

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA DAN JATUH TEGANGAN PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV GARDU INDUK PANDEAN LAMPER-PUDAK PAYUNG

Ulfah Khoirunnisa¹⁾, Budi Bayu Murti^{2)*}, Maun Budiyanto³⁾

^{1,2),3)}Depertemen Teknik Elektro dan Informatika

^{1,2),3)} Sekolah Vokasi UGM

^{1,2),3)} Universitas Gadjah Mada

*Corresponding Author E-mail: budibm@ugm.ac.id

Abstract

The need for electrical energy now extends to remote areas. According to KESDM, the number of household and industrial customers in Central Java and DIY increased from 2020 to 2022. To maintain system balance and accommodate the increasing load, power distribution efficiency is required. At the transmission stage, electrical energy is transferred on a large scale from the power plant to the substation through a 150 kV SUTT. During the distribution of energy, power losses and voltage drops often occur, which are influenced by transmission distance, conductor cross-sectional area, conductor resistance, and load. To ensure that power losses and voltage drops remain below 5% according to SPLN No. 72 of 1987, it is necessary to evaluate whether the transmission load of the Pandean Lamper-Pudak Payung Substation is in accordance with the capabilities of the 1xACSR 240/40 conductor. The research method uses voltage and current data at peak load which is analyzed by manual calculation and ETAP 19.0.1 simulation. The results of the percentage comparison of manual calculation and simulation of power losses and voltage drops are between 0.5%-1%. The largest power loss occurred on January 15, 2024 amounting to 543 kW from manual calculation and 563.5 kW from simulation results. The percentage value of power losses reached 5.66%, which exceeded the SPLN limit. The highest voltage drops of 2.01% occurred on the same date. Based on this value, the Pandean Lamper-Pudak Payung Substation transmission line has reached its maximum load and it is necessary to increase transmission capacity by adding conductors.

Keywords: Transmission Line, Power Losses, Voltage Drop, ETAP 19.0.1

Abstrak

Kebutuhan energi listrik kini meluas hingga daerah terpencil. Menurut KESDM, jumlah pelanggan rumah tangga dan industri di Jawa Tengah dan DIY meningkat dari 2020 hingga 2022. Untuk menjaga keseimbangan sistem dan mengakomodasi peningkatan beban maka diperlukan efisiensi penyaluran daya. Pada tahap transmisi, energi listrik dipindahkan dalam skala besar dari pembangkit ke gardu induk melalui SUTT 150 kV. Selama penyaluran energi tersebut sering terjadi kehilangan daya dan penurunan tegangan yang dipengaruhi oleh jarak transmisi, luas penampang konduktor, resistansi konduktor, dan beban. Untuk memastikan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan tetap di bawah 5% sesuai Permen ESDM No. 20 Tahun 2020 maka diperlukan evaluasi apakah beban transmisi Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung sudah sesuai dengan kemampuan konduktor 1xACSR 240/40. Metode penelitian menggunakan data tegangan dan arus saat beban puncak yang dianalisis dengan perhitungan manual dan simulasi ETAP 19.0.1. Hasil persentase galat antara perhitungan manual dan simulasi di antara 0,5%-1%. Rugi-rugi daya terbesar terjadi pada tanggal 15 Januari 2024 sebesar 543 kW dari hasil perhitungan manual dan 563,5 kW dari hasil simulasi. Persentase nilai rugi-rugi daya mencapai 5,66%, di mana nilai tersebut sudah melebihi batas SPLN. Jatuh tegangan tertinggi sebesar 2,01% terjadi pada tanggal yang sama. Berdasarkan nilai tersebut maka SUTT 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung telah mencapai beban maksimal dan perlu dilakukan peningkatan kapasitas transmisi dengan cara penambahan konduktor

Kata Kunci: Saluran Transmisi, Rugi-Rugi Daya, Jatuh Tegangan, ETAP 19.0.1

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik saat ini tidak hanya terbatas pada masyarakat perkotaan, tetapi juga merambah ke daerah terpencil. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

(KESDM), pada tahun 2022 jumlah pelanggan rumah tangga di Jawa Tengah dan DIY mencapai 11.804.460, sementara jumlah pelanggan industri sebesar 15.684. Angka ini meningkat jika dibandingkan dengan tahun 2020, di mana jumlah pelanggan rumah tangga sebesar 11.107.710 dan jumlah pelanggan industri sebesar 12.715. Untuk memenuhi kebutuhan listrik di seluruh daerah maka diperlukan pemerataan pemakaian listrik agar sistem tetap seimbang. Selain itu, sistem juga harus mampu mengimbangi perubahan beban yang terus meningkat. Kondisi ini menyebabkan pasokan daya listrik harus terjaga dan tercukupi untuk melayani seluruh beban yang tersebar di berbagai lokasi. Daya listrik harus dikirim seefisien mungkin, artinya energi yang dihasilkan dapat disalurkan secara optimal kepada konsumen tanpa kehilangan energi dalam sistem jaringan maupun komponen pada gardu induk [1]

Sistem penyaluran tenaga listrik terdiri dari tiga tahapan yaitu pembangkit, transmisi, dan distribusi. Pada tahap pembangkit, listrik dihasilkan oleh generator. Pada tahap transmisi, listrik dipindahkan dalam skala besar melalui Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV. Di gardu induk, tegangan tinggi diturunkan ke tegangan menengah 70kV. Pada tahap distribusi, listrik dari gardu induk disalurkan melalui jaringan distribusi tegangan menengah dan rendah ke konsumen akhir, seperti rumah tangga, industri, dan fasilitas komersial [2].

Dalam perjalanan penyaluran energi listrik pasti terjadi kehilangan daya dan penurunan tegangan. Faktor-faktor seperti jarak transmisi, luas penampang konduktor, resistansi konduktor, dan beban yang memengaruhi fenomena tersebut. Pada penelitian ini, untuk mencari nilai rugi-rugi daya dan jatuh tegangan akan dibatasi hanya berdasarkan faktor resistansi dan mengabaikan faktor lainnya. Beban yang disalurkan pada SUTT 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung perlu dievaluasi karena semakin tinggi beban akan menyebabkan arus yang mengalir dalam konduktor semakin besar yang dapat menyebabkan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan semakin besar. Rugi-rugi daya dan jatuh tegangan terjadi ketika daya dan tegangan yang dikirim dari gardu induk satu ke gardu induk lainnya mengalami penurunan sehingga terdapat selisih antara nilai yang dikirim dan nilai yang diterima.

Mengantisipasi adanya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan seiring bertambahnya beban merupakan langkah krusial yang harus diperhatikan oleh PT PLN (Persero) untuk memastikan agar sistem berada dalam batas yang wajar. Berdasarkan ketentuan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) No. 20 Tahun 2020, nilai rugi-rugi daya dan jatuh tegangan harus tetap berada di bawah batas standar yang ditetapkan, yaitu 5% untuk menjaga keandalan sistem kelistrikan. Untuk memperoleh nilai rugi-rugi daya dan jatuh tegangan di gardu induk terima, Gardu Induk Pandean Lamper 150 kV dilakukan melalui perhitungan manual dan simulasi menggunakan ETAP 19.0.1.

Electric Transient Analysis Program (ETAP) adalah software yang mendukung berbagai aspek operasi sistem tenaga listrik. Dengan kemampuannya ETAP mampu menganalisis pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi, dan distribusi. Dari single line diagram yang disimulasikan melalui ETAP dapat diketahui nilai jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung, serta dapat diketahui pula keakuratan perbandingan antara hasil perhitungan dan hasil simulasi ETAP.

2. METODOLOGI

Tahapan yang dilalui dalam penelitian, pembangunan konsep, atau penyelesaian kasus, dituliskan pada bagian metodologi.

2.1 Pengambilan Data

Untuk menunjang penelitian terkait rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran transmisi 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung maka dilakukan pengambilan data terkait konduktor yang digunakan. Hal ini mencakup identifikasi jenis dan spesifikasi konduktor serta pengukuran resistansinya. Selanjutnya, data beban konduktor dari mulai arus per fasa, daya, dan juga tegangan terima pada berbagai kondisi operasional selama satu bulan.

