

Analisis Rugi-rugi Daya dan Jatuh Tegangan Pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal dengan Menggunakan ETAP

Ziauddin Haq Vafian Zafiro*, Muhamad Haddin

Prodi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

Article Info

Article history:

Submitted August 12, 2024

Accepted August 18, 2024

Published August 20, 2024

Keywords:

Rugi-rugi daya,
jatuh tegangan,
SUTT 150 kV

Power Losses,
voltage drop,
SUTT 150 kV

ABSTRACT

Permasalahan pada saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 kV adalah peningkatan arus yang menyebabkan jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran. Solusinya adalah melakukan evaluasi pada saluran transmisi berdasarkan SPLN No. 72 tahun 1987 dengan batas toleransi tegangan +5% dan -10%. Untuk itu diperlukan perhitungan untuk menentukan seberapa besar jatuh tegangan dan kerugian daya yang terjadi. Penelitian ini membahas tentang jatuh tegangan dan rugi daya pada SUTT 150 kV. Model ditentukan sebagai *single line diagram* SUTT 150 kV dengan parameter yang ditetapkan adalah: tegangan sistem, arus, spesifikasi konduktor dan panjang saluran. Simulasi pengolahan data dari perhitungan menggunakan ETAP. Obyek penelitian adalah SUTT 150 kV Pekalongan-Comal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ETAP mampu digunakan untuk menyimulasikan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada SUTT 150 kV. Dari hasil penelitian ini didapat rugi-rugi daya pada perhitungan manual sebesar 744,6 kW, sementara itu dari hasil simulasi ETAP 19.0.1 sebesar 644,34 kW. Jatuh tegangan pada perhitungan manual sebesar 1,04 % dan hasil simulasi sebesar 1,64 %. Dalam kasus ini jatuh tegangan masih dalam ambang batas SPLN yaitu kurang dari 10%.

The problem with the 150 kV High Voltage Overhead Transmission Line (SUTT) was the increase in current, which caused voltage drop and power losses in the line. The solution was to evaluate the transmission line based on SPLN No. 72 of 1987, with a voltage tolerance limit of +5% and -10%. Calculations were needed to determine the extent of the voltage drop and power losses. This study discussed the voltage drop and power losses in the 150 kV SUTT. The model was defined as a single-line diagram of the 150 kV SUTT with specified parameters: system voltage, current, conductor specifications, and line length. ETAP was used to simulate the data processing from the calculations. The 150 kV Pekalongan-Comal SUTT was selected as the research object. The results showed that ETAP could be used to simulate power losses and voltage drop in the 150 kV SUTT. The research results showed the power losses of 744.6 kW, while ETAP 19.0.1 simulation showed power losses of 644.34 kW. The manual voltage drop percentage was 1.04%, and the simulation result was 1.64%. This case was still within the SPLN threshold of less than 10%.



Corresponding Author:

Ziauddin Haq Vafian Zafiro,

Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung,

Jl. Kaligawe Raya Km. 4 Semarang, Jawa Tengah 50112, Indonesia.

Email: *vafianzavero@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu komponen penting yang menggerakkan ekonomi masyarakat dan membuat kesejahteraan dalam suatu negara [1]. Saat ini, kebutuhan energi listrik tidak lagi terbatas pada masyarakat perkotaan, tetapi juga mencakup mereka yang tinggal di pelosok daerah. Secara garis besar, sistem tenaga listrik terdiri dari empat komponen utama: pembangkit, transmisi, distribusi dan beban. Distribusi energi listrik dari pembangkit ke beban biasanya melibatkan jarak yang cukup jauh, mencapai ratusan bahkan ribuan kilometer [2]. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV dan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV adalah sistem transmisi yang memainkan peran kunci dalam memastikan ketersediaan listrik

