

ANALISIS RUGI DAYA DAN JATUH TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 KV PT. PLN (PERSERO) ULP TANJUNG SELOR

Patria Julianto¹, Diah Ajeng Puspita²

^{1,2}Tenknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

¹patria@borneo.ac.id

²diah51376@gmail.com

Abstract—The demand for electrical energy continues to increase every year, which must be balanced by the provision of reliable and adequate power supply. To achieve this, PT PLN (Persero), as the national electricity provider, must ensure the delivery and distribution of electrical energy in accordance with established standards. This study analyzes the 20 kV distribution system of PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor through power flow simulations using ETAP 19.0.1 Power Station software. The simulation results, including power losses and voltage drops at each bus, were compared with analytical calculations to validate their accuracy. The power flow analysis showed that the total power loss under daytime load conditions was 6.29%, and under nighttime load conditions was 6.64%. The lowest voltage occurred at the Berau Junction bus, with voltage levels of 18.52 kV during the day and 18.39 kV at night. According to SPLN standards, these voltage levels remain within acceptable limits.

Keywords: Distribution System, Power Flow, Power Losses, Voltage Drop, PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor.

Intisari—Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat setiap tahun harus diimbangi dengan penyediaan energi listrik yang andal dan memadai. Untuk mencapai hal tersebut, PT PLN (Persero) sebagai penyedia energi listrik nasional harus mampu menyalurkan dan mendistribusikan energi listrik kepada pelanggan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Penelitian ini menganalisis sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor melalui simulasi aliran daya menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 Power Station. Hasil simulasi berupa rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada setiap bus dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis untuk memvalidasi tingkat akurasinya. Berdasarkan hasil simulasi aliran daya, total rugi-rugi daya pada kondisi beban siang sebesar 6,29% dan pada kondisi beban malam sebesar 6,64%. Tegangan terendah terjadi pada bus Simpang Berau, yaitu sebesar 18,52 kV pada kondisi siang dan 18,39 kV pada kondisi malam. Berdasarkan standar SPLN, nilai tegangan tersebut masih berada dalam batas yang diizinkan.

Kata Kunci: Sistem Distribusi, Aliran Daya, Rugi Daya, Jatuh Tegangan, PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan dasar yang vital untuk menunjang aktivitas rumah tangga, industri, pemerintahan, dan layanan publik. Peningkatan aktivitas ekonomi dan pembangunan mendorong naiknya permintaan energi yang andal, efisien, dan berkualitas dari tahun ke tahun [1]. Dalam konteks ini, PT PLN (Persero) sebagai penyedia listrik nasional dituntut menjaga kecukupan sekaligus mutu dan keandalan

penyaluran. Salah satu langkah kunci adalah pemantauan dan evaluasi berkala performa jaringan untuk menekan inefisiensi operasional dan menjaga stabilitas layanan [2].

Studi aliran daya merupakan alat analitis utama untuk mengevaluasi profil tegangan, arus, faktor daya, jatuh tegangan, serta rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Berbagai kajian menunjukkan bahwa pendekatan ini efektif sebagai dasar perencanaan, troubleshooting, dan optimasi operasi jaringan, termasuk validasi hasil simulasi terhadap kondisi lapangan [3-5]. Intervensi teknis yang kerap diturunkan dari aliran daya mencakup rekonfigurasi jaringan dan kompensasi reaktif/penempatan kapasitor, yang terbukti menurunkan rugi daya dan memperbaiki profil tegangan, baik melalui pendekatan rekayasa konvensional maupun berbasis algoritma genetika [6-9].

PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor beroperasi di wilayah ibu kota Provinsi Kalimantan Utara, dengan karakter sebaran beban yang luas dan jarak antar beban yang relatif jauh. Pertumbuhan konsumsi listrik di kawasan ini meningkatkan kompleksitas operasi pada jaringan distribusi 20 kV, sehingga diperlukan evaluasi teknis yang komprehensif terhadap kinerja aktual jaringan.

Penelitian-penelitian terdahulu mengonfirmasi bahwa rugi daya dan jatuh tegangan dipengaruhi oleh tipe serta panjang penghantar, konfigurasi jaringan, kapasitas transformator, faktor daya, dan intensitas pemakaian di titik beban. Studi pada jaringan 20 kV di wilayah kepulauan, misalnya, menegaskan pengaruh signifikan pemilihan konduktor dan panjang saluran terhadap rugi daya [10]. Kajian lain menggunakan ETAP untuk menganalisis rugi daya/tegangan pada penyulang menunjukkan bahwa pemodelan berbasis perangkat lunak memberikan akurasi memadai untuk mendukung keputusan perbaikan operasi dan efisiensi jaringan [3-5]. Di sisi lain, optimalisasi melalui rekonfigurasi jaringan serta kompensasi reaktif secara konsisten efektif dalam mereduksi rugi-rugi dan memperbaiki tegangan [7-10].

Bertolak dari konteks dan temuan sebelumnya, penelitian ini bertujuan menganalisis rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor. Pemodelan data pembangkitan, saluran, dan beban dilakukan pada ETAP 19.0.1 Power Station untuk memperoleh parameter operasi utama (tegangan, arus, daya, jatuh tegangan, dan rugi daya) pada kondisi siang dan malam [5]. Hasilnya diharapkan menjadi landasan rekomendasi teknis guna meningkatkan efisiensi dan keandalan jaringan distribusi di Tanjung Selor, sekaligus membuka ruang integrasi monitoring cerdas dalam praktik operasi ke depan [2].

II. LANDASAN TEORI

A. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Distribusi daya dari gardu induk menuju gardu/trafo distribusi hingga pelanggan merupakan segmen sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan konsumen. Secara umum, jaringan distribusi terbagi menjadi: jaringan tegangan menengah (JTM), tiga fasa dengan tiga atau empat konduktor (tiga fasa ± netral) yang menghubungkan gardu induk ke transformator distribusi, dan jaringan tegangan rendah (JTR), jaringan sekunder dengan tegangan layanan 220/380 V. Transformator distribusi menurunkan tegangan 20 kV pada sisi primer menjadi 220/380 V pada sisi sekunder sebelum disalurkan ke pelanggan. Berdasarkan topologinya, jaringan distribusi dapat berbentuk radial, *loop*, atau kombinasi keduanya.

Perhitungan aliran daya pada jaringan ini mengevaluasi profil tegangan, arus, serta daya aktif–reaktif pada berbagai titik (bus/penyulang). Jatuh tegangan didefinisikan sebagai selisih tegangan antara sisi sumber dan sisi beban sepanjang penyulang, yang timbul akibat arus beban yang mengalir melalui impedansi saluran (komponen resistif dan reaktif). Besarnya dipengaruhi oleh parameter impedansi/admitansi, karakteristik beban, dan faktor daya sistem [11].

B. Rugi-rugi Daya

Selama proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit menuju pelanggan, baik melalui sistem transmisi maupun distribusi, selalu terjadi rugi-rugi teknis berupa rugi daya (power losses) dan rugi energi (energy losses). Rugi-rugi teknis ini terutama timbul pada penghantar saluran akibat adanya tahanan (resistansi) konduktor yang dialiri arus listrik, yang secara umum dinyatakan dengan persamaan I^2R [12].

Selain pada saluran, rugi-rugi teknis juga muncul pada peralatan listrik seperti generator, transformator, dan motor listrik, akibat adanya rugi arus eddy dan rugi histeresis pada inti besi, serta rugi tembaga pada lilitan yang dialiri arus. Rugi-rugi pada komponen pembangkit dapat diminimalkan melalui peningkatan efisiensi peralatan dan pengaturan operasi yang optimal agar konsumsi energi dapat ditekan.

Pada jaringan distribusi, rugi teknis merupakan akumulasi rugi I^2R dan rugi-rugi resistif lainnya, yang besarnya dapat dihitung apabila nilai arus beban diketahui. Kondisi beban merata atau beban konstan pada saluran akan menghasilkan rugi teknis yang lebih kecil. Rugi energi ini sering dinyatakan dalam satuan kilowatt-hour (kWh) dan secara ekonomis dapat dikonversi menjadi biaya (rupiah) yang merepresentasikan kehilangan energi pada jaringan distribusi [13].

Dalam sistem tenaga listrik, terdapat perbedaan mendasar antara daya (power) dan energi (energy). Daya merupakan hasil kali tegangan (V) dan arus (I), dengan satuan Watt (W), sedangkan energi merupakan hasil kali daya dan waktu, dengan satuan Watt-hour (Wh) atau Joule (J). Secara matematis [14], rugi-rugi daya aktif dan reaktif dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_{losses} = 3 \times I^2 \times R \times l \quad (1)$$

$$Q_{losses} = 3 \times I^2 \times X \times l \quad (2)$$

Keterangan :

- P_{losses} : Rugi-rugi Daya Aktif (Watt);
 Q_{losses} : Rugi-rugi Daya Reaktif (Var);
 I : Arus (Ampere);
 R : Tahanan Rangkaian (Ω);
 l : Panjang Penghantar (m);
 X : Reaktansi Penghantar (Ω).

C. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan selisih antara tegangan pada sisi sumber dan tegangan pada sisi beban yang terjadi akibat aliran arus listrik melalui penghantar yang memiliki impedansi. Secara matematis, jatuh tegangan dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian antara impedansi saluran (Z) dan arus beban (I) pada lintasan antara Alat Pembatas dan Pengukur (APP) hingga Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Dengan demikian, jatuh tegangan dapat diartikan pula sebagai hilangnya sebagian tegangan sepanjang jarak penghantar akibat adanya resistansi dan reaktansi saluran (15).

Secara umum, besarnya jatuh tegangan berbanding lurus dengan panjang saluran dan besarnya arus beban, serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Nilai jatuh tegangan biasanya dinyatakan dalam satuan Volt (V) atau dalam bentuk persentase (%) terhadap tegangan nominal sistem. Apabila resistansi atau impedansi penghantar meningkat, maka arus yang mengalir akan menyebabkan penurunan tegangan yang lebih besar pada sisi beban. Kondisi ini dapat mengakibatkan berkurangnya kinerja peralatan listrik dan kerugian energi akibat tegangan yang diterima lebih rendah dari nilai nominal yang diizinkan. Perhitungan jatuh tegangan (16) diformulasikan sebagaimana berikut:

$$\Delta V = |V_k - V_t| \quad (3)$$

Keterangan :

- ΔV : Jatuh tegangan (Volt);
 V_k : Tegangan kirim (Volt);
 V_t : Tegangan terima (Volt).

D. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan suatu analisis sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai distribusi aliran daya di seluruh jaringan, meliputi besar tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif pada setiap bus atau saluran. Studi ini sangat penting dalam evaluasi kinerja sistem tenaga listrik, baik pada sisi pembangkit, penyaluran, maupun pembebanan.

Analisis aliran daya digunakan untuk memeriksa kondisi operasi sistem dalam keadaan steady state (keadaan tunak), guna memastikan bahwa seluruh komponen sistem bekerja sesuai dengan batas operasi yang diizinkan. Selain itu, hasil analisis aliran daya juga menjadi dasar utama dalam berbagai studi lanjutan, seperti analisis kontingensi, stabilitas transien, analisis hubung singkat, serta perencanaan pengembangan sistem tenaga listrik di masa mendatang.

Dalam penelitian ini, perangkat lunak ETAP Power Station digunakan untuk melakukan simulasi load flow analysis pada sistem distribusi. ETAP memungkinkan pengguna untuk melakukan perhitungan numerik berbasis

metode iteratif, seperti Newton-Raphson atau Gauss-Seidel, untuk memperoleh profil tegangan, arus, dan daya pada setiap elemen sistem secara akurat [17].

Secara umum, tujuan utama dari studi aliran daya meliputi:

- Mengevaluasi pengaturan dan kestabilan tegangan pada setiap bus sistem tenaga listrik.
- Memeriksa kinerja peralatan agar aliran daya berjalan sesuai dengan kondisi operasi yang diinginkan.
- Menyediakan kondisi awal (initial condition) yang diperlukan untuk studi lanjutan, seperti studi stabilitas sistem, operasi ekonomis, analisis hubung singkat, serta perencanaan ekspansi dan pengembangan jaringan tenaga listrik.

E. Perhitungan Aliran Daya

Pada setiap gardu distribusi, dapat dilakukan perhitungan tegangan dan sudut fasa pada setiap bus, yang dikenal sebagai analisis aliran daya (power flow analysis). Hasil dari analisis ini digunakan untuk menentukan besarnya aliran daya aktif dan reaktif yang mengalir pada masing-masing saluran dan peralatan dalam sistem transmisi maupun distribusi.

Parameter utama yang digunakan dalam perhitungan aliran daya [18] adalah sebagai berikut:

- Daya aktif (real power), disimbolkan dengan P dan dinyatakan dalam satuan megawatt (MW).
- Daya reaktif (reactive power), disimbolkan dengan Q dan dinyatakan dalam satuan megavolt-ampere reactive (MVAR).
- Tegangan (voltage magnitude), disimbolkan dengan V dan dinyatakan dalam satuan kilovolt (kV).
- Sudut fasa tegangan (voltage phase angle), disimbolkan dengan δ , dinyatakan dalam satuan radian atau derajat listrik ($^{\circ}$).

Dalam sistem tenaga listrik, sudut fasa tegangan (δ) digunakan untuk menunjukkan posisi fasa suatu mesin (generator) terhadap referensi sistem. Nilai δ berkaitan langsung dengan sinkronisasi antar mesin dan stabilitas sistem. Apabila persamaan gerak dinamis mesin diselesaikan terhadap waktu, maka akan diperoleh hubungan δ sebagai fungsi waktu. Kurva hasil penyelesaiannya disebut kurva ayunan (swing curve), yang menggambarkan respons dinamis generator terhadap gangguan. Analisis terhadap kurva ayunan seluruh mesin dalam sistem dapat digunakan untuk menilai kestabilan sistem daya secara keseluruhan.

Dalam studi aliran daya, setiap bus diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan parameter yang diketahui dan yang dicari, yaitu:

1. Load Bus (PQ Bus)

Bus ini mewakili beban sistem, di mana daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui berdasarkan data beban. Sedangkan tegangan (V) dan sudut fasa (δ) merupakan variabel yang harus dihitung.

2. Generator Bus (PV Bus / Voltage Controlled Bus)

Pada bus ini, daya aktif (P) dan tegangan (V) diketahui (dikendalikan oleh sistem eksitasi generator), sedangkan daya reaktif (Q) dan sudut fasa (δ) diperoleh melalui perhitungan.

3. Slack Bus (Swing Bus / Reference Bus)

Bus ini digunakan sebagai acuan tegangan sistem, di mana tegangan (V) dan sudut fasa (δ) ditetapkan

sebagai referensi, biasanya $V=1\angle0^{\circ}V = 1\angle0^{\circ}V=1\angle0^{\circ}$. Slack bus berfungsi untuk menyeimbangkan total daya aktif dan reaktif sistem, termasuk rugi-rugi jaringan yang belum diketahui sebelum perhitungan dilakukan.

Besaran daya pada setiap bus dapat dihitung menggunakan persamaan aliran daya berikut:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Bi} - S_{Li} \quad (4)$$

Keterangan :

- S_i : Sumber daya pada bus i (VA)
 S_{Gi} : Sumber daya yang masuk kedalam bus i (VA)
 S_{Bi} : Beban yang keluar dari bus i (VA)
 S_{Li} : Beban Losses (VA)

Persamaan dalam bentuk kompleks dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$Pi = jQi(P_{Gi} + jQ_{Gi}) - (P_{Bi} + jQ_{Bi}) - (P_{Li} + jQ_{Li}) \quad (5)$$

III. METODE PENELITIAN

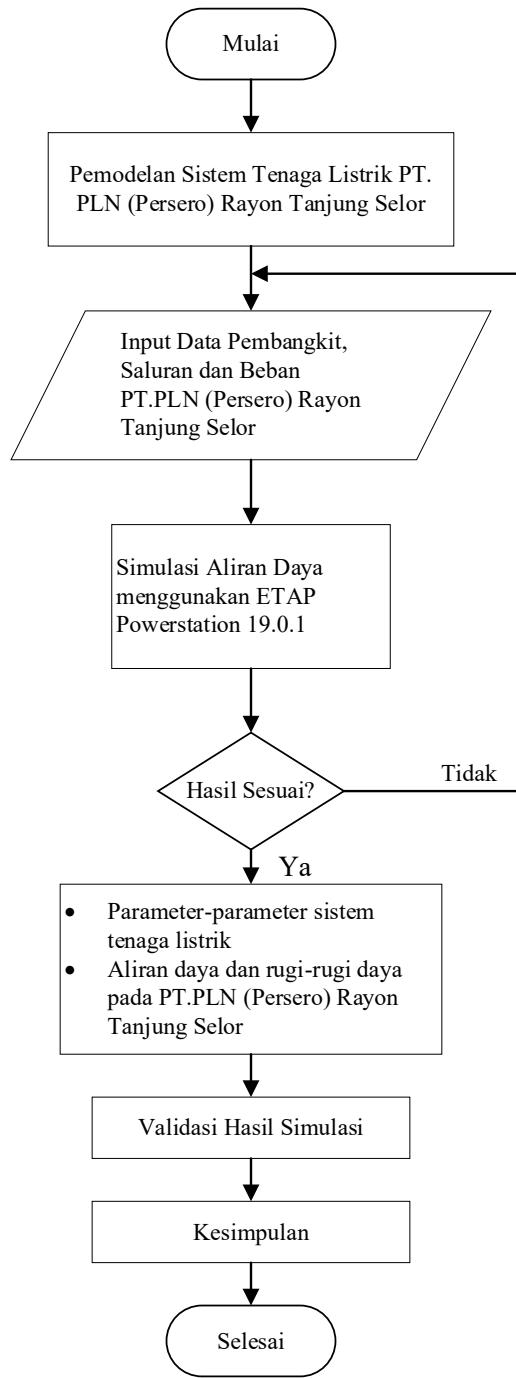
Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan prosedur penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Mengambil data dari PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor yaitu: data pembangkit, data saluran dan data beban.
- Membuat diagram segaris PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor berdasarkan data single line diagram yang didapatkan di PT. PLN.
- Memasukkan data pembangkit, data saluran dan data beban yang tersedia ke dalam *Software ETAP*.
- Melakukan simulasi aliran daya berdasarkan pada data beban dasar dan beban puncak dari PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor untuk mendapatkan parameter-parameter sistem tenaga listrik.
- Menganalisa hasil simulasi aliran daya pada kondisi beban dasar dan puncak menggunakan *Software ETAP*.
- Melakukan validasi pada hasil simulasi.
- Menghitung aliran daya dan rugi-rugi pada saluran secara manual.
- Membuat kesimpulan dari hasil penelitian.

IV. DATA SISTEM

A. Sistem Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor

Pada sistem distribusi listrik dengan tegangan 20 kV di PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor, terdapat empat pembangkit listrik yang menjadi komponen utama dalam penyediaan energi listrik di area tersebut. Dari keempat pembangkit tersebut, ada yang menggunakan mesin berbahan bakar gas sebagai sumber energi utama, ada yang menggunakan mesin uap, dan dua lainnya memanfaatkan mesin diesel. Keempat pembangkit ini dirancang agar saling mendukung untuk menjaga stabilitas pasokan listrik di wilayah operasional PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor. Namun, saat ini hanya tiga pembangkit yang beroperasi secara aktif, sementara satu lainnya berada dalam kondisi standby.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Hasil Simulasi

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem distribusi tenaga listrik pada dua kondisi beban yang berbeda, yaitu saat beban puncak siang hari (sekitar pukul 11.00 WITA) dan beban puncak malam hari (sekitar pukul 21.00 WITA). Pemilihan kedua kondisi ini didasarkan pada variasi karakteristik konsumsi energi listrik antara periode aktivitas tinggi pada siang hari dan periode beban maksimum rumah tangga pada malam hari. Analisis terhadap dua skenario ini bertujuan untuk mengamati pengaruh perubahan pola beban terhadap parameter operasional utama sistem, seperti profil tegangan, aliran daya aktif dan reaktif, serta rugi-rugi daya yang terjadi di jaringan distribusi.

Dengan melakukan perbandingan hasil simulasi pada kedua kondisi tersebut, dapat diperoleh gambaran komprehensif mengenai kinerja sistem distribusi di lapangan. Analisis ini memungkinkan identifikasi terhadap titik-titik kritis yang berpotensi mengalami penurunan tegangan berlebih maupun kerugian daya yang signifikan. Temuan dari evaluasi ini menjadi dasar penting dalam perencanaan peningkatan efisiensi dan keandalan sistem, serta dapat digunakan sebagai acuan dalam optimisasi operasi jaringan distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor.

Tabel I
Total Pembangkit dan Beban Pada Beban Siang

Daya	MW	MVar	MVA	%PF
Pembangkit (swing)	6,941	0,587	6,965	99,65
Pembangkit (non-swing)	11,682	6,250	13,249	88,17
Total beban	17,450	6,045	18,467	94,49
Total rugi-rugi daya	1,173	0,783		

Tabel II
Total Pembangkit Dan Beban Pada Beban Malam

Daya	MW	MVar	MVA	%PF
Pembangkit (swing)	7,946	0,682	7,975	99,63
Pembangkit (non-Swing)	15,031	9,300	17,675	85,04
Total beban	21,450	8,191	22,961	93,41
Total rugi-rugi daya	1,526	1,790		

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya, Tabel I dan Tabel II menyajikan data perbandingan antara total daya pembangkit, total daya beban, serta total rugi-rugi daya pada dua kondisi operasi sistem, yaitu siang hari (pukul 11.00 WITA) dan malam hari (pukul 21.00 WITA). Nilai-nilai tersebut menggambarkan karakteristik kinerja sistem distribusi pada masing-masing periode beban, yang selanjutnya digunakan untuk menganalisis tingkat efisiensi penyaluran daya pada jaringan distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Tanjung Selor.

Tabel III
Hasil Simulasi Aliran Daya (Beban Siang)

No	Keterangan Bus		Daya	
	Dari Bus	Ke Bus	MW	MVar
1.	Bus sas	Gh km 12	4,018	0,831
2.	Gh km 12	Bus sas	-4,018	-0,831
3.	Bus c brtn 2	Bus rec brtn	0,957	0,344
4.	Bus c brtn 2	Bus c brtn 1	-0,957	-0,344
5.	Bus c bgr1-2	Bus krg agung	-1,147	-0,366
6.	Bus c bgr1-2	Bus lbs bgr	1,147	0,366
7.	Bus c krg1-2	Bus lbs slmbt	-1,896	-0,610
8.	Bus c krg1-2	Bus c krg2-3	1,896	0,610

Tabel IV
Tegangan dan Sudut Tegangan (Beban Siang)

No	Keterangan Bus	Tegangan (kV)	Sudut Teg. (°)
1	Bus sas	20,833	-4,5
2	Bus cable brtn 2	18,739	-10,1
3	Bus cable bengara1-2	18,754	-8,7
4	Bus cable karangagung1-2	19,074	-8,0
5	Bus cable karangagung2-3	18,946	-8,2
6	Bus cable kasimudin1-2	19,480	-7,0
7	Bus cable kasimudin2-3	19,380	-7,3
8	Bus cable kompi1-2	19,256	-8,7

Tabel V
Jatuh Tegangan (Beban Siang)

No	Saluran	Keterangan Bus		Jatuh Teg. (%)
		Dari Bus	Ke Bus	
1	Cable128	Gardu indk	Gh km 12	0,41
2	Cable129	Gh km 12	Bus sas	2,22
3	Cable141	Gardu indk	Bus p2	0,54
4	Cable142	Gardu indk	Bus p1	0,66
5	Cable52	Gh km 12	Pltd sei b	1,24
6	Cable68	Pltd sei b	Gardu indk	1,65
7	Cable brtn	Bus c b1	Bus c b2	0,59
8	Cable-brtn1	Bus lbsk2	Bus cable.	0,40

Tabel VI
Rugi-Rugi Daya Pada Saluran (Beban Siang)

No	Saluran	Keterangan Bus		Rugi-rugi daya	
		Dari Bus	Ke Bus	kW	kVAr
1	C 128	Gardu I	Ghkm	2,09	-400,5
2	C 129	Ghkm12	Bus s	81,88	-239,3
3	C 141	Gardu I	Bus p	26,09	-40,13
4	C 142	Gardu induk	Bus p	43,73	-33,07
5	C 52	Ghkm12	Pltd	14,26	18,91
6	C 68	Pltd sei b	Gardu	86,44	114,6
7	C brtn	Bus c brtn 2	Bus b	5,86	-219,8
8	C brtn1	Bus lbskm 2	Bus b	3,32	6,42

Tabel VII
Aliran Daya (Beban Malam)

No	Keterangan Bus		Daya	
	Dari Bus	Ke Bus	mW	mVAr
1	Gh km 12	Bus sas	4,326	1,584
2	Bus csas	Gh km 12	-4,326	-1,584
3	Bus c b 2	Bus rec b	0,873	0,293
4	Bus c b 2	Bus c b 1	-0,873	-0,293
5	Bus c b 1-2	Bus k a	-0,649	-0,215
6	Bus c b1-2	Bus lbs bgr	0,649	0,215
7	Bus c k1-2	Bus lbs sb	-0,962	-0,325
8	Bus c k1-2	Bus c k2-3	0,962	0,325

Tabel VIII
Tegangan dan Sudut Tegangan (Beban Malam)

No	Keterangan Bus	Tegangan (kV)	Sudut teg. (°)
		Dari Bus	Ke Bus
1	Bus Sas	20,902	-5,4
2	bus cable	18,514	-11,3
3	bus cable bengara1-2	18,496	-9,4
4	bus cable karangagung1-2	18,670	-9,0
5	bus cable karangagung2-3	18,603	-9,1
6	bus cable kasimudin1-2	19,422	-7,9
7	bus cable kasimudin2-3	19,319	-8,2
8	bus cable kompi1-2	19,031	-9,9

Tabel IX
Jatuh Tegangan (Beban Malam)

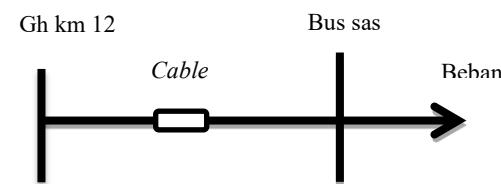
No	Saluran	Keterangan Bus		Jatuh Teg. (%)
		Dari Bus	Ke Bus	
1	C 128	Gardu I	Gh km 12	1,18
2	C 129	Gh km 12	Bus Sas	2,25
3	C 141	Gardu I	Bus T p 2.	0,55
4	C 142	Gardu I	Bus T p 1	0,75
5	C 52	Gh km 12	Pltd sei b	0,42
6	C 68	Pltd sei b	Gardu I	1,60
7	C baratan	Bus c b 1	Bus c brtn 2	0,54
8	C baratan1	Bus lbsk2	Bus c brtn 1	0,35

Tabel X
Rugi-Rugi Daya Pada Saluran (Beban Malam)

No	Saluran	Keterangan Bus		Rugi-rugi Daya	
		Dari Bus	Ke Bus	kW	kVAr
1	C 128	Gardu I	Gh km 12	16,27	-390,2
2	C 129	Gh km 12	Bus Sas	105,2	-225,7
3	C 141	Gardu I	Bus T p2.	26,41	-39,79
4	C 142	Gardu I	Bus T p1	57,32	-27,44
5	C 52	Gh km 12	Pltd sei b	6,52	8,64
6	C 68	Pltd sei b	Gardu I	85,41	113,31
7	C brtn	Bus cable.	Bus cable	4,93	-214,8
8	C-b1	Bus lbsk2	Bus cable	2,81	5,43

C. Validasi Hasil Simulasi

1) Perhitungan Aliran Daya



$$S_{21} - S_{12} - S_{L21} = 0$$

$$(P_{21} + JQ_{21}) - (P_{12} + JQ_{12}) - (P_{L21} + JQ_{21}) = 0$$

$$(4.326 + j1.584) - (4.221 + j1.810) - (105 + j225) = 0$$

2) Perhitungan Jatuh Tegangan Beban Siang

Berikut ini adalah perhitungan jatuh tegangan pada beban siang di saluran distribusi PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor:

$$\Delta V = |V_k - V_t|$$

$$\Delta V = |103,4 - 102,9| = 0,50kV$$

$$V_r = \left| \frac{V_k - V_t}{V_t} \right| \times 100\%$$

$$V_r = \left| \frac{103,4 - 102,9}{102,9} \right| \times 100\% = 0,49\%$$

Hasil perhitungan di atas menunjukkan besarnya nilai jatuh tegangan pada bagian jaringan yang dianalisis. Untuk segmen jaringan lainnya, perhitungan jatuh tegangan dilakukan dengan metode yang sama, sehingga diperoleh distribusi tegangan di seluruh sistem. Rekapitulasi hasil perhitungan untuk setiap bagian jaringan dapat dilihat pada Tabel XI.

Tabel XI
Perhitungan Jatuh Tegangan Pada Beban Siang

No	Saluran	Keterangan Bus		Jatuh tegangan			
		Dari Bus	Ke Bus	V _k (kV)	V _t (kV)	K _v	%
1	C128	G I	G k	103,4	102,9	0,5	0,4
2	C129	G k 12	B Plt	105,2	102,9	2,2	2,2
3	C141	G I	B Plt	103,9	103,4	0,5	0,5
4	C142	G I	B Plt	104,0	103,4	0,6	0,6
5	C 52	G k 12	Pltd	102,9	101,7	1,2	1,2
6	C 68	Pltd s b	G I	103,4	101,7	1,6	1,6
7	C b	Bus cb 1	B cb	93,7	94,3	0,5	0,6
8	C-b1	Bus lk2	B cb	94,3	94,7	0,4	0,4

3) Perhitungan Rugi-rugi Daya Pada Beban Siang

Berikut merupakan perhitungan rugi-rugi daya pada beban siang pada saluran distribusi PT.PLN (Persero) ULP Tanjung Selor :

$$P_{Losses} = 3 \times 13,31^2 \times 0,14 \times 6$$

$$P_{Losses} = 0,446433 \text{ kW}$$

$$Q_{Losses} = 3 \times 13,31^2 \times 0,269 \times 6$$

$$Q_{Losses} = 0,857789 \text{ kVAR}$$

Perhitungan di atas menunjukkan rugi-rugi daya pada cable lbs pimping dengan hasil $P=0,446433\text{kW}$ dan $Q=0,857789\text{kVAr}$. Metode perhitungan yang dapat diterapkan pada bagian lain, dan hasilnya dapat dilihat table XII.

Tabel XII
Perhitungan Rugi-Rugi Daya Pada Beban Siang

N o	Salur an	Keterangan Bus		Hasil Perhitungan	
		Dari Bus	Ke Bus	kW	Kvar
1	C LP	B lbsbgr	Bus lbs p	0,44	0,85
2	C52	Gh km 12	Pltd sei b	14,2	18,9
3	C68	Pltd sei buaya	G I	86,4	114,6
4	C-b1	Bus lbs km 2	Bus cb 1	3,32	6,42
5	C-b2	Bus cable	Bus rec brtn	2,67	3,54
6	C-b1	Bus krg agg	Bus cb1-2	4,01	7,76
7	C-b2	Bus c bgr1-2	Bus lbsbgr	1,86	2,47
8	C-krg2	Bus c krg1-2	Bus c krg2-3	9,87	13,1

4) Perhitungan Jatuh Tegangan Beban Malam

Berikut ini adalah perhitungan jatuh tegangan pada beban malam di saluran distribusi PT.PLN (Persero) ULP Tanjung Selor:

$$\Delta V = |103,1 - 102,0| = 1,16\text{kV}$$

$$V_r = \left| \frac{103,1 - 102,0}{102,0} \right| \times 100\% = 1,08\%$$

Perhitungan di atas menunjukkan perhitungan jatuh tegangan. Perhitungan serupa dapat diterapkan pada bagian lain dalam sistem distribusi dengan metode yang sama. Hasil lengkap dari perhitungan jatuh tegangan untuk seluruh bagian dapat dilihat pada tabel XIII.

Tabel XIII
Perhitungan Jatuh Tegangan Beban Malam

N o	Salu ran	Keterangan Bus		Jatuh Tegangan		
				ΔV		V_t
		Dari Bus	Ke Bus	V_k (kV)	V_t (kV)	k V
1	C128	G I	G k	103,1	102,0	1,1
2	C129	G k 12	B sas	104,5	102,0	2,5
3	C141	G I	B P	103,7	103,1	0,5
4	C142	G I	B P	103,9	103,1	0,7
5	C52	G k 12	Pltd	102,0	101,5	0,4
6	C68	Pltd sei b	G I	103,1	101,5	1,6
7	C b	Bus c.	B c	92,6	93,1	0,5
8	C-b1	Bus lbs 2	B c.	93,1	93,5	0,4

5) Perhitungan Rugi-rugi Daya Beban Malam

Berikut ini adalah perhitungan rugi-rugi daya pada beban malam saluran distribusi PT. PLN (Persero) ULP Tanjung Selor menggunakan Persamaan (1) dan (2) sebagai berikut:

$$P_{Losses} = 3 \times 36,266^2 \times 0,23 \times 8$$

$$P_{Losses} = 0,44800 \text{ kW}$$

$$Q_{Losses} = 3 \times 36,266^2 \times 0,300 \times 8$$

$$Q_{Losses} = 0,86633 \text{ kVAR}$$

Perhitungan di atas menunjukkan rugi-rugi daya pada cable lbs pimping dengan hasil $P=0,44800\text{kW}$ dan $Q=0,86633\text{kVAr}$. Metode yang sama digunakan untuk perhitungan pada bagian lainnya, dan hasil lengkapnya dapat dilihat pada tabel XIV.

Tabel XIV
Perhitungan Rugi-Rugi Daya Beban Malam

N o	Saluran	Keterangan Bus		Hasil Perhitungan	
		Dari Bus	Ke Bus	kW	Kva r
1	C-lbs p	Bus lbs b	Bus lbs p	0,44	0,86
2	C-b1	Bus lbs k2	Bus c brtn1	2,81	5,43
3	C-b2	Bus c b 2	Bus rec brt	2,24	2,97
4	C-b1	Bus krg agg	Bus c bg1-2	1,33	2,58
5	C-b2	Bus c ka1-2	Bus lbs bg	0,62	0,82
6	C-krgagung2	Bus c ka1-2	Bus c ka2-3	2,68	3,55
7	C-krgagung3	Bus c ka2-3	Bus krgagg	2,01	2,66
8	C-kompi1	Bus slr 2	Bus c kp1-2	35,0	46,3

D. Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan

Tabel XV
Perbandingan Jatuh Tegangan Beban Siang

N o	Saluran	ETAP		Perhitunga n		Selisih
		kV	kV	kV	%	
1	Cable128	0,41		0,50		0,09
2	Cable129	2,22		2,22		0,01
3	Cable141	0,54		0,54		0
4	Cable142	0,66		0,66		0
5	Cable52	1,24		1,24		0
6	Cable68	1,65		1,65		0,01
7	Cable brtn	0,59		0,59		0
8	Cable-brtn1	0,40		0,40		0

Tabel XVI
Perbandingan Rugi-Rugi Daya Beban Siang

N o	Salu ran	Rugi-rugi daya				Selisih	
		Hasil Simulasi		Hasil Perhitungan			
		kW	kVAR	kW	kVAR		
1	C lp	0,44	0,85	0,44	0,85	0 0	
2	C52	14,2	18,9	14,2	18,9	0 0	
3	C68	86,4	114,6	86,4	114,6	0,01 0	
4	C-b1	3,32	6,42	3,32	6,42	0,01 0,01	
5	C-b2	2,67	3,54	2,67	3,54	0 0	
6	C-b1	4,01	7,76	4,01	7,76	0 0,1	
7	C-b2	1,86	2,47	1,86	2,47	0 0	
8	C-k2	9,87	13,1	9,87	13,1	0 0	

Tabel XVII
Perbandingan Jatuh Tegangan Beban Malam

No	Saluran	ETAP		Perhitungan	Selisih
		kV	kV		
1	Cable128	1,18	1,16	0,02	
2	Cable129	2,55	2,50	0,05	
3	Cable141	0,55	0,53	0,02	
4	Cable142	0,75	0,73	0,02	
5	Cable52	0,42	0,41	0,01	
6	Cable68	1,60	1,58	0,02	
7	Cable brtn	0,54	0,58	0,04	
8	Cable-brtn1	0,35	0,37	0,02	

Tabel XVIII
Perbandingan Rugi-Rugi Daya Beban Malam

No	Salu ran	Rugi-rugi daya				Selisih	
		Hasil Simulasi		Hasil Perhitungan			
		kW	kVAR	kW	kVAR		
1	C lp	0,4	0,9	0,4	0,9	0 0	
2	C52	2,8	5,4	2,8	5,4	0 0	
3	C68	2,2	3,0	2,2	3,0	0 0	
4	C-b1	1,3	2,6	1,3	2,6	0,01 0	
5	C-b2	0,6	0,8	0,6	0,8	0 0	
6	C-b1	2,6	3,5	2,6	3,5	0 0	
7	C-b2	2,01	2,6	2,01	2,6	0 0	
8	C-k2	35,0	46,3	35,0	46,3	0 0	

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan hasil perhitungan dari simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem kelistrikan telah berhasil dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak ETAP, sesuai dengan konfigurasi sistem kelistrikan di PT.PLN (Persero) ULP Tanjung Selor.
2. Hasil simulasi menunjukkan nilai rugi-rugi daya dan penurunan tegangan terjadi. Rugi-rugi daya aktif siang sebesar 1.173 kW (6,29%) dan rugi rugi daya aktif kondisi malam hari sebesar 1.526 kW (6,64%). Untuk daya reaktif nya pada siang hari 783 kVAr (11,4%) dan kondisi malam 1.790 kVAr (17,9%). Sedangkan untuk tegangan terendah pada kondisi siang terletak pada bus simpang berau dengan nilai 18,52 kV dan pada kondisi beban malam pada bus simpang berau dengan nilai 18,39 kV. Berdasarkan SPLN tentang nilai tegangan pada kondisi beban siang dan malam masih sesuai standart.
3. Berdasarkan perbandingan yang dilakukan selisih antara hasil simulasi dan perhitungan manual tidak signifikan. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima.

REFERENSI

- [1] S. Rahmawati, A. Supriyadi, dan B. Y. Hadi, "Optimasi Jaringan Distribusi untuk Menjamin Stabilitas Sistem Tenaga Listrik," *Jurnal Elektro*, vol. 12, no. 3, pp. 45–52, Mar. 2019.
- [2] D. Santoso, R. Wibowo, dan F. N. Prabowo, "Implementasi Sistem Monitoring Cerdas untuk Efisiensi Sistem Distribusi Listrik," dalam *Proc. 2020 International Conference on Power and Energy*, Bandung, Indonesia, pp. 112–117, 2020.
- [3] Hardyudo dkk., "Analisa Rugi Daya dan Jatuh Tegangan pada Sistem Kelistrikan PT Pertamina Ledok untuk Meningkatkan Keandalan Sistem," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 3, Surabaya: Universitas Negeri Surabaya, 2021.
- [4] Nirwana, Dewi, dkk., "Analisis Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi Penyulang Jentak di ULP Jeneponto PT PLN (Persero) Sulselrabar," *Jurnal Logika Technology*, Universitas Muslim Indonesia, 2020.
- [5] R. W. Pratiwi dan Haurissa, "Analisa Rugi Daya Berbasis ETAP pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Ahuru," *Jurnal Elektronikal dan Komputer*, vol. 4, no. 1, Ambon: Politeknik Negeri Ambon, 2020.
- [6] P. Julianto dan Fitriani, "Modified Genetic Algorithm for Capacitive Compensation in Radial Distribution Systems," dalam *Proc. 11th Int. Conf. on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 2024, pp. 659–665.
- [7] P. Julianto, "Rekonfigurasi Jaringan pada Sistem Distribusi Radial untuk Mereduksi Rugi-rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika Adaptif," *Jurnal Elektrika Borneo*, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2023.
- [8] P. Julianto, "Kompensasi Kapasitif dengan Injeksi Daya Reaktif untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Aktif pada Sistem Distribusi Skala Besar," *Jurnal Elektrika Borneo*, vol. 9, no. 2, pp. 36–43, 2023.
- [9] P. Julianto dan R. C. J. Manapa, "Rekonfigurasi Jaringan untuk Mereduksi Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Daya pada Sistem Distribusi 20 kV PT PLN Tarakan," *Buletin Profesi Insinyur*, vol. 7, no. 2, pp. 94–100, 2024.
- [10] Pilat dkk., "Analisa Rugi-rugi Daya pada Saluran Distribusi 20 kV di Kabupaten Kepulauan Sangihe," *Jurnal Teknik Elektro Manado*, Universitas Sam Ratulangi Manado, 2020.
- [11] Syufrijal Readysal Monantun, S. R. (2014). Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Paket Keahlian Teknik Ketenagalistrikan. *Kementerian Pendidikan Dasar Menengah Dan Kebudayaan Republik Indonesia*.
- [12] Sumardi, P. J. (2018). Analisa Aliran Daya Pada Jaringan Distribusi 20 KV PT. PLN (Persero) Sebatik Menggunakan Software Etap Powerstation 12.6. 0. *Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)*, 4(1).
- [13] Nizar, A., & Suprianto, B. (2021). Analisis Rugi Daya Menggunakan ETAP pada Jaringan Distribusi 20KV Penyulang Bagong. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(1), 195–201.
- [14] Janis, V., Tuegeh, M., Lisi, F., & Tumaliang, H. (2013). Perencanaan Sistem Distribusi 20 KV Siau Tahun 2020. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 2(1).
- [15] Pratama, D. I., Cahayahati, I., & Elektro, J. T. (2022). Analisa Drop Tegangan dan Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Tegangan Menengah 20kV Gardu Induk Sungai Penuh Menggunakan Aplikasi ETAP 12.6.0.
- [16] SPLN 72-1987. Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah(JTM) Dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara Jakarta.
- [17] Reddy, D.S dan C.S Kumari 2017. *Transient Stability Analysis Of A Combined Cycle Power Plant Using ETAP Software*. IEEE 7th International Advance Computing Conference: 510-115.
- [18] Hyusman, L.M., T Hidayat, C. Saleh, I.M. Wartana dan T. Herbasuki, 2017 *Pelatihan Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) Industri Inoyatif*. 7(1):7-11|