Perhitungan

Untuk menentukan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan dilakukan perhitungan sebagai berikut:

- 1) Melakukan perhitungan nilai resistansi total dari konduktor dengan menggunakan rumus

berikut:

$$R_{TOTAL} = R \cdot l \quad (1)$$

- 2) Menghitung rugi-rugi daya pada satu fasa dan tiga fasa dengan menggunakan rumus berikut:

$$P_{LOSSES\ 1\phi} = I^2 \times R_{TOTAL} \quad (2)$$

$$P_{LOSSES\ 3\phi} = P_{LOSSES\ R} + P_{LOSSES\ S} + P_{LOSSES\ T} \quad (3)$$

- 3) Menentukan nilai daya semua, $\cos \phi$, dan $\sin \phi$ untuk melakukan perhitungan jatuh tegangan dengan menggunakan rumus segitiga daya sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{MW}{MVA} \quad (5)$$

$$\sin \phi = \frac{Q}{S} = \frac{MVAR}{MVA} \quad (6)$$

- 4) Menghitung jatuh tegangan antara sisi kirim dan terima dengan menggunakan rumus berikut:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot L (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi) \quad (7)$$

2.2 Simulasi Software ETAP 19.0.1

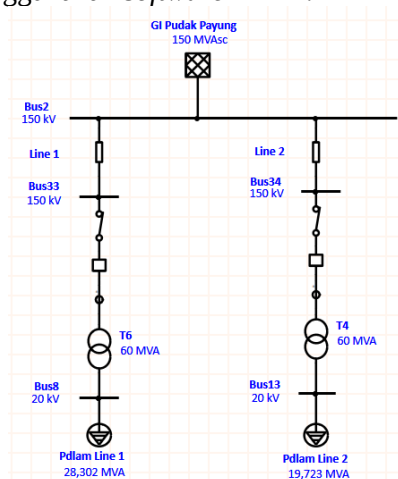
Selain menggunakan perhitungan manual, rugi-rugi daya dan jatuh tegangan juga dapat diketahui melalui simulasi aliran daya pada *software* ETAP. Simulasi berisi SLD dari saluran transmisi Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung yang memiliki nilai atau spesifikasi tertentu sesuai dengan peralatan yang digunakan.

2.3 Analisis Hasil

Tahap ini dilakukan untuk membandingkan hasil antara perhitungan manual dengan hasil simulasi aliran daya melalui ETAP.

2.4 Single Line Diagram

Berdasarkan SLD di atas maka dapat dibuat pada *software* ETAP untuk mengetahui aliran daya Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung. Pembuatan SLD pada *software* ETAP memperhatikan nilai dan parameter komponen gardu induk dari data yang telah didapatkan di lapangan. Berikut gambar 1 adalah hasil SLD menggunakan *software* ETAP.



Gambar 1. SLD software ETAP

Dalam pembuatan SLD penting untuk memperhatikan parameter nilai yang digunakan sesuai dengan data lapangan. Langkah pertama dalam pembuatan SLD adalah menentukan unit sistem yang mencakup berapa nilai frekuensi yang akan digunakan. Di Indonesia, dalam penyaluran sistem tenaga listrik menggunakan frekuensi sebesar 50 Hz. Frekuensi tersebut berdasarkan standar yang telah ditetapkan PT PLN (Persero).

Selanjutnya, menentukan parameter untuk komponen konduktor yang digunakan. Saluran transmisi Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung menggunakan jenis SUTT. Jenis konduktor yang

digunakan adalah ACSR 240/40 dengan panjang sebesar 14,516 km. Gambar 2 adalah jenis konduktor yang dipilih dan gambar 3 adalah nilai panjang konduktor yang dimasukkan.

SPLN	Overhead	50 Hz	Code :	
None	100 %	150 kV	1/C AL	240 mm²

Gambar 2. Jenis konduktor

Length	Length	14,516	km
Tolerance	0	%	

Gambar 2. Parameter Panjang Konduktor

Selain itu, parameter beban juga menjadi hal utama yang diperhatikan untuk melihat rugi-rugi daya dan jatuh tegangan dari aliran daya. Dengan memasukkan nilai daya sesuai dengan tabel data beban konduktor yang telah diobservasi selama satu bulan. Nilai beban bervariasi bergantung pada arus yang mengalir maupun kondisi beban pada saat itu. Berikut gambar 4 untuk memasukkan nilai beban konduktor.

MVA	MW	Mvar	% PF	Amp
30	25,5	15,803	85	866

Gambar 3. Parameter Beban

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perhitungan Manual Rugi-Rugi Daya

Untuk menentukan resistansi total sepanjang saluran Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung menggunakan persamaan 1.

$$R_{TOTAL} = 0,137 \, \Omega/\text{km} \times 14,516 \, \text{km} = 1,98 \, \Omega$$

Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung memiliki nilai resistansi total 1,98 Ω sepanjang saluran 14,516 km. Berdasarkan persamaan di atas, resistansi konduktor berbanding lurus dengan panjang saluran (l). Saat arus listrik mengalir melalui konduktor maka sebagian energi akan hilang dalam bentuk panas sebagai akibat dari resistansi konduktor. Semakin panjang salurannya maka semakin tinggi resistansinya. Semakin jauh jarak antara kedua gardu induk maka semakin besar pula nilai resistansinya.

3.2 Pandean Lamper-Pudak Payung Line 1

Setelah nilai resistansi total saluran diperoleh, perhitungan manual dapat dilakukan untuk menentukan rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya dihitung berdasarkan arus yang mengalir pada setiap fasanya. Total rugi-rugi daya per fasa kemudian diakumulasikan untuk mencari rugi-rugi daya harian selama satu bulan menggunakan persamaan 2 untuk satu fasa dan persamaan 23 untuk tiga fasa. Berikut adalah contoh perhitungan untuk beban puncak pada *line* 1 tanggal 15 Januari 2024 pukul 10.00 WIB.

$$\begin{aligned} P_{LOSSES \, 1\phi} &= 307^2 \times 1,98 \, \Omega = 186.613,02 \, \text{W} \\ &= 264 \times 1,98 \, \Omega = 137.998 \, \text{W} \\ &= 290^2 \times 1,98 \, \Omega = 166.518 \, \text{W} \end{aligned}$$

$$P_{\text{LOSSES } 3\phi} = 186.613,02 \text{ W} + 137.998 \text{ W} + 166.518 \text{ W} = 491.129,10 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi \%} &= \frac{P_{\text{LOSSES } 3\phi}}{580.150} \times 100\% \\ &= \frac{491.129,10}{87000} \times 100\% = 5,6\% \end{aligned}$$

Tabel 1. Hasil Perhitungan PLOSSES Line 1 Pukul 10.00 WIB

TANGGAL	I _R (A)	I _S (A)	I _T (A)	MW	MVAR	kV	MVA	P _{LOSSES R} (W)	P _{LOSSES S} (W)	P _{LOSSES T} (W)	P _{LOSSES 3φ} (W)	Losses(%)
Senin, 01 Januari 2024	122	100	113	21	14	147	25,24	29.600	19.887	25.394	74.880	0,86
Selasa, 02 Januari 2024	85	64	77	7	15	147	16,55	14.368	8.146	11.791	34.305	0,39
Rabu, 03 Januari 2024	67	49	60	7	11	149	13,04	8.927	4.775	7.159	20.861	0,24
Kamis, 04 Januari 2024	76	56	66	6	14	151	15,23	11.487	6.237	8.663	26.386	0,30
Jumat, 05 Januari 2024	120	96	109	11	22	148	24,60	28.637	18.328	23.628	70.593	0,81
Sabtu, 06 Januari 2024	112	91	102	12	20	148	23,32	24.946	16.468	20.690	62.105	0,71
Minggu, 07 Januari 2024	90	71	83	12	14	148	18,44	16.108	10.025	13.700	39.834	0,46
Senin, 08 Januari 2024	52	34	47	9	8	150	12,04	5.377	2.299	4.393	12.069	0,14
Selasa, 09 Januari 2024	72	60	68	3	17	149	17,26	10.309	7.159	9.196	26.664	0,31
Rabu, 10 Januari 2024	52	37	44	2	10	150	10,20	5.377	2.723	3.850	11.950	0,14
Kamis, 11 Januari 2024	80	60	72	11	12	151	16,28	12.728	7.159	10.309	30.196	0,35
Jumat, 12 Januari 2024	106	84	97	17	13	147	21,40	22.345	14.032	18.712	55.089	0,63
Sabtu, 13 Januari 2024	81	60	72	6	15	149	16,16	13.048	7.159	10.309	30.516	0,35
Minggu, 14 Januari 2024	127	110	118	21	17	149	27,02	32.076	24.063	27.691	83.829	0,96
Senin, 15 Januari 2024	307	264	290	60	23	148	64,26	187.432	138.604	167.249	493.285	5,67
Selasa, 16 Januari 2024	114	92	104	14	19	148	23,60	25.845	16.832	21.510	64.187	0,74
Rabu, 17 Januari 2024	156	136	148	28	24	148	36,88	48.397	36.783	43.560	128.740	1,48
Kamis, 18 Januari 2024	102	81	94	9	19	148	21,02	20.690	13.048	17.572	51.310	0,59
Jumat, 19 Januari 2024	124	100	115	22	13	149	25,55	30.578	19.887	26.300	76.765	0,88
Sabtu, 20 Januari 2024	151	128	143	31	11	149	32,89	45.344	32.583	40.667	118.594	1,36
Minggu, 21 Januari 2024	144	123	136	30	7	150	30,81	41.238	30.087	36.783	108.107	1,24
Senin, 22 Januari 2024	92	72	83	15	11	148	18,60	16.832	10.309	13.700	40.842	0,47
Selasa, 23 Januari 2024	90	70	82	17	9	150	19,24	16.108	9.745	13.372	39.225	0,45
Rabu, 24 Januari 2024	100	77	92	16	13	150	20,62	19.887	11.791	16.832	48.510	0,56
Kamis, 25 Januari 2024	105	83	95	16	14	150	21,26	21.925	13.700	17.948	53.573	0,62
Jumat, 26 Januari 2024	95	72	85	11	16	150	19,42	17.948	10.309	14.368	42.626	0,49
Sabtu, 27 Januari 2024	81	58	72	8	14	150	16,12	13.048	6.690	10.309	30.047	0,35
Minggu, 28 Januari 2024	108	88	103	22	6	150	22,80	23.196	15.400	21.098	59.695	0,69
Senin, 29 Januari 2024	81	58	72	10	12	148	15,62	13.048	6.690	10.309	30.047	0,35
Selasa, 30 Januari 2024	90	68	83	16	10	150	18,87	16.108	9.196	13.700	39.004	0,45
Rabu, 31 Januari 2024	69	48	61	9	10	150	13,45	9.468	4.582	7.400	21.450	0,25
Total							0,00	802.427	534.696	688.163	2.025.286	23,28

Tabel 1 merupakan hasil inspeksi harian terhadap beban puncak Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung *line* 1 pada pukul 10.00 WIB selama bulan Januari. Parameter yang diamati adalah arus perfasa, daya aktif, daya reaktif, dan juga tegangan terima dari gardu induk lawan. Nilai daya semu didapatkan berdasarkan persamaan 2.5. Berikut adalah contoh perhitungan untuk mencari nilai daya semu pada *line* 1 tanggal 15 Januari 2024 pukul 10.00 WIB.