yang andal dan berkualitas dari pembangkit listrik hingga konsumen akhir. Sistem transmisi tenaga listrik Jawa-Bali dihubungkan oleh sistem interkoneksi saluran udara tegangan tinggi 150 kV, termasuk SUTT 150 kV Pekalongan – Comal. Sistem kelistrikan antara pembangkit listrik dan lokasi beban biasanya terpisah oleh jarak yang mencapai ratusan hingga ribuan kilometer. Jarak yang sangat jauh ini akan menjadi penyebab penurunan tegangan (*voltage drop*). Jatuh tegangan akan menyebabkan rugi-rugi daya yang diterima. Untuk mencegah kerugian daya yang disebabkan oleh jarak saluran transmisi yang sangat jauh, diperlukan tegangan yang sangat tinggi dari pembangkit listrik, sehingga jatuh tegangan dapat diminimalkan. Selain itu perlu adanya pembangunan Gardu Induk (GI) baru. Pembangunan GI baru yaitu GI Comal yang menghubungkan GI Pekalongan dan GI Pemalang dapat mengeliminasi *losses* energi yang terjadi. Faktor yang menyebabkan adanya rugi-rugi daya yakni faktor fluktuatif beban, korona, kebocoran isolator, jarak serta jenis konduktor yang digunakan dalam menyalurkan energi listrik. Hal ini mengakibatkan adanya perbedaan tegangan pada pangkal pengiriman tegangan dengan ujung penerimaan tegangan [3].

Permasalahan jatuh tegangan yang terjadi pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal harus diperhatikan, karena mengakibatkan kehilangan daya yang cukup besar. Dampak dari perkembangan beban yang terjadi di wilayah Comal adalah adanya peningkatan arus, sehingga mengakibatkan meningkatnya jatuh tegangan dan rugi daya pada saluran. Solusinya ialah melakukan evaluasi pada saluran transmisi untuk menilai kesesuaian jatuh tegangan dan kerugian daya dengan standar toleransi yang ditetapkan oleh SPLN No. 72 tahun 1987, yaitu batas toleransi tegangan +5% dan -10%. Selain itu, diperlukan perhitungan untuk menentukan besarnya jatuh tegangan dan rugi-rugi daya yang terjadi.

Beberapa penelitian terdahulu tentang rugi-rugi daya dan jatuh tegangan telah dilakukan, antara lain: rugi daya dan jatuh tegangan pada SUTT 150 kV GI Pati Bay GI Jekulo Menggunakan ETAP 12.6.0 [4], rugi daya pada SUTT 150 kV sistem khatulistiwa [5], rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran transmisi 150 kV GI Pandean Lamper-Pudak Payung [6]. Penelitian ini memfokuskan tentang analisis rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran udara tegangan tinggi 150 kV Pekalongan-Comal dengan menggunakan ETAP 19.0.1.

2. METODE PENELITIAN

Studi aliran daya didefinisikan sebagai analisis numerik dari aliran daya sistem kelistrikan. Terkadang disebut sebagai investigasi aliran energi, dan analisis ini berfokus pada penilaian kondisi stabil dari sistem kelistrikan [7]. Tujuan utamanya ialah menentukan aliran daya, tegangan, arus, daya aktif, dan daya reaktif dalam sistem di bawah berbagai kondisi beban [8]. Studi aliran daya ini sangat penting dalam fase desain proyek baru atau saat melakukan evaluasi perubahan dan perluasan sistem kelistrikan yang sudah ada. Tujuan dari perhitungan aliran daya adalah untuk membantu dalam memahami bagaimana daya ditransfer dari ujung pengirim ke ujung penerima, dengan mempertimbangkan rugi-rugi dan kebutuhan beban yang terhubung. Dalam hal ini, penting untuk menjaga kualitas daya, level tegangan, dan stabilitas sistem selama transfer ini. Analisis aliran daya digunakan untuk menentukan aliran daya ini dan memastikan pengoperasian sistem daya yang andal. Selama penyaluran, selalu ada rugi-rugi daya yang disebabkan oleh beberapa faktor, seperti jarak saluran listrik yang terlalu jauh ke beban. Jarak yang lebih besar dapat menyebabkan peningkatan resistansi pada saluran konduktor yang digunakan. Resistansi tersebut yang menyebabkan adanya kerugian daya pada saluran [9].

2.1 Rugi-rugi Daya

Pada saluran udara tegangan tinggi Pekalongan-Comal menggunakan jenis konduktor ACCC (*Aluminium Conductor Composite Core*) Lisbon yang memiliki kemampuan hantar arus sebesar 1.285 ampere dan memiliki resistansi 0,0896 Ω /km. Perhitungan resistansi total konduktor dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$R_{total} = R \times L \quad (1)$$

dengan: R_{total} = resistansi total ACCC Lisbon (Ω)
 R = resistansi jenis penghantar (Ω)
 L = jarak (km)

Rugi daya yang terbuang merepresentasikan adanya daya yang hilang sehingga mengakibatkan daya yang diterima di sisi penerima lebih kecil dari daya yang dikirim pada sisi pengirim. Rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal untuk ketiga fase dapat dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$P_{losses} = 3 \times I^2 \times R_{total} \quad (2)$$

dengan: P_{losses} = rugi-rugi daya ketiga fase (W)
 I = arus saluran per fasa (A)
 R = resistansi total pada saluran (Ω)

Waktu beban puncak adalah beban kebutuhan terbesar yang terjadi selama periode tertentu. Waktu beban puncak berdasarkan pendataan dari operator Gardu Induk terdiri dari waktu beban puncak pagi pada pukul 10.00 WIB dan waktu beban puncak malam yakni pada pukul 19.00. Kondisi pada kedua waktu ini merupakan gambaran yang komprehensif tentang pola konsumsi energi listrik dalam satu hari. Waktu beban puncak tersebut

kemudian digunakan sebagai perhitungan rata-rata rugi-rugi daya dan energi dalam sehari dapat dihitung menggunakan Persamaan (3) dan (4).

$$P_{losses} = \frac{P_{losses\ 10.00\ WIB} + P_{losses\ 19.00\ WIB}}{2} \quad (3)$$

dengan: P_{losses} = rugi-rugi daya (MW)
 $P_{losses\ 10.00\ WIB}$ = rugi-rugi daya pada pukul 10.00 (MW)
 $P_{losses\ 19.00\ WIB}$ = rugi-rugi daya pada pukul 19.00 (MW)

$$E = P \times t \quad (4)$$

dengan: E = energi listrik (Mega watt jam)
 P = daya listrik (Mega watt)
 t = lama pemakaian (jam)

Dari rugi-rugi daya pada tanggal 1 hingga 31 bulan Mei 2024 dapat ditentukan rerata rugi-rugi daya per hari menggunakan Persamaan (5).

$$P_{losses}/hari = \frac{Total\ P_{losses\ sebulan\ (kWh)}}{31\ hari} \quad (5)$$

dengan: $P_{losses}/hari$ = rugi-rugi daya per hari (kWh)
 $Total\ P_{losses}$ = total rugi-rugi daya selama sebulan (kWh)

Dengan adanya kehilangan daya listrik saat penyaluran transmisi mengakibatkan, PT. PLN (Persero) mengalami kerugian [10]. Kerugian biaya yang dialami karena daya yang hilang dapat dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$Biaya\ listrik = E \times 1000 \times BPP \quad (6)$$

dengan: E = energi listrik (watt jam)
 BPP = biaya Pokok Produksi per kWh (Rp)

2.2 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan disebabkan adanya resistansi atau impedansi pada konduktor. Besar jatuh tegangan dihitung menggunakan Persamaan (7).

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (7)$$

dengan: ΔV = jatuh tegangan (V)
 V_s = tegangan kirim (V)
 V_r = tegangan terima (V)

Untuk menghitung persentase jatuh tegangan, digunakan Persamaan (8).

$$\Delta V\ (%) = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\ \% \quad (8)$$

dengan: $\Delta V\ (%)$ = persentase jatuh tegangan (%)
 V_s = tegangan kirim (volt)
 V_r = tegangan terima (volt)

Persentase rata-rata jatuh tegangan dalam satu hari dihitung menggunakan Persamaan (9).

$$\overline{V_{drop}}\ (%) = \frac{V_{drop\ 10.00\ WIB}\ (%) + V_{drop\ 19.00\ WIB}\ (%) }{2} \quad (9)$$

dengan: $\overline{V_{drop}}\ (%)$ = rata-rata persentase jatuh tegangan (%)
 $V_{drop\ 10.00\ WIB}\ (%)$ = persentase jatuh tegangan pukul 10.00 WIB (%)
 $V_{drop\ 19.00\ WIB}\ (%)$ = persentase jatuh tegangan pukul 19.00 WIB (%)

Dari data persentase jatuh tegangan pada tanggal 1 sampai 31 bulan Mei 2024, dapat dihitung persentase rata-rata jatuh tegangan per hari menggunakan Persamaan (10).

$$\overline{V_{drop}}\ (%) \text{ per hari} = \frac{Total\ \overline{V_{drop}}\ (%) \text{ sebulan}}{31\ hari} \quad (10)$$

dengan: $\overline{V_{drop}}\ (%) \text{ per hari}$ = persentase rata-rata jatuh tegangan per hari (%)
 $Total\ \overline{V_{drop}}\ (%) \text{ sebulan}$ = total persentase rata-rata selama sebulan (%)

2.3 Model Penelitian

Model penelitian ini difokuskan pada perhitungan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal secara manual dan dengan *software* ETAP 19.0.1. *Single line diagram* SUTT 150 kV Pekalongan-Comal ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Single Line Diagram* SUTT 150 kV Pekalongan-Comal

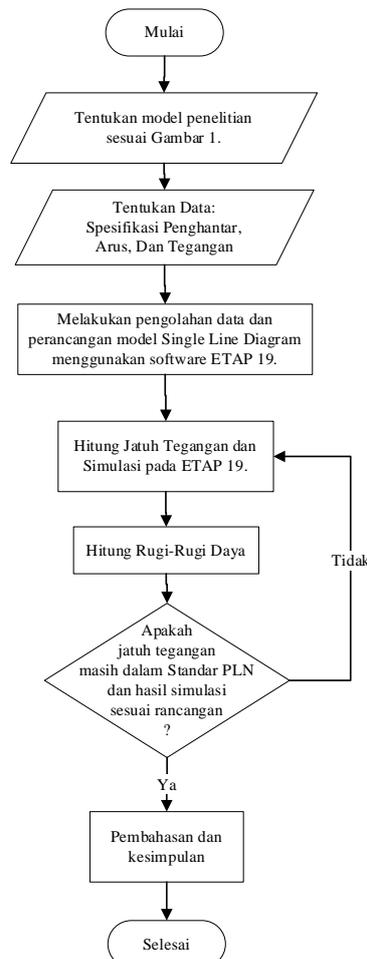
Data spesifikasi penghantar untuk SUTT 150 kV Pekalongan-Comal didapatkan dari PT. PLN (Persero) sehingga dapat digunakan sebagai bahan analisis dalam menghitung rugi-rugi daya pada penyaluran. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Spesifikasi Penghantar

Tegangan (kV)	Jarak (km)	Konduktor	Penampang (mm ²)	Arus nominal (A)	Resistansi (Ω/km)
150	12,02	ACCC Lisbon	310	1.285	0,0896

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data arus dan tegangan pada waktu beban puncak di Gardu Induk. Waktu beban puncak merupakan periode ketika konsumsi energi listrik mencapai titik tertinggi dalam sehari. Adapun waktu beban puncak terjadi dua kali sehari yaitu pada pagi hari pukul 10.00 WIB dan pada malam hari pukul 19.00 WIB.

Penelitian ini melibatkan beberapa tahap pelaksanaan yang terstruktur secara berurutan yakni dimulai dengan menentukan model penelitian, menentukan spesifikasi penghantar, data arus dan tegangan yang digunakan sebagai perhitungan rugi-rugi daya dan persentase jatuh tegangan. Kemudian dilanjutkan dengan membuat model *single line diagram* untuk disimulasikan melalui *software* ETAP. Hasil dari simulasi pada ETAP digunakan untuk analisis SUTT 150 kV Pekalongan-Comal dengan tujuan untuk mengetahui jatuh tegangan masih dalam standar PLN atau tidak, Langkah-langkah ini ditunjukkan oleh *flowchart* pada Gambar 2.



Gambar 2. *Flowchart* penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan Rugi-rugi Daya dan Jatuh Tegangan secara Manual

Saluran menggunakan penghantar jenis ACCC Lisbon dengan resistansi 0,0896 Ω/km. Resistansi sepanjang saluran udara tegangan tinggi 150 kV Pekalongan-Comal dengan jarak 12,02 km dapat ditentukan sesuai Persamaan (1), maka didapat:

$$R_{total} = 0,0896 \times 12,02$$

$$R_{total} = 1,077 \Omega$$

Setelah diketahui resistansi total, maka dapat dilakukan perhitungan untuk rugi-rugi daya pada tanggal 1 Mei pukul 10:00 WIB dan pukul 19:00 WIB sesuai Persamaan (2) sebagai berikut:

1. Perhitungan P_{losses} pada pukul 10:00 WIB

$$P_{losses} = 3 \times 220^2 \times 1,077 = 0,1563804 \text{ MW}$$

2. Perhitungan P_{losses} pada pukul 19:00 WIB

$$P_{losses} = 3 \times 273^2 \times 1,077 = 0,24080312 \text{ MW}$$

Setelah dihitung rugi-rugi daya pada pukul 10:00 WIB dan pukul 19:00 WIB, maka dapat ditentukan rata-rata rugi-rugi daya dan energi dalam sehari dengan menggunakan Persamaan (3) dan (4).

$$P_{losses} = \frac{0,1563804 + 0,24080312}{2} = 0,1985918 \text{ MW}$$

$$E_{losses}/hari = 0,1985918 \times 24 \text{ jam} = 4,766203 \text{ MWh}$$

Hasil perhitungan rugi-rugi daya pada tanggal 1 bulan Mei 2024 adalah sebesar 4,766203 MWh. Sementara itu, hasil perhitungan rugi-rugi daya selama sebulan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan rugi-rugi daya bulan Mei 2024

Tanggal	I (A) 10:00 WIB	P_{losses} 10:00 (MW)	I (A) 19:00 WIB	P_{losses} 19:00 (MW)	Rata-rata P_{losses} /jam (MW)	P_{losses} harian (MWh)
1	220	0,1563804	273	0,240803120	0,198591800	4,766203
2	223	0,1606744	265	0,226896975	0,193785687	4,650850
3	206	0,1371107	233	0,175407759	0,156259238	3,750222
4	349	0,3935390	412	0,548442864	0,470990948	11,303780
5	208	0,1397860	225	0,163569375	0,151677680	3,640260
6	212	0,1452141	253	0,206813079	0,176013572	4,224326
7	229	0,1694369	280	0,253310400	0,211373636	5,072967
8	235	0,1784320	279	0,251504271	0,214968123	5,159235
9	237	0,1814820	281	0,255122991	0,218302515	5,239260
10	225	0,1635694	274	0,242570556	0,203069966	4,873679
11	240	0,1861056	293	0,277378119	0,231741860	5,561805
12	247	0,1971201	296	0,283087296	0,240103688	5,762489
13	237	0,1814820	277	0,247911399	0,214696719	5,152721
14	240	0,1861056	290	0,271727100	0,228916350	5,493992
15	228	0,1679603	379	0,464104071	0,316032188	7,584773
16	231	0,1724094	282	0,256942044	0,214675718	5,152217
17	235	0,1784320	288	0,267992064	0,223212020	5,357088
18	358	0,4140979	395	0,504116775	0,459107330	11,018576
19	319	0,3287898	387	0,483903639	0,406346715	9,752321
20	226	0,1650266	256	0,211746816	0,188386686	4,521280
21	228	0,1679603	359	0,416414511	0,292187408	7,012498
22	229	0,1694369	278	0,249704604	0,209570738	5,029698
23	245	0,1939408	388	0,486407664	0,340174220	8,164181
24	241	0,1876597	283	0,258767559	0,223213635	5,357127
25	239	0,1845580	271	0,237287871	0,210922911	5,062150
26	476	0,7320671	609	1,198316511	0,965191784	23,164603
27	457	0,6747911	503	0,817472079	0,746131599	17,907158
28	455	0,6688978	513	0,850299039	0,759598407	18,230362
29	494	0,7884803	636	1,306926576	1,047703446	25,144883
30	455	0,6688978	601	1,167040431	0,917969103	22,031258
31	451	0,6571886	600	1,163160000	0,910174316	21,844184
Total P_{losses} selama sebulan					11,541090000	276,986160

Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui rata-rata rugi-rugi daya per hari sesuai persamaan (5).

$$P_{losses}/\text{hari} = \frac{\text{Total } P_{losses} \text{ sebulan (kWh)}}{31 \text{ hari}} = \frac{11541,09}{31} = 372,3 \text{ kW}$$

3.1.1 Perhitungan Kerugian Rupiah yang Diakibatkan Rugi-rugi Daya

GI Pekalongan dan GI Comal dalam kondisi normal mendapatkan sumber energi dari PLTU Batang atau *Central Java Power Plant*. Biaya pokok produksi (BPP) adalah biaya yang harus dikeluarkan oleh PT. PLN kepada pembangkit per kWh untuk menghasilkan listrik. Biaya pokok produksi pada bulan Mei 2024 adalah sebesar Rp. 1.151,91/kWh. PT. PLN (Persero) mengalami kerugian finansial dari penjualan energi listrik akibat kehilangan daya selama proses penyaluran energi listrik dari GI Pekalongan ke GI Comal. Kerugian biaya yang diakibatkan oleh hilangnya daya pada tanggal 1 dapat dihitung menggunakan dengan Persamaan (6).

$$\text{Biaya listrik} = 4,766203 \times 1000 \times 1.151,91 = \text{Rp } 5.490.236,9$$

Hasil perhitungan besar kerugian biaya selama Bulan Mei 2024 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Biaya Kerugian Bulan Mei 2024

Tanggal	P_{losses} (MWh)	Besar Kerugian (Rp)
1	4,766203	5.490.236,900
2	4,650856	5.357.360,620
3	3,750222	4.319.915,920
4	11,303783	13.020.937,200
5	3,640264	4.193.251,900
6	4,224326	4.866.043,036
7	5,072967	5.843.601,707
8	5,159235	5.942.974,334
9	5,239260	6.035.156,401
10	4,873679	5.614.039,775
11	5,561805	6.406.698,369
12	5,762489	6.637.868,128
13	5,152721	5.935.471,142
14	5,493992	6.328.584,785
15	7,584773	8.736.975,290
16	5,152217	5.934.890,538
17	5,357088	6.170.883,777
18	11,018576	12.692.407,770
19	9,752321	11.233.796,270
20	4,521280	5.208.108,179
21	7,012498	8.077.766,318
22	5,029698	5.793.759,078
23	8,164181	9.404.402,044
24	5,357127	6.170.928,439
25	5,062150	5.831.141,050
26	23,164603	26.683.537,620
27	17,907158	20.627.434,800
28	18,230362	20.999.736,020
29	25,144883	28.964.641,840
30	22,031258	25.378.026,950
31	21,844184	25.162.533,500
Total kerugian biaya selama Bulan Mei 2024		319.063.127,500

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa total kerugian biaya akibat rugi-rugi daya SUTT 150 kV Pekalongan-Comal selama bulan Mei 2024 mencapai Rp. 319.063.127,5. Sedangkan berdasarkan perkiraan penjualan energi listrik sepanjang saluran transmisi 150 kV Pekalongan-Comal selama bulan Mei 2024 adalah sebesar Rp. 70.198.380.790, sehingga persentase kerugian yang didapat dalam proses penyaluran adalah:

$$\text{Persentase kerugian} = \frac{319.063.127,5}{70.198.380.790} \times 100 \% = 0,45 \%$$

3.1.2 Perhitungan Jatuh Tegangan

Untuk mengetahui besarnya jatuh tegangan pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal dapat menggunakan Persamaan (7); sedangkan untuk mengetahui persentase jatuh tegangan dapat menggunakan Persamaan (8). Jatuh tegangan pada tanggal 1 Mei pukul 10:00 WIB adalah

$$\Delta V = 148 - 147 = 1 \text{ kV}$$

$$\Delta V (\%) = \frac{148-147}{147} \times 100 \% = 0,68 \%$$

Sedangkan jatuh tegangan pada pukul 19:00 WIB adalah

$$\Delta V = 147 - 147 = 0 \text{ kV}$$

$$\Delta V (\%) = \frac{147-147}{147} \times 100 \% = 0 \%$$

Rata-rata jatuh tegangan dalam satu hari dihitung menggunakan Persamaan (9).

$$\text{Drop Voltage } (\%) = \frac{0,68 \% + 0 \%}{2} = 0,34 \%$$

Jatuh tegangan selama bulan Mei 2024 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Jatuh Tegangan Bulan Mei 2024

Tanggal	GI 150 kV Pekalongan	GI 150 kV Comal	ΔV (%)		GI 150 kV Pekalongan	GI 150 kV Comal	ΔV (%)		Rata-rata jatuh tegangan/jam (%)
	V_s (kV)	V_r (kV)			V_s (kV)	V_r (kV)			
10.00 WIB				19.00 WIB					
1	148	147	1	0,68	147	147	0	0,00	0,340
2	148	147	1	0,68	147	147	0	0,00	0,340
3	149	149	0	0,00	149	148	1	0,68	0,340
4	146	146	0	0,00	147	146	1	0,68	0,340
5	147	147	0	0,00	147	147	0	0,00	0,000
6	148	148	0	0,00	148	148	0	0,00	0,000
7	148	147	1	0,68	148	147	1	0,68	0,680
8	150	149	1	0,67	149	148	1	0,68	0,675
9	148	148	0	0,00	149	148	1	0,68	0,340
10	148	147	1	0,68	149	148	1	0,68	0,680
11	149	148	1	0,68	148	148	0	0,00	0,340
12	148	147	1	0,68	149	148	1	0,68	0,680
13	147	147	0	0,00	148	148	0	0,00	0,000
14	146	146	0	0,00	147	147	0	0,00	0,000
15	149	149	0	0,00	148	148	0	0,00	0,000
16	147	147	0	0,00	147	147	0	0,00	0,000
17	147	147	0	0,00	147	146	1	0,68	0,340
18	146	146	0	0,00	147	146	1	0,68	0,340
19	148	148	0	0,00	148	147	1	0,68	0,340
20	147	146	1	0,68	147	146	1	0,68	0,680
21	148	147	1	0,68	148	148	0	0,00	0,340
22	146	145	1	0,69	149	149	0	0,00	0,345
23	147	146	1	0,68	148	147	1	0,68	0,680
24	149	148	1	0,68	148	147	1	0,68	0,680
25	149	148	1	0,68	149	148	1	0,68	0,680
26	146	144	2	1,39	147	146	1	0,68	1,035
27	150	148	2	1,35	149	147	2	1,36	1,355
28	150	148	2	1,35	149	147	2	1,36	1,355
29	148	147	1	0,68	148	146	2	1,37	1,025
30	151	149	2	1,34	148	146	2	1,37	1,355
31	150	149	1	0,67	147	145	2	1,38	1,025
Total rata-rata jatuh tegangan dalam bulan Mei 2024									16,330

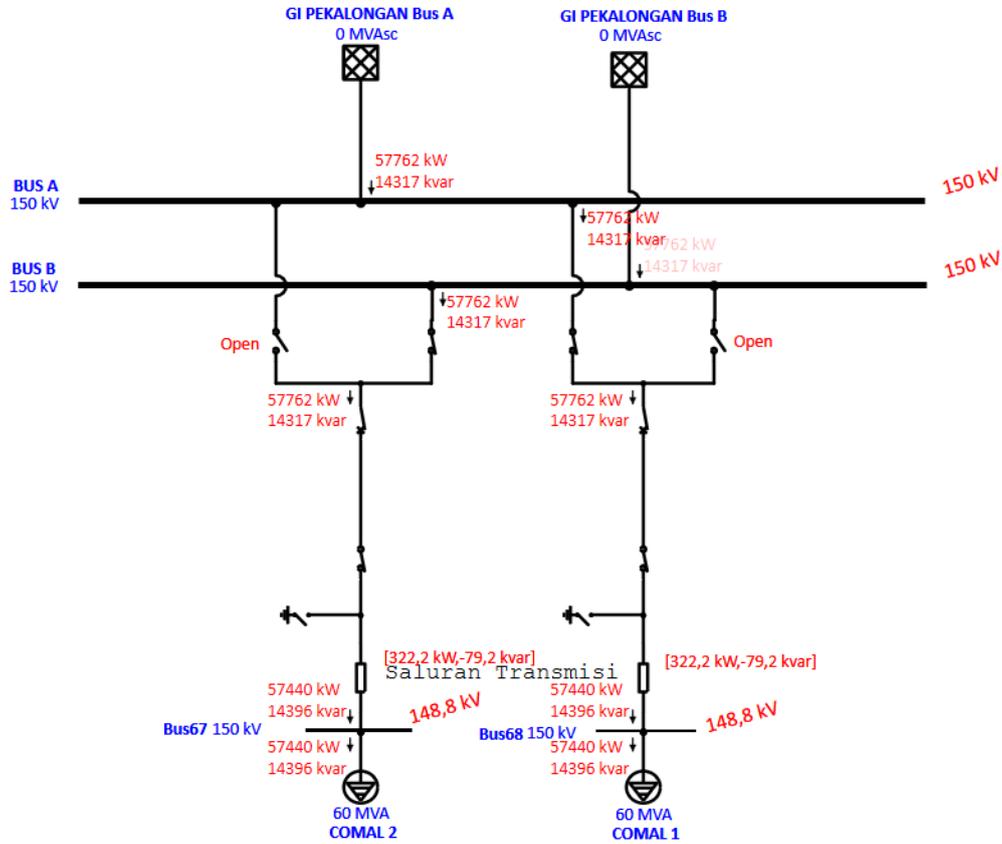
Berdasarkan Tabel 4 dapat diketahui rata-rata persentase jatuh tegangan per hari sesuai Persamaan (10).

$$\text{Rata - rata jatuh tegangan/hari} = \frac{\text{Total rata-rata jatuh tegangan}}{31 \text{ hari}} = \frac{16,33}{31} = 0,52 \%$$

3.2 Perhitungan Rugi-rugi daya dan Jatuh Tegangan secara Simulasi melalui Software ETAP 19.0.1

Berdasarkan simulasi melalui *software* ETAP dapat diketahui daya nyata yang dikirim dari Gardu Induk Pekalongan adalah sebesar 57.762 kW, namun terdapat *losses* dalam proses penyaluran yaitu sebesar 322,2 kW. Hal ini mengakibatkan daya yang diterima di Gardu Induk Comal menurun menjadi sebesar 57.440 kW. Pada Tabel 5 terdapat variabel MVAR merupakan daya reaktif yang berasal dari beban *Lump Load* dan digunakan

sebagai simulasi yang merepresentasikan beban di lapangan. Daya reaktif tersebut berasal dari saluran transmisi dan beban induktif di Gardu Induk Comal. Pada saluran transmisi terdapat induktansi pada penghantar sehingga menyebabkan peningkatan daya reaktif sebesar 79,2 kVAR sehingga berkontribusi terhadap peningkatan rugi-rugi daya aktif sepanjang saluran. Hasil perhitungan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan secara simulasi dengan *software* ETAP 19.0.1 dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 5.



Gambar 3. Hasil simulasi SUTT 150 kV Pekalongan-Comal

Tabel 5. Hasil Perhitungan dengan Menggunakan ETAP

ID	From - To Bus Flow		To - From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		V_d Drop %
	MW	MVAR	MW	MVAR	kW	kVAR	From	To	
Line Comal 1	-57,440	-14,396	57,762	14,317	322,2	-79,2	99,2	100	0,82
Line Comal 2	-57,440	-14,396	57,762	14,317	322,2	-79,2	99,2	100	0,82
Total					644,4	-158,5			1,64

3.2.1 Perbandingan Nilai Rugi-rugi Daya dan Jatuh Tegangan secara Manual dan Menggunakan *Software*

Perbandingan nilai rugi-rugi daya antara hasil perhitungan manual dan menggunakan *software* ETAP 19.0.1 ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perbandingan Perhitungan Secara Manual dengan Menggunakan *Software* ETAP 19.0.1

SUTT Comal	Perhitungan P_{losses} secara Manual (kW)	Perhitungan P_{losses} menggunakan simulasi <i>Software</i> ETAP 19.0.1 (kW)
Line 1	372,3	322,2
Line 2	372,3	322,2
Total	744,6	644,4

SUTT Comal	Perhitungan Jatuh Tegangan secara Manual (%)	Perhitungan Jatuh Tegangan dengan <i>Software</i> ETAP 19.0.1 (%)
Line 1	0,52	0,82
Line 2	0,52	0,82
Total	1,04	1,64

Tabel 6 menunjukkan adanya perbedaan hasil perhitungan secara manual dan menggunakan *software* ETAP. Hal ini disebabkan oleh tingkat detail dan kompleksitas model, metode perhitungan yang digunakan, dan kemampuan untuk mempertimbangkan berbagai faktor lingkungan dan operasional, selain itu juga komponen dan peralatan di lapangan tidak seterusnya berfungsi dengan stabil dan normal karena beban yang disalurkan fluktuatif. Hal itu menyebabkan perbedaan antara data lapangan dan simulasi melalui *software* ETAP. Berdasarkan Tabel 6 dapat diketahui bahwa jatuh tegangan masih dalam ambang batas toleransi SPLN yaitu kurang dari 10 %.

Pada hasil penelitian sebelumnya juga terdapat rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran transmisi 150 kV GI Pandean Lamper-Pudak Payung. Hal tersebut dikarenakan arus yang mengalir pada penghantar cukup tinggi yang menyebabkan resistansi meningkat. Dari beberapa hasil penelitian tersebut, rugi-rugi daya yang terjadi disebabkan oleh jarak saluran transmisi, beban yang fluktuatif, jatuh tegangan serta resistansi dan induktansi pada penghantar.

4. KESIMPULAN

Nilai rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal selama bulan Mei 2024 adalah sebesar 276.986,160 kWh dengan kerugian rupiah sebesar Rp. 319.063.127,5. Hasil menunjukkan bahwa ETAP 19.0.1 mampu digunakan sebagai simulasi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan. Hal ini dibuktikan dengan adanya nilai rugi-rugi daya hasil perhitungan manual sebesar 744,6 kW, sedangkan dari hasil simulasi ETAP 19.0.1 rugi-rugi daya sebesar 644,34 kW. Serta pada hasil perhitungan jatuh tegangan dan hasil simulasi melalui *software* ETAP 19.0.1 pada SUTT 150 kV Pekalongan-Comal menunjukkan hