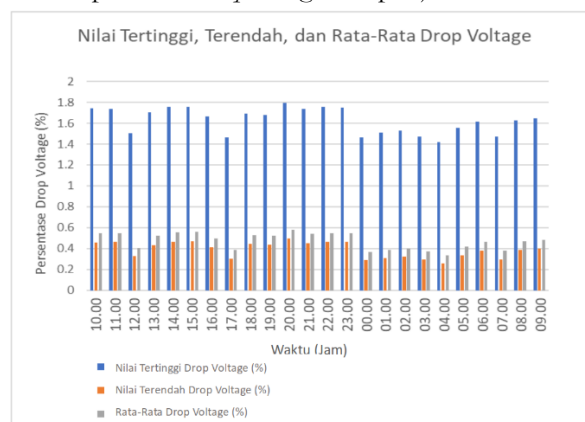
Gambar di atas merupakan salah satu *output* untuk *drop voltage*. Nilai rata-rata, nilai tertinggi, dan nilai tertendah untuk *drop voltage* pada percabangan di sistem pembangkit dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini. Persentase tersebut didapat dari perhitungan menggunakan Persamaan 3.

Tabel 3. Nilai Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah untuk *Drop Voltage*

Pukul	Rata-Rata DV (%)	DV Tertinggi (%)	DV Terendah (%)
10.00	0.545	1.741	0.457
11.00	0.549	1.736	0.462
12.00	0.408	1.502	0.328
13.00	0.521	1.705	0.433
14.00	0.554	1.753	0.462
15.00	0.558	1.757	0.466
16.00	0.496	1.664	0.411
17.00	0.386	1.466	0.304
18.00	0.528	1.693	0.443

19.00	0.521	1.679	0.437
20.00	0.579	1.833	0.492
21.00	0.539	1.734	0.451
22.00	0.549	1.755	0.460
23.00	0.549	1.748	0.463
00.00	0.369	1.467	0.289
01.00	0.387	1.508	0.305
02.00	0.401	1.532	0.319
03.00	0.372	1.472	0.292
04.00	0.333	1.419	0.254
05.00	0.416	1.554	0.333
06.00	0.463	1.614	0.379
07.00	0.378	1.472	0.297
08.00	0.467	1.625	0.384
09.00	0.481	1.646	0.398

Selanjutnya, di bawah ini terdapat kurva *drop voltage* dari penjabaran Tabel 3 di atas.



Gambar 12. Kurva *Drop Voltage*

Pada kurva di atas, nilai rata-rata *drop voltage* untuk setiap jamnya hampir selalu mendekati nilai terendahnya. Hal ini dapat terjadi karena beban-beban pada PLTU 1000 MW memiliki *rating* daya di bawah 2000 kW. Selain itu, *lumped load* tidak pernah mencapai nilai 1000 kW pada periode satu hari tersebut. Dapat dilihat juga bahwa semua nilai terendah, tertinggi, dan rata-rata berada di bawah 2%. Nilai tertinggi yang terjadi hanya sebesar 1.83% atau sebesar 9.82 kV. Semua nilai *drop voltage* tertinggi terjadi di percabangan CW Water Pump Motor. Hal ini dapat disebabkan karena beban motor tersebut merupakan yang terbesar, dengan total daya sebesar 8800 kW. Ditambah lagi, lokasi motor tersebut juga cukup jauh, yaitu sepanjang 1781 meter dari UAT. Hal ini karena semakin panjang kabel, maka semakin besar pula impedansinya. Impedansi ini merupakan gabungan resistansi dan reaktansi yang terdapat pada kabel dan *transformer* (19)(20). Berdasarkan SPLN No. 1 Tahun 1995, toleransi jatuh tegangan yang diizinkan adalah +5% dan -10% (21). Jadi, kabel pada Pemakaian Sendiri masih memenuhi standar *drop voltage*. Selain itu, kabel juga tidak ada yang mengalami peringatan *overload* ketika menghantarkan arus listrik.

4. DISKUSI

Berdasarkan hasil penelitian, ditemukan perbedaan kondisi dari simulasi aliran daya pada penelitian-penelitian sebelumnya. Kondisi tersebut adalah nilai dari rugi daya dan *drop voltage* yang berbeda-beda sehingga timbul temuan yang perlu dievaluasi. Pada aliran daya di PLTGU Gresik, besarnya *drop voltage* yang timbul akibat aliran daya yang mengalir mencapai 7% (5). *Bus* yang mengalami *drop voltage* tersebut tergolong sebagai *critical bus* dan harus dilakukan evaluasi, seperti *uprating* kabel dan pemindahan beban. Kemudian, penambahan beban pada aliran daya di PT. Sele Raya Merangin Dua menyebabkan peningkatan daya pembangkitan dan distribusi daya dari 1069.1 kVA menjadi 1155.2 kVA (6). Namun, penambahan beban tersebut tidak mempengaruhi kinerja pembangkit dan sistem tenaga listrik masih berjalan dengan normal. Selanjutnya, pada aliran daya di PLTU Adipala ketika pembangkit beroperasi normal, tidak ada anomali yang menyebabkan harus dievaluasinya sistem tenaga listrik tersebut. Ketika beban PLN mencapai 585,028 MW, didapat beban pemakaian sendiri pada UAT A sebesar 24,780 MW

dan UAT B sebesar 27,506 MW (7). Penelitian di PT. Sele Raya Merangin Dua dan di PLTU Adipala sama seperti pada penelitian ini karena tidak ada nilai *drop voltage* yang menyebabkan kondisi *critical* pada *bus*. Temuan yang ditemukan adalah *bus* masih dalam kondisi *marginal*. Akan tetapi, peningkatan parameter rugi daya yang cukup signifikan perlu diperhatikan walaupun masih dalam kategori normal. Hal ini agar *maintenance* awal ataupun pencegahan kerusakan peralatan dapat dilakukan sesuai standar dan tepat pada waktunya.

Selain adanya *drop voltage*, terdapat rugi daya yang dibahas pada penelitian di PLTGU Gresik dan PT. Sele Raya Merangin Dua. Rugi daya (*losses*) pada PLTGU Gresik mencapai angka 1.14% untuk *losses* tertingginya. Selanjutnya, rugi daya yang terjadi di PT. Sele Raya Merangin Dua mencapai angka 3%. Namun, nilai tersebut masih memenuhi standar PLN karena rugi daya yang terjadi masih di bawah 5%. Pada penelitian ini, nilai rugi daya juga masih di bawah 5%. Kondisi bus dengan nilai-nilai tersebut masih tergolong dalam kategori *marginal*. Artinya, sistem tenaga listrik masih dapat mengalirkan arus secara normal dengan rugi-rugi daya tersebut. Besarnya rugi daya juga dipengaruhi karena beban yang berfluktuasi.

Selanjutnya, ketika beban sedang bernilai tinggi, temuan yang mungkin ditemukan pada sistem pembangkit adalah konsumsi bahan bakar yang tinggi pula. PLTU 1000 MW membutuhkan sekitar 500 ton/jam batu bara untuk menghasilkan daya sebesar 1000 MW (22). Hal ini tentu dipengaruhi juga oleh nilai kalori dari batu bara tersebut. Ketika nilai kalori batu bara bernilai tinggi, maka batu bara yang dibutuhkan akan semakin sedikit, begitu pula sebaliknya.

5. KESIMPULAN

Fluktuasi beban PLN yang bervariasi membuat sistem pembangkit menyesuaikan aliran dayanya. Beban daya aktif PLN berbanding lurus dengan beban daya aktif Pemakaian Sendiri. Daya aktif tertinggi yang mengalir untuk beban PLN adalah sebesar 921.183 MW. Kemudian, beban daya reaktif PLN tidak berbanding lurus dengan beban daya reaktif PS, melainkan berbanding lurus dengan produksi daya reaktif generator. Daya reaktif tertinggi yang mengalir untuk beban PLN adalah sebesar 113.567 MVar. Fluktuasi tersebut juga menimbulkan rugi daya dan *drop voltage* yang berbeda-beda di setiap waktunya. Rugi daya aktif dan reaktif tertinggi terjadi di percabangan CW Water Pump Motor dengan nilai persentasenya sebesar 1.32% dan 1.36%, lalu *drop voltage* tertinggi adalah sebesar 1.83%. Nilai rugi daya aktif dan reaktif serta *drop voltage* pada semua waktu di setiap cabang masih memenuhi standar PLN No. 72 Tahun 1987 dan PLN No. 1 Tahun 1995 karena tidak ada yang melebihi 2%. Dari hasil simulasi ETAP, generator mengalami peringatan *overload* pada waktu-waktu tertentu dengan beban tertingginya mencapai 973.112 MW, tetapi masih berada dalam kondisi *marginal*. Kabel pada Pemakaian Sendiri juga masih dapat menghantarkan arus secara normal tanpa ada peringatan *overload*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada pihak PLTU 1000 MW yang telah membantu penulis dalam melaksanakan penelitian ini. Semoga hasil analisis dan pembahasan pada jurnal ini dapat memberi manfaat bagi banyak pihak terutama di bidang Ketenagalistrikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahdiat A. Konsumsi Listrik Penduduk Indonesia Naik pada 2022, Capai Rekor Baru [Internet]. 2023. Available from: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/02/23/konsumsi-listrik-penduduk-indonesia-naik-pada-2022-capai-rekor-baru>
2. Cekdin, Cekmas. Sistem Tenaga Listrik Contoh Soal dan Penyelesaiannya Menggunakan Matlab. Yogyakarta: Andi; 2007.
3. Saadat H. Power System Analysis. New York: Milwaukee School of Engineering; 1999.
4. Tri Cardo Purba, Zuraidah Tharo* SA. Analisis Perencanaan Pemeliharaan SST dan UAT di PLTU Mabar Elektrindo. 2018;1–5.
5. Apriliani ND, Suheta T, Bachri A. Analisis Aliran Daya Pada PLTGU Blok 1 PT . PJB Unit Pembangkitan Gresik. 2020;5.
6. Dua M, Metode M. Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik Pada PT. Sele Raya Merangin Dua Menggunakan Metode Newton-Raphson. 2021;4(2):51–8.

7. Wigiyanto F, Sutisna U. Analisis Sistem Kelistrikan Pemakaian Sendiri PLTU Adipala Pada Saat Gangguan Transformator. 2020;(1):28–42.
8. Fikri M, Anggainsi D. Metode Newton Raphson Untuk Analisis Aliran Daya Jaringan. J Ilm SUTET. 2018;
9. J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma TJO. Power System Analysis and Design. 5th ed. Global Engineering; 2012.
10. Mahardiananta IMA, P. A. R. Arimbawa, Santiari DAS. Perhitungan Drop Tegangan Sistem Distribusi Menggunakan Metode Aliran Daya. Resistor. 2020;3.
11. Duanaputri R, Ridzki I, Yulianto MI, Hidayatullah MS. Studi Kelayakan Gas Insulated Switchgear di PT. Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 8. Elposys J Sist Kelistrikan. 2023;8(1):16–22.
12. Etap 19.5 User Guide. California: Operation Technology, Inc; 2019. 6533 p.
13. Jr., William Stevenson (Author) JG (Author). Power Systems Analysis (Si). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016.
14. Sulasno. Analisis Sistem Tenaga. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro; 1993.
15. Abrar T. Rekonfigurasi Sistem Distribusi 20 KV Gardu Induk Teluk Lembu dan PLTMG Laggam Power untuk Mengurangi Rugi Daya dan Drop Tegangan. J Sains, Teknol dan Ind. 2014;11.
16. Of L, Of C, Electrical THE. LIST OF CABLE OF THE ELECTRICAL PRIMARY AND LIGHTING. 2018. 215 p.
17. Tabatabaei SRMNM. Design of Grounding System ins Substation by ETAP Intelligent Software. Int J Tech Phys Probl Eng. 2010;2:45–9.
18. Operation Technology, Inc [Internet]. 2019 [cited 2023 Nov 14]. ETAP 19 Smart Collaborative Team-Based Solutions. Available from: <https://etap.com/product-releases/19>
19. Watkins AJ. Perhitungan Instalasi Listrik. 2nd ed. Jakarta: Erlangga; 2004. 128 p.
20. Elektrik JE. Analisis Hubung Singkat Pada Saluran Udara Tegangan Menengah 20 Kv (Studi Kasus Pada Penyulang Lg 02 Pt Pln (Persero) Rayon. 2019;08:25–31.
21. SPLN No. 1 Tahun 1995: Tegangan-Tegangan Standar. Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara; 1995.
22. Wardana RA. Analisis Perubahan Pembebanan terhadap Efisiensi dan Rugi-Rugi Main Transformator 27/500 kV Unit 3A PT. Sumber Segara Primadaya. Institut Teknologi Sepuluh November; 2022.