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= \sqrt{60^2 + 23^2} \\ &= 64,2 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Hasil rugi-rugi daya tertinggi pada *line* 1 saat pukul 10.00 WIB terjadi pada tanggal 15 Januari 2024, sebesar 493.285 W. Hal ini dikarenakan arus yang mengalir pada fasa R sangat tinggi mencapai 307 A. Ketika arus melewati konduktor dengan resistansi yang tinggi maka akan terjadi peningkatan rugi-rugi daya. Nilai arus yang tinggi menyebabkan resistansi juga meningkat. Oleh karena itu, arus yang tinggi pada fasa R dapat dikaitkan langsung dengan hasil rugi-rugi daya yang tinggi pada saat itu. Selain itu, saat terjadi rugi-rugi daya tertinggi juga dapat menghasilkan nilai daya aktif dan daya reaktif yang paling besar yaitu mencapai 60 MW dan 23 MVAR. Untuk memindahkan daya membutuhkan arus yang sebanding dengan daya dan berlawanan dengan tegangan. Oleh karena itu, semakin banyak daya yang dipindahkan maka semakin banyak arus yang diperlukan.

Sedangkan hasil rugi-rugi daya terendah pada *line* 1 saat pukul 10.00 WIB terjadi pada tanggal 10 Januari 2024, sebesar 12.069 W. Pada saat itu arus yang mengalir relatif kecil hanya sebesar 34 A pada fasa R. Arus yang kecil mengakibatkan berkurangnya nilai resistansi dalam konduktor yang menyebabkan minimnya konversi energi listrik menjadi energi panas. Dengan demikian, nilai rugi-rugi daya menjadi sangat rendah. Keadaan ini mencerminkan kinerja efisien dalam sistem transmisi listrik pada saat tersebut, di mana sebagian besar energi listrik berhasil ditransmisikan tanpa perubahan yang signifikan. Selain itu, rugi-rugi daya yang kecil menghasilkan nilai daya yang kecil pula hanya sebesar 2 MW dan 10 MVAR.

Rugi-rugi daya dari tabel di atas memiliki nilai yang bervariasi berdasarkan pola penggunaan listrik. Rata-rata rugi-rugi daya pada hari kerja (Senin sampai Jumat) lebih kecil dibandingkan dengan rata-rata rugi-rugi daya pada akhir pekan (Sabtu dan Minggu). Rata-rata rugi-rugi daya akhir pekan sebesar 66 kW dan hari kerja sebesar 62 kW. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui beberapa faktor. Pertama, dari faktor pola konsumsi listrik. Pola konsumsi listrik pada hari kerja cenderung lebih stabil dan merata karena sebagian besar aktivitas industri, komersial, dan perkantoran beroperasi pada waktu yang sama. Keadaan yang stabil tersebut mengurangi variasi arus dan tegangan sehingga dapat mengurangi kerugian daya. Sebaliknya, pola konsumsi listrik pada akhir pekan lebih bervariasi dan tidak menentu karena perubahan aktivitas rumah tangga serta berkurangnya operasi industri dan komersial. Variasi ini menyebabkan fluktuasi arus dan tegangan yang lebih besar dan menyebabkan peningkatan kerugian daya.

Kedua, dari faktor beban puncak. Beban puncak pada hari kerja lebih terprediksi dibandingkan dengan akhir pekan. Pada hari kerja terdapat beban puncak seperti pagi dan sore hari yang lebih terprediksi. Sebaliknya, beban puncak pada akhir pekan sering terjadi pada waktu yang tidak terduga, seperti pada malam hari ketika orang-orang berada di rumah. Hal ini dapat menyebabkan kenaikan arus dan meningkatkan rugi-rugi daya.

Ketiga, dari faktor karakteristik beban. Beban industri dan komersial yang dominan pada hari kerja biasanya memiliki faktor daya yang lebih baik karena penggunaan perangkat kompensasi seperti kapasitor bank untuk membantu mengurangi rugi-rugi daya. Sebaliknya, beban rumah tangga pada akhir pekan cenderung memiliki faktor daya yang lebih rendah dan menghasilkan arus harmonik yang lebih tinggi yang akan berkontribusi terhadap peningkatan rugi-rugi daya.

Tabel 2 merupakan hasil inspeksi harian terhadap beban puncak Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung *line* 1 pada pukul 19.00 WIB selama bulan Januari. Parameter yang diamati adalah arus perfasa, daya aktif, daya reaktif, dan juga tegangan terima dari gardu induk lawan. Rugi-rugi daya tertinggi pada *line* 1 saat pukul 19.00 WIB terjadi pada tanggal 18 Januari 2024, mencapai 340.500 W. Hal ini disebabkan oleh arus yang sangat tinggi yang mencapai 253 A pada fasa R. Akibatnya, daya aktif dan daya reaktif yang berhasil ditransmisikan mencapai puncaknya yaitu 49 MW dan 27 MVAR. Nilai ini merupakan nilai tertinggi dalam bulan Januari pada *line* 1 saat pukul 19.00 WIB. Sedangkan rugi-rugi daya terendah pada *line* 1 saat pukul 19.00 WIB terjadi pada tanggal 8 Januari 2024, sebesar 11.513 W. Hal ini disebabkan oleh arus yang mengalir pada saat itu relatif kecil hanya sebesar 37 A pada fasa S. Akibatnya, daya aktif dan daya reaktif yang berhasil ditransmisikan juga kecil hanya sebesar 9 MW dan 3 MVAR.

Tabel 2. Hasil Perhitungan PLOSSES Line 1 Pukul 19.00 WIB

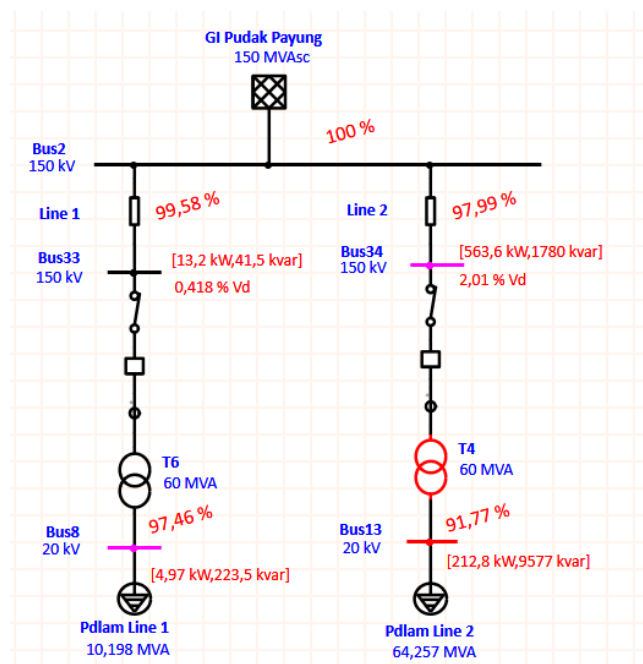
Tanggal	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	MW	MVAR	kV	MVA	$P_{LOSSES R}$ (W)	$P_{LOSSES S}$ (W)	$P_{LOSSES T}$ (W)	$P_{LOSSES 3\phi}$ (W)	Losses (%)
Senin, 01 Januari 2024	100	79	99	19	15	150	24,21	19.887	12.411	19.491	51.790	0,60
Selasa, 02 Januari 2024	58	40	51	5	10	152	11,18	6.690	3.182	5.173	15.044	0,17
Rabu, 03 Januari 2024	100	79	91	2	21	154	21,10	19.887	12.411	16.468	48.767	0,56
Kamis, 04 Januari 2024	96	75	87	9	17	152	19,24	18.328	11.186	15.052	44.567	0,51
Jumat, 05 Januari 2024	70	53	63	4	14	152	14,56	9.745	5.586	7.893	23.224	0,27
Sabtu, 06 Januari 2024	84	74	82	9	15	152	17,49	14.032	10.890	13.372	38.294	0,44
Minggu, 07 Januari 2024	79	63	71	1	17	152	17,03	12.411	7.893	10.025	30.330	0,35
Senin, 08 Januari 2024	48	37	46	9	3	151	9,49	4.582	2.723	4.208	11.513	0,13
Selasa, 09 Januari 2024	88	68	81	9	16	149	18,36	15.400	9.196	13.048	37.644	0,43
Rabu, 10 Januari 2024	108	88	98	3	22	151	22,20	23.196	15.400	19.099	57.696	0,66
Kamis, 11 Januari 2024	112	96	100	17	16	154	23,35	24.946	18.328	19.887	63.161	0,73
Jumat, 12 Januari 2024	105	85	93	5	21	153	21,59	21.925	14.368	17.200	53.494	0,61
Sabtu, 13 Januari 2024	83	63	75	5	16	149	16,76	13.700	7.893	11.186	32.780	0,38
Minggu, 14 Januari 2024	99	90	91	18	15	149	23,43	19.491	16.108	16.468	52.068	0,60
Senin, 15 Januari 2024	87	68	78	17	6	150	18,03	15.052	9.196	12.099	36.347	0,42
Selasa, 16 Januari 2024	107	87	100	21	9	152	22,85	22.769	15.052	19.887	57.708	0,66
Rabu, 17 Januari 2024	103	83	97	21	7	152	22,14	21.098	13.700	18.712	53.510	0,62
Kamis, 18 Januari 2024	253	228	235	49	27	150	55,95	127.294	103.380	109.826	340.500	3,91
Jumat, 19 Januari 2024	98	91	108	24	9	149	25,63	19.099	16.468	23.196	58.764	0,68
Sabtu, 20 Januari 2024	136	112	129	21	20	148	29,00	36.783	24.946	33.094	94.823	1,09
Minggu, 21 Januari 2024	91	74	85	18	6	149	18,97	16.468	10.890	14.368	41.727	0,48
Senin, 22 Januari 2024	91	72	83	11	15	150	18,60	16.468	10.309	13.700	40.478	0,47
Selasa, 23 Januari 2024	76	56	66	7	13	150	14,76	11.487	6.237	8.663	26.386	0,30
Rabu, 24 Januari 2024	91	70	82	9	16	150	18,36	16.468	9.745	13.372	39.585	0,45
Kamis, 25 Januari 2024	86	65	78	12	16	150	20,00	14.708	8.402	12.099	35.210	0,40
Jumat, 26 Januari 2024	90	73	82	11	15	154	18,60	16.108	10.598	13.372	40.078	0,46
Sabtu, 27 Januari 2024	78	57	66	2	15	150	15,13	12.099	6.461	8.663	27.223	0,31
Minggu, 28 Januari 2024	98	91	108	24	9	149	25,63	19.099	16.468	23.196	58.764	0,68
Senin, 29 Januari 2024	37	40	48	1	11	151	11,05	2.723	3.182	4.582	10.486	0,12
Selasa, 30 Januari 2024	91	71	84	16	10	148	18,87	16.468	10.025	14.032	40.526	0,47
Rabu, 31 Januari 2024	92	71	84	11	15	151	18,60	16.832	10.025	14.032	40.889	0,47
Total								625.247	432.662	545.464	1.603.373	

Rugi-rugi daya dari tabel di atas memiliki nilai yang bervariasi berdasarkan pola penggunaan listrik. Rata-rata rugi-rugi daya pada hari kerja (Senin sampai Jumat) lebih kecil dibandingkan dengan rata-rata rugi-rugi daya pada akhir pekan (Sabtu dan Minggu), dengan rata-rata rugi-rugi daya akhir pekan sebesar 42 kW dan hari kerja sebesar 19 kW. Tren ini sama dengan *line 1* saat pukul 10.00 WIB, di mana rugi-rugi daya akhir pekan akan lebih tinggi dibandingkan dengan hari kerja. Selain itu, rugi-rugi daya transmisi pada malam hari cenderung lebih kecil daripada siang hari karena adanya beberapa faktor yang memengaruhinya. Salah satunya adalah penurunan beban listrik secara keseluruhan pada malam hari terutama di daerah perkotaan. Beban listrik di daerah perkotaan pada malam hari, khususnya aktivitas yang berkaitan dengan industri dan komersial cenderung menurun dibandingkan dengan siang hari. Hal ini dapat mengakibatkan berkurangnya arus yang mengalir dalam sistem transmisi.

Berdasarkan hasil perhitungan manual dari tabel 1 dan tabel 2 dapat diketahui bahwa rugi-rugi daya dalam *line 1* pada saat beban puncak, baik pada pukul 10.00 WIB maupun pukul 19.00 WIB sudah melebihi batas SPLN yang ditetapkan, yaitu sebesar 5,6% pada tanggal 15 Januari 2024. Hal ini menunjukkan bahwa beban maksimal yang diizinkan untuk mencegah terjadinya rugi-rugi daya seharusnya berada di bawah angka tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan penyesuaian terhadap beban listrik agar tetap berada dalam batas yang diizinkan agar sistem tetap beroperasi secara efisien dan menghindari kerugian daya yang signifikan.

3.3 Hasil Simulasi Rugi-Rugi Daya

Setelah melakukan perhitungan manual untuk rugi-rugi daya saluran transmisi 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper–Pudak Payung maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi menggunakan *software* ETAP untuk memvalidasi dan menguji keakuratan perhitungan tersebut. Hasil simulasi akan memberikan gambaran yang lebih mendalam tentang keadaan sebenarnya dari saluran transmisi yang diuji dengan mempertimbangkan lebih banyak variabel dan detail yang tidak tercakup dalam perhitungan manual. Simulasi dilakukan dengan cara memasukkan parameter dan kondisi aktual dari lapangan ke dalam *software* ETAP. Dimulai dari menggambar ulang jaringan transmisi sesuai dengan SLD yang ada dengan memasukkan detail komponen gardu induk, jarak, panjang konduktor, dan jenis konduktor yang digunakan. Kemudian, kondisi aktual seperti beban, sumber daya, dan kondisi operasional lainnya dimasukkan ke dalam model beban. Setelah itu, dilakukan analisis *load flow* untuk menentukan tegangan, arus, dan daya dalam seluruh jaringan. Hasil dari analisis *load flow* akan menunjukkan nilai tegangan, arus, dan daya di setiap titik dalam jaringan seperti pada gambar 5.



Gambar 4. Simulasi Aliran Daya

3.4 Pandean Lamper-Pudak Payung Line 1

Hasil simulasi rugi-rugi daya pada *line* 1 menunjukkan adanya perbedaan nilai dengan hasil perhitungan manual yang tidak terlalu signifikan. Dari perbedaan tersebut dapat ditentukan persentase galatnya. Berikut adalah contoh perhitungan persentase untuk beban puncak pada *line* 1 tanggal 15 Januari 2024 pukul 10.00 WIB.

$$\text{Perbandingan(\%)} = \frac{P_{\text{LOSSES}}}{\text{Simulasi ETAP}} \times 100\%$$

$$= \frac{493}{563,6} \times 100\% = 0,8\%$$

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi rugi-rugi daya *line* 1 saat pukul 10.00 WIB yang memiliki selisih perbedaan yang dapat ditentukan persentase galat antara hasil perhitungan manual dengan hasil simulasi. Hasil persentase galat menunjukkan nilai berada di antara 0,7%-1%. Selain itu, berdasarkan hasil perhitungan manual dan simulasi menggunakan ETAP ditemukan bahwa nilai rugi-rugi daya menunjukkan angka terendah dan tertinggi pada tanggal yang sama. Pada pukul 10.00 WIB nilai rugi-rugi daya tertinggi tercatat pada tanggal 15 Januari 2024 dan rugi-rugi daya terendah tercatat pada tanggal 10 Januari 2024. Konsistensi ini mengindikasikan bahwa baik metode perhitungan manual maupun simulasi ETAP mampu memberikan hasil yang sejalan dalam menggambarkan tren beban puncak pada waktu yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa kedua metode tersebut dapat diandalkan untuk menganalisis dan memprediksi performa sistem transmisi dalam kondisi beban puncak yang serupa.

Tabel 3. Hasil Simulasi P_{LOSSES} Line 1 Pukul 10.00 WIB

TANGGAL	$P_{\text{LOSSES}} \text{ 30 (kW)}$	Simulasi ETAP (kW)	Galat(%)
Senin, 01 Januari 2024	75	82,1	0,91
Selasa, 02 Januari 2024	34	35,3	0,97
Rabu, 03 Januari 2024	21	21,6	0,97
Kamis, 04 Januari 2024	26	29,8	0,89
Jumat, 05 Januari 2024	71	79,9	0,88
Sabtu, 06 Januari 2024	62	71,4	0,87
Minggu, 07 Januari 2024	40	43,7	0,91
Senin, 08 Januari 2024	12	18,3	0,66
Selasa, 09 Januari 2024	27	38,6	0,69
Rabu, 10 Januari 2024	12	13,2	0,91
Kamis, 11 Januari 2024	30	33,8	0,89
Jumat, 12 Januari 2024	55	58,8	0,94
Sabtu, 13 Januari 2024	31	33,6	0,91
Minggu, 14 Januari 2024	84	95,1	0,88
Senin, 15 Januari 2024	493	563,6	0,88
Selasa, 16 Januari 2024	64	72,9	0,88
Rabu, 17 Januari 2024	129	182,3	0,71
Kamis, 18 Januari 2024	51	57,7	0,89
Jumat, 19 Januari 2024	77	83,9	0,91
Sabtu, 20 Januari 2024	119	138,7	0,86
Minggu, 21 Januari 2024	108	120	0,90
Senin, 22 Januari 2024	41	44,1	0,93
Selasa, 23 Januari 2024	39	46,9	0,84
Rabu, 24 Januari 2024	49	54,5	0,89
Kamis, 25 Januari 2024	54	58,2	0,92
Jumat, 26 Januari 2024	43	48,8	0,87
Sabtu, 27 Januari 2024	30	33,4	0,90
Minggu, 28 Januari 2024	60	65,3	0,91
Senin, 29 Januari 2024	30	31,1	0,97
Selasa, 30 Januari 2024	39	45,2	0,86
Rabu, 31 Januari 2024	21	22,9	0,94
Total	2.025		

Tabel 4 menunjukkan nilai rugi-rugi daya *line* 1 saat pukul 19.00 WIB yang memiliki selisih nilai tidak jauh. Hasil persentase galat berada di antara 0,6%-1%. Rugi-rugi daya tertinggi pada tanggal 18 Januari 2024 menghasilkan nilai perhitungan manual sebesar 340 kW sedangkan untuk hasil simulasi bernilai 430 kW dengan persentase galat 0,79%. Rugi-rugi daya terendah pada tanggal 8 Januari 2024 menghasilkan nilai perhitungan manual sebesar 12 kW sedangkan untuk hasil simulasi bernilai 12,2 kW dengan persentase galat 0,92%. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun ada beberapa variasi kecil dalam nilai-nilai yang diperoleh, namun tren umum dan pola rugi-rugi daya yang dihasilkan oleh kedua metode adalah serupa. Perbedaan kecil dalam nilai juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor tambahan yang mungkin diperhitungkan dalam simulasi tetapi tidak

dalam perhitungan manual, seperti perubahan kecil dalam parameter lingkungan atau kondisi operasional.

Tabel 4. Hasil Simulasi P_{LOSSES} Line 1 Pukul 19.00 WIB

Tanggal	P _{LOSSES} 30 (kW)	Simulasi ETAP (kW)	Galat(%)
Senin, 01 Januari 2024	52	75,8	0,68
Selasa, 02 Januari 2024	15	15,8	0,95
Rabu, 03 Januari 2024	49	58,4	0,84
Kamis, 04 Januari 2024	45	48	0,93
Jumat, 05 Januari 2024	23	27,2	0,85
Sabtu, 06 Januari 2024	38	39,4	0,97
Minggu, 07 Januari 2024	30	37,5	0,81
Senin, 08 Januari 2024	12	12,2	0,94
Selasa, 09 Januari 2024	38	43,6	0,86
Rabu, 10 Januari 2024	58	65	0,89
Kamis, 11 Januari 2024	63	70,6	0,89
Jumat, 12 Januari 2024	53	61,2	0,87
Sabtu, 13 Januari 2024	33	36,3	0,90
Minggu, 14 Januari 2024	52	70,9	0,73
Senin, 15 Januari 2024	36	40,8	0,89
Selasa, 16 Januari 2024	58	66,2	0,87
Rabu, 17 Januari 2024	54	61,7	0,87
Kamis, 18 Januari 2024	340	430	0,79
Jumat, 19 Januari 2024	59	83,4	0,70
Sabtu, 20 Januari 2024	95	110,7	0,86
Minggu, 21 Januari 2024	42	45,2	0,92
Senin, 22 Januari 2024	40	44,6	0,91
Selasa, 23 Januari 2024	26	27,9	0,95
Rabu, 24 Januari 2024	40	43,6	0,91
Kamis, 25 Januari 2024	35	51,8	0,68
Jumat, 26 Januari 2024	40	46,8	0,86
Sabtu, 27 Januari 2024	27	29,4	0,93
Minggu, 28 Januari 2024	59	83,4	0,70
Senin, 29 Januari 2024	10	15,5	0,68
Selasa, 30 Januari 2024	41	45,2	0,90
Rabu, 31 Januari 2024	41	44,6	0,92
Total	1.603		

Hasil Perhitungan Manual Jatuh Tegangan

Perhitungan manual jatuh tegangan tiga fasa pada tanggal 1 Januari 2024 yang memiliki nilai arus tertinggi 122 A, nilai daya aktif 21 MW dan daya reaktif 14 MVAR dihitung menggunakan persamaan 2.6 untuk menentukan nilai daya semu.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{21^2 + 14^2} = 25,2$$

Setelah didapatkan nilai daya semu, selanjutnya menggunakan persamaan 2.4 untuk mencari nilai Cos ϕ dan persamaan 2.5 untuk mencari nilai Sin ϕ .

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{21}{25,2} = 0,83$$

$$\sin \phi = \frac{Q}{S} = \frac{14}{25,2} = 0,55$$

Setelah semua parameter nilai yang dibutuhkan lengkap maka dapat mencari nilai jatuh tegangan tiga fasa dengan menggunakan persamaan 2.14.

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sqrt{3} \cdot I \cdot L (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi) \\ &= \sqrt{3} \cdot 122 \cdot 14,516 (0,137 \cdot 0,83 + 0,397 \cdot 0,55) : 1000 \\ &= 1,018 \text{ V} = 1,01 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta V\% &= \frac{\Delta V}{V_{\text{ kirim }}} \times 100\% \\ &= \frac{1,01}{150} \times 100\% = 0,673\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, arus sebesar 122 A mampu memberikan nilai jatuh tegangan sebesar 0,673%. Hal ini dikarenakan jatuh tegangan dalam transmisi dipengaruhi oleh arus yang mengalir melalui saluran, panjang saluran, resistansi, reaktansi, dan sudut fase. Sudut fase memainkan peran penting dalam interaksi antara arus dan tegangan dalam sebuah saluran listrik. Sudut fase menggambarkan perbedaan antara gelombang arus dan tegangan yang mengalir dan dipicu oleh perbedaan waktu antara gelombang tersebut.

Cos ϕ menggambarkan komponen resistif dari jatuh tegangan dalam saluran listrik. Cosinus dari sudut fase menggambarkan seberapa besar bagian tegangan yang menyebabkan pemanasan atau hilangnya daya dalam saluran listrik karena resistansi. Semakin besar nilai Cos ϕ maka semakin besar

kontribusi komponen resistif dalam jatuh tegangan. Berbeda dengan $\sin \phi$, sudut fase tersebut akan menggambarkan komponen reaktif dari jatuh tegangan dalam saluran listrik. $\sin \phi$ menggambarkan seberapa besar bagian tegangan yang disebabkan oleh reaktansi. Reaktansi menyebabkan penurunan tegangan yang terjadi karena energi listrik dikonversi menjadi energi magnetik. Semakin besar nilai $\sin \phi$ maka semakin besar kontribusi komponen reaktif dalam jatuh tegangan.

3.5 Pandean Lamper-Pudak Payung Line 1

Tabel 5 merupakan hasil inspeksi harian terhadap beban puncak Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung line 1 pada pukul 10.00 WIB selama bulan Januari. Hasil jatuh tegangan tertinggi terjadi pada tanggal 15 Januari 2024 sebesar 2,08 kV atau 1,3%. Hal ini dikarenakan arus yang mengalir pada fasa R sangat tinggi mencapai 307 A. Arus ini membawa daya sebesar 64 MVA sehingga tegangan terima mengalami penurunan sebesar 148 kV. Arus beban yang besar akan berbanding terbalik dengan tegangan yang diterima. Sedangkan hasil jatuh tegangan terendah terjadi pada tanggal 10 Januari 2024 sebesar 0,5 kV atau 0,3%. Pada saat itu, arus yang mengalir relatif kecil hanya sebesar 37 A pada fasa S. Arus ini mentransmisikan daya bernilai kecil, yaitu 10 MVA sehingga tegangan terima stabil 150 kV.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Jatuh Tegangan Line 1 Pukul 10.00 WIB

Tanggal	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	MW	MVAR	kV	MVA	$\cos \phi$	$\sin \phi$	AV (kV)	AV (%)
Senin, 01 Januari 2024	122	100	113	21	14	147	25,24	0,83	0,55	1,03	0,68
Selasa, 02 Januari 2024	85	64	77	7	15	147	16,55	0,42	0,91	0,89	0,60
Rabu, 03 Januari 2024	67	49	60	7	11	149	13,04	0,54	0,84	0,69	0,46
Kamis, 04 Januari 2024	76	56	66	6	14	151	15,23	0,39	0,92	0,80	0,53
Jumat, 05 Januari 2024	120	96	109	11	22	148	24,60	0,45	0,89	1,26	0,84
Sabtu, 06 Januari 2024	112	91	102	12	20	148	23,32	0,51	0,86	1,16	0,77
Minggu, 07 Januari 2024	90	71	83	12	14	148	18,44	0,65	0,76	0,88	0,59
Senin, 08 Januari 2024	52	34	47	9	8	150	12,04	0,75	0,66	0,48	0,32
Selasa, 09 Januari 2024	72	60	68	3	17	149	17,26	0,17	0,98	0,75	0,50
Rabu, 10 Januari 2024	52	37	44	2	10	150	10,20	0,20	0,98	0,54	0,36
Kamis, 11 Januari 2024	80	60	72	11	12	151	16,28	0,68	0,74	0,77	0,52
Jumat, 12 Januari 2024	106	84	97	17	13	147	21,40	0,79	0,61	0,93	0,62
Sabtu, 13 Januari 2024	81	60	72	6	15	149	16,16	0,37	0,93	0,85	0,57
Minggu, 14 Januari 2024	127	110	118	21	17	149	27,02	0,78	0,63	1,14	0,76
Senin, 15 Januari 2024	307	264	290	60	23	148	64,26	0,93	0,36	2,08	1,39
Selasa, 16 Januari 2024	114	92	104	14	19	148	23,60	0,59	0,81	1,15	0,77
Rabu, 17 Januari 2024	156	136	148	28	24	148	36,88	0,76	0,65	1,42	0,95
Kamis, 18 Januari 2024	102	81	94	9	19	148	21,02	0,43	0,90	1,07	0,71
Jumat, 19 Januari 2024	124	100	115	22	13	149	25,55	0,86	0,51	1,00	0,66
Sabtu, 20 Januari 2024	151	128	143	31	11	149	32,89	0,94	0,33	0,99	0,66
Minggu, 21 Januari 2024	144	123	136	30	7	150	30,81	0,97	0,23	0,81	0,54
Senin, 22 Januari 2024	92	72	83	15	11	148	18,60	0,81	0,59	0,80	0,53
Selasa, 23 Januari 2024	90	70	82	17	9	150	19,24	0,88	0,47	0,69	0,46
Rabu, 24 Januari 2024	100	77	92	16	13	150	20,62	0,78	0,63	0,90	0,60
Kamis, 25 Januari 2024	105	83	95	16	14	150	21,26	0,75	0,66	0,96	0,64
Jumat, 26 Januari 2024	95	72	85	11	16	150	19,42	0,57	0,82	0,97	0,64
Sabtu, 27 Januari 2024	81	58	72	8	14	150	16,12	0,50	0,87	0,84	0,56
Minggu, 28 Januari 2024	108	88	103	22	6	150	22,80	0,96	0,26	0,64	0,43
Senin, 29 Januari 2024	81	58	72	10	12	148	15,62	0,64	0,77	0,80	0,53
Selasa, 30 Januari 2024	90	68	83	16	10	150	18,87	0,85	0,53	0,74	0,49
Rabu, 31 Januari 2024	69	48	61	9	10	150	13,45	0,67	0,74	0,67	0,45

Jatuh tegangan dan rugi-rugi daya saling terkait dalam sebuah sistem transmisi. Rugi-rugi daya dalam saluran listrik terjadi ketika energi listrik dikonversi menjadi bentuk energi lain seperti panas. Sedangkan jatuh tegangan adalah salah satu konsekuensi dari proses ini. Semakin besar rugi-rugi daya maka semakin besar pula jatuh tegangan yang terjadi dalam saluran listrik. Oleh karena itu, pada tanggal yang sama akan menghasilkan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan tertinggi maupun rugi-rugi daya terendah dan jatuh tegangan terendah.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Jatuh Tegangan Line 1 Pukul 19.00 WIB

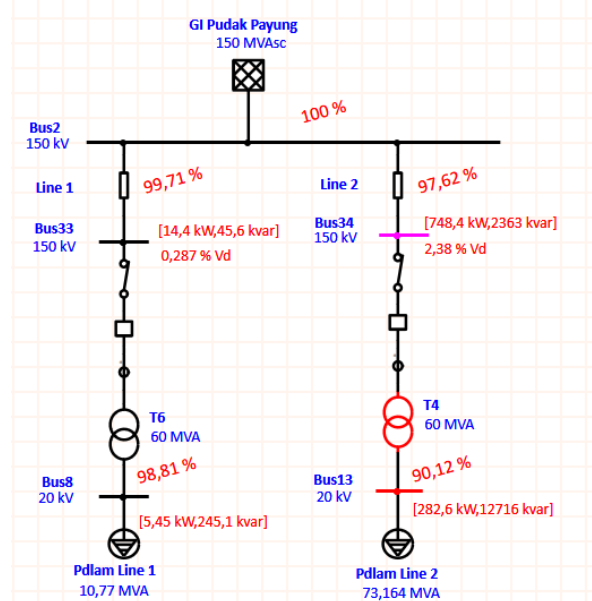
Tanggal	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	MW	MVAR	kV	MVA	$\cos \phi$	$\sin \phi$	AV (kV)	AV (%)
Senin, 01 Januari 2024	100	79	99	19	15	150	24,21	0,78	0,62	0,89	0,59
Selasa, 02 Januari 2024	58	40	51	5	10	152	11,18	0,45	0,89	0,61	0,40
Rabu, 03 Januari 2024	100	79	91	2	21	154	21,10	0,09	1,00	1,03	0,68
Kamis, 04 Januari 2024	96	75	87	9	17	152	19,24	0,47	0,88	1,00	0,67
Jumat, 05 Januari 2024	70	53	63	4	14	152	14,56	0,27	0,96	0,74	0,49
Sabtu, 06 Januari 2024	84	74	82	9	15	152	17,49	0,51	0,86	0,87	0,58
Minggu, 07 Januari 2024	79	63	71	1	17	152	17,03	0,06	1,00	0,80	0,54
Senin, 08 Januari 2024	48	37	46	9	3	151	9,49	0,95	0,32	0,31	0,21
Selasa, 09 Januari 2024	105	83	97	9	16	149	18,36	0,49	0,87	0,91	0,61
Rabu, 10 Januari 2024	108	88	98	3	22	151	22,20	0,14	0,99	1,12	0,75
Kamis, 11 Januari 2024	112	96	100	17	16	154	23,35	0,73	0,69	1,05	0,70
Jumat, 12 Januari 2024	105	85	93	5	21	153	21,59	0,23	0,97	1,10	0,74
Sabtu, 13 Januari 2024	83	63	75	5	16	149	16,76	0,30	0,95	0,88	0,59
Minggu, 14 Januari 2024	99	90	91	18	15	149	23,43	0,77	0,64	0,89	0,60
Senin, 15 Januari 2024	87	68	78	17	6	150	18,03	0,94	0,33	0,57	0,38
Selasa, 16 Januari 2024	107	87	100	21	9	152	22,85	0,92	0,39	0,76	0,51
Rabu, 17 Januari 2024	103	83	97	21	7	152	22,14	0,95	0,32	0,66	0,44
Kamis, 18 Januari 2024	253	228	235	49	27	150	55,95	0,88	0,48	1,98	1,32
Jumat, 19 Januari 2024	98	91	108	24	9	149	25,63	0,94	0,35	0,73	0,48
Sabtu, 20 Januari 2024	136	112	129	21	20	148	29,00	0,72	0,69	1,28	0,85
Minggu, 21 Januari 2024	91	74	85	18	6	149	18,97	0,95	0,32	0,58	0,39
Senin, 22 Januari 2024	91	72	83	11	15	150	18,60	0,59	0,81	0,92	0,61
Selasa, 23 Januari 2024	76	56	66	7	13	150	14,76	0,47	0,88	0,79	0,53
Rabu, 24 Januari 2024	91	70	82	9	16	150	18,36	0,49	0,87	0,95	0,63
Kamis, 25 Januari 2024	86	65	78	12	16	150	20,00	0,60	0,80	0,86	0,58
Jumat, 26 Januari 2024	89	69	82	6	18	154	18,97	0,32	0,95	0,94	0,63
Sabtu, 27 Januari 2024	78	57	66	2	15	150	15,13	0,13	0,99	0,81	0,54
Minggu, 28 Januari 2024	103	81	97	20	5	149	20,62	0,97	0,24	0,59	0,40
Senin, 29 Januari 2024	37	40	48	1	11	151	11,05	0,09	1,00	0,49	0,33
Selasa, 30 Januari 2024	91	71	84	16	10	148	18,87	0,85	0,53	0,75	0,50
Rabu, 31 Januari 2024	92	71	84	11	15	151	18,60	0,59	0,8064	0,93	0,62

Tabel 6 menunjukkan hasil inspeksi harian terhadap beban puncak Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung *line 1* selama satu bulan pada pukul 19.00 WIB. Jatuh tegangan tertinggi terjadi pada tanggal 18 Januari 2024, mencapai 1,9 kV atau 1,3%. Hal ini dipengaruhi oleh arus yang sangat besar 253 A mengalir pada fasa R. Namun, meskipun daya yang berhasil ditransmisikan besar, yaitu 55 MVA, tetapi tegangan yang diterima tetap stabil 150 kV. Sedangkan jatuh tegangan terendah pada *line 1* pukul 19.00 WIB terjadi pada tanggal 8 Januari 2024 sebesar 0,3 kV atau 0,2%. Hal ini dipengaruhi oleh arus yang bernilai kecil pada fasa S hanya sebesar 37 A yang membawa daya 9 MVA sehingga tegangan terima masih stabil 151 kV.

Berdasarkan hasil perhitungan manual dari tabel 4.9 dan tabel 4.10 dapat diketahui bahwa jatuh tegangan dalam *line 1* pada saat beban puncak, baik pada pukul 10.00 WIB maupun pukul 19.00 WIB masih berada dalam standar efisiensi yang ditetapkan oleh SPLN, yaitu di bawah 5%. Jatuh tegangan tertinggi saat pukul 10.00 WIB dan pukul 19.00 WIB sebesar 1,3%. Hal ini menunjukkan meskipun terjadi beban puncak pada kedua waktu tersebut, tetapi sistem tenaga listrik masih mampu menjaga jatuh tegangan dalam batas yang diterima.

3.6 Hasil Simulasi Jatuh Tegangan

Setelah melakukan perhitungan manual maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi menggunakan *software* ETAP untuk memvalidasi dan menguji keakuratan perhitungan tersebut. Simulasi dilakukan dengan cara memasukkan parameter dan kondisi aktual dari lapangan ke dalam *software* ETAP dari mulai parameter komponen, nilai beban, dan kondisi operasional lainnya.



Gambar 5 .Simulasi Jatuh Tegangan Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung

Berdasarkan gambar 6, jatuh tegangan pada tanggal 8 Januari 2024 dan 18 Januari 2024 bernilai 0,287% dan 2,38%. Nilai tersebut didapatkan dari busbar 150 kV pada *line 1* dan *line 2* yang bervariasi nilainya tergantung pada nilai beban yang dimasukkan. Apabila nilai jatuh tegangan sangat tinggi menyebabkan busbar berubah warna sebagai indikator peringatan dalam saluran transmisi tersebut. Hal ini dapat mengarah pada tindakan perbaikan atau pemeliharaan pada saluran tersebut untuk mencegah terjadinya masalah yang lebih serius atau gangguan dalam pasokan listrik kepada pelanggan.

3.7 Pandean Lamper-Pudak Payung Line 1

Hasil simulasi jatuh tegangan pada *line 1* menunjukkan adanya perbedaan nilai dengan hasil perhitungan manual yang tidak terlalu signifikan. Hasil simulasi akan lebih besar daripada hasil manual dikarenakan perhitungan simulasi yang lebih kompleks.

Tabel 7. Hasil Simulasi Jatuh Tegangan Line 1 Pukul 10.00 WIB

Tanggal	AV (%)	Simulasi ETAP (%)	Galat(%)
Senin, 01 Januari 2024	0,68	0,85	0,80
Selasa, 02 Januari 2024	0,60	0,68	0,88
Rabu, 03 Januari 2024	0,46	0,52	0,88
Kamis, 04 Januari 2024	0,53	0,63	0,85
Jumat, 05 Januari 2024	0,84	1,03	0,81
Sabtu, 06 Januari 2024	0,77	0,95	0,81
Minggu, 07 Januari 2024	0,59	0,71	0,83
Senin, 08 Januari 2024	0,32	0,43	0,74
Selasa, 09 Januari 2024	0,50	0,71	0,71
Rabu, 10 Januari 2024	0,36	0,41	0,88
Kamis, 11 Januari 2024	0,52	0,61	0,85
Jumat, 12 Januari 2024	0,62	0,74	0,84
Sabtu, 13 Januari 2024	0,57	0,67	0,85
Minggu, 14 Januari 2024	0,76	0,97	0,78
Senin, 15 Januari 2024	1,39	2,01	0,69
Selasa, 16 Januari 2024	0,77	0,94	0,81
Rabu, 17 Januari 2024	0,95	1,38	0,69
Kamis, 18 Januari 2024	0,71	0,87	0,82
Jumat, 19 Januari 2024	0,66	0,82	0,81
Sabtu, 20 Januari 2024	0,66	0,9	0,74
Minggu, 21 Januari 2024	0,54	0,72	0,75
Senin, 22 Januari 2024	0,53	0,63	0,85
Selasa, 23 Januari 2024	0,46	0,58	0,80
Rabu, 24 Januari 2024	0,60	0,73	0,82
Kamis, 25 Januari 2024	0,64	0,77	0,83
Jumat, 26 Januari 2024	0,64	0,78	0,83
Sabtu, 27 Januari 2024	0,56	0,65	0,86
Minggu, 28 Januari 2024	0,43	0,54	0,79
Senin, 29 Januari 2024	0,53	0,6	0,89
Selasa, 30 Januari 2024	0,49	0,61	0,81
Rabu, 31 Januari 2024	0,45	0,51	0,88

Tabel 7 menunjukkan nilai jatuh tegangan line 1 saat pukul 10.00 WIB yang memiliki selisih nilai tidak jauh. Hasil persentase galat berada di antara 0,7%-0,9%. Jatuh tegangan tertinggi pada tanggal 15 Januari 2024 menghasilkan nilai perhitungan manual sebesar 1,39% sedangkan untuk hasil simulasi bernilai 2,01% dengan persentase galat 0,69%. Jatuh tegangan terendah pada tanggal 10 Januari 2024 menghasilkan nilai perhitungan manual sebesar 0,36% sedangkan untuk hasil simulasi bernilai 0,41% dengan persentase galat 0,88%. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun ada beberapa variasi kecil dalam nilai-nilai yang diperoleh, namun tren umum dan pola jatuh tegangan yang dihasilkan oleh kedua metode adalah serupa.

Tabel 8. Hasil Simulasi Jatuh Tegangan Line 1 Pukul 19.00 WIB

Tanggal	AV (%)	Simulasi ETAP (%)	Galat(%)
Senin, 01 Januari 2024	0,59	0,85	0,70
Selasa, 02 Januari 2024	0,40	0,45	0,90
Rabu, 03 Januari 2024	0,68	0,86	0,80
Kamis, 04 Januari 2024	0,67	0,73	0,91
Jumat, 05 Januari 2024	0,49	0,6	0,82
Sabtu, 06 Januari 2024	0,58	0,71	0,81
Minggu, 07 Januari 2024	0,54	0,68	0,79
Senin, 08 Januari 2024	0,21	0,23	0,89
Selasa, 09 Januari 2024	0,61	0,75	0,81
Rabu, 10 Januari 2024	0,75	0,92	0,81
Kamis, 11 Januari 2024	0,70	0,86	0,81
Jumat, 12 Januari 2024	0,74	0,9	0,82
Sabtu, 13 Januari 2024	0,58	0,69	0,85
Minggu, 14 Januari 2024	0,60	0,84	0,71
Senin, 15 Januari 2024	0,38	0,46	0,83
Selasa, 16 Januari 2024	0,51	0,65	0,78
Rabu, 17 Januari 2024	0,44	0,57	0,77
Kamis, 18 Januari 2024	1,32	1,92	0,69
Jumat, 19 Januari 2024	0,48	0,69	0,70
Sabtu, 20 Januari 2024	0,85	1,1	0,77
Minggu, 21 Januari 2024	0,39	0,48	0,81
Senin, 22 Januari 2024	0,61	0,73	0,84
Selasa, 23 Januari 2024	0,53	0,6	0,88
Rabu, 24 Januari 2024	0,63	0,75	0,84
Kamis, 25 Januari 2024	0,58	0,79	0,73
Jumat, 26 Januari 2024	0,63	0,79	0,79
Sabtu, 27 Januari 2024	0,54	0,61	0,88
Minggu, 28 Januari 2024	0,40	0,47	0,84
Senin, 29 Januari 2024	0,33	0,44	0,75
Selasa, 30 Januari 2024	0,50	0,61	0,82
Rabu, 31 Januari 2024	0,62	0,73	0,85

Tabel 8 menunjukkan nilai jatuh tegangan *line 2* saat pukul 19.00 WIB yang memiliki selisih nilai tidak jauh. Hasil persentase galat berada di antara 0,6%-1%. Jatuh tegangan tertinggi pada tanggal 18 Januari 2024 menghasilkan nilai perhitungan manual sebesar 1,32% sedangkan untuk hasil simulasi bernilai 1,92% dengan persentase galat 0,69%. Jatuh tegangan terendah pada tanggal 8 Januari 2024 menghasilkan nilai perhitungan manual sebesar 0,21% sedangkan untuk hasil simulasi bernilai 0,23% dengan persentase galat 0,89%.

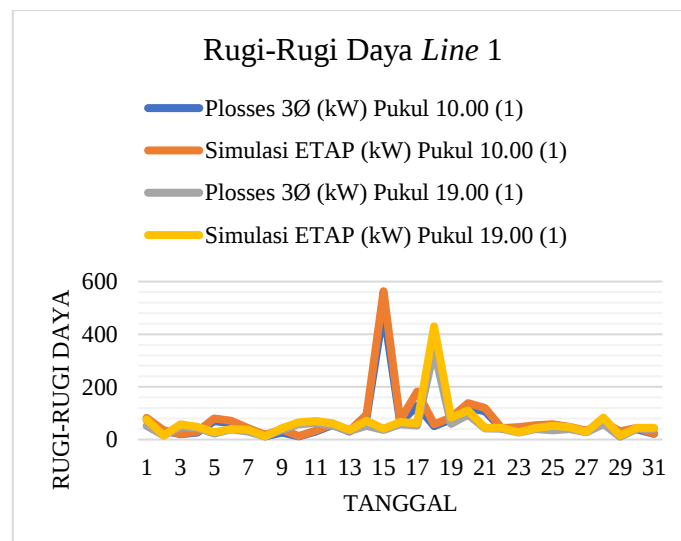
3.8 Grafik Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dan Hasil Simulasi

Grafik yang dibuat akan menampilkan hasil perbandingan antara perhitungan manual dan simulasi rugi-rugi daya serta jatuh tegangan pada dua jalur transmisi Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung. Grafik yang disajikan bertujuan untuk memberikan gambaran visual mengenai sejauh mana hasil yang diperoleh melalui perhitungan manual sejalan dan sesuai dengan hasil yang diperoleh dari simulasi ETAP.

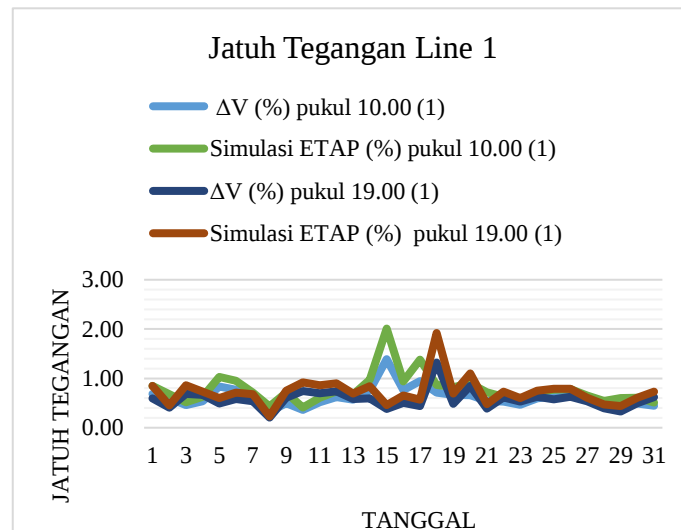
Gambar 7 adalah grafik rugi-rugi daya pada *line 1* yang menunjukkan lonjakan signifikan pada tanggal 15 dan 18 Januari 2024, baik pada pukul 10.00 maupun pukul 19.00. Hal ini menunjukkan bahwa pada hari-hari tersebut terdapat kondisi atau kejadian yang mempengaruhi beban kedua jalur transmisi. Beban kedua jalur transmisi dipengaruhi oleh faktor cuaca ekstrem seperti badai dan angin kencang yang menyebabkan gangguan infrastruktur, permintaan energi listrik yang tinggi saat musim panas, dan pengalihan beban dari satu jalur transmisi ke jalur lain untuk pemeliharaan atau keseimbangan sistem. Hal tersebut berpotensi membebani jalur transmisi yang menyebabkan nilai arus semakin besar karena membawa daya yang besar.

Gambar 8 adalah grafik jatuh tegangan pada *line 1* yang menunjukkan kemiripan pola antara hasil perhitungan manual dan hasil simulasi ETAP. Kedua grafik menunjukkan pola fluktuasi jatuh tegangan yang serupa sepanjang bulan dengan puncak-puncak yang signifikan pada tanggal yang sama, yaitu 15 dan 18 Januari 2024. Hal ini menunjukkan adanya pola beban yang konsisten pada kedua jalur listrik tersebut.

Dengan demikian, kedua grafik tersebut menunjukkan pola dan karakteristik yang sangat mirip, baik dalam hal jenis data, waktu pengukuran, pola fluktuasi, rentang waktu, maupun skala dan satuan pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa jalur *line 1* dan *line 2* mengalami kondisi beban yang serupa dan respons sistem yang mirip terhadap perubahan beban harian. Persamaan-persamaan ini memberikan indikasi bahwa kedua jalur tersebut dioperasikan dalam kondisi yang hampir serupa.



Gambar 6. Grafik Rugi-Rugi Daya Line 1



Gambar 8. Grafik Jatuh Tegangan Daya *line 1*

4. KESIMPULAN

- Nilai rugi-rugi daya tertinggi pada *line 1* berdasarkan perhitungan manual terjadi pada tanggal 15 Januari 2024 pukul 10.00 WIB sebesar 543 kW dengan persentase rugi-rugi daya mencapai 5,66%. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi menunjukkan nilai 563,6 kW. Pada *line 2*, rugi-rugi daya tertinggi berdasarkan perhitungan manual terjadi pada tanggal 18 Januari 2024 pukul 19.00 WIB sebesar 486 kW dengan persentase rugi-rugi daya mencapai 5,39%. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi menunjukkan nilai 748 kW dengan persentase galat di bawah 1%.
- Nilai jatuh tegangan tertinggi pada *line 1* berdasarkan perhitungan manual terjadi pada tanggal 15 Januari 2024 pukul 10.00 WIB sebesar 2 kV dengan persentase mencapai 1,38%. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi menunjukkan nilai 2,01%. Pada *line 2*, jatuh tertinggi berdasarkan perhitungan manual terjadi pada tanggal 18 Januari 2024 pukul 19.00 WIB sebesar 1,9 kV dengan persentase mencapai 1,33%. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi menunjukkan nilai 2,38% dengan persentase galat di bawah 1%.

DAFTAR PUSTAKA

- Putra dan Erhaneli, "Analisis rugi daya akibat korona dengan metode peterson dan peek pada SUTET 275 kV GI Payakumbuh-Kiliranjao," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, vol. 8, 2023.
- A. Anggoro, S. B. Utomo, dan I. Widiastuti, "Analisa rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran transmisi 150 kV GI Pati bay GI Jekulo menggunakan ETAP 12.6.0," *Elektrika*, vol. 12, no. 2, hlm. 80–85, 2020.
- Dr. R. Syahputra, *Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Univeristas Muhammadiyah Yogyakarta, 2021.
- Aggrianto, "Peran PT. PLN (PERUSAHAAN LISTRIK NEGARA) dalam pelayanan listrik di Kampung Biatan Bapinang, Kecamatan Biatan Lempake, Kabupaten Berau," *eJournal Ilmu Pemerintahan*, vol. 2, no. 2, 2014.
- Erhaneli dan A. Putra, "Analisis pengaruh tegangan terhadap rugi daya akibat korona pada SUTET 275 kV Payakumbuh-Kiliranjao," *Seminar Nasional Multidisiplin Ilmu*, vol. 3, no. 1, 2022.

- [6] H. P. Cahyandaru, S. Nisworo, dan D. Pravitasari, “Rugi rugi daya dan susut tegangan pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV Ungaran -Pedan,” PROSIDING SEMINAR NASIONAL RISET TEKNOLOGI TERAPAN, 2022.
- [7] H. Sujatmiko, “Analisis kerugian daya pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV di PT. PLN (PERSERO) Penyaluran & Pusat Pengaturan Beban (P3B) Jawa Bali regional Jawa Tengah & DIY Unit Pelayanan Transmisi Semarang,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 1, no. 1, 2009.
- [8] M. Amir dan I. A. Winarno, “Analisis susut tegangan saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV,” *Sinusoida*, vol. XXII, no. 2, 2020.
- [9] N. J. Hontong, M. Tuegeh, dan L. S. Patras, “Analisa rugi - rugi daya pada jaringan distribusi di PT. PLN Palu,” *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, 2015.
- [10] Rifal, S. B. Utomo, dan M. Haddin, “Analisis perhitungan rugi-rugi daya pada saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV Gardu Induk Tambak Lorok-Bawen dengan menggunakan ETAP 12.6.0,” *Prosiding Konferensi Ilmiah Mahasiswa Unissula (KIMU) 2*, 2019.
- [11] R. A. Duyo, “Analisis penyebab gangguan jaringan pada distribusi listrik menggunakan metode fault tree analysis di PT. PLN (PERSERO) rayon Daya Makassar,” *Vertex Elektro*, vol. 12, no. 2, Agu 2020.
- [12] S. L. Dalila, M. Gapy, dan R. H. Siregar, “Analisa rugi-rugi daya pada saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV dari Gardu Induk PLN Bireun ke Gardu Induk PLN Banda Aceh,” *KITEKTRO: Jurnal Komputer, Teknologi Informasi, dan Elektro*, vol. 7, no. 1, hlm. 23–28, 2022.
- [13] Syafriyudin, *Transmisi daya listrik*. Akprind Press, 2012.
- [14] S. A. Koesardhinata dkk., “Analisa rugi-rugi daya pada jaringan transmisi 150 kV Gardu Induk Waru bay Sidoarjo,” *Jurnal EL Sains*, vol. 5, no. 1, 2023.
- [15] T. N. Haqi, “Analisis rugi-rugi daya pada saluran transmisi 150 kV dari Gardu Induk Blora ke Gardu Induk Cepu,” Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2020. Tersedia pada: <https://etd.repository.ugm.ac.id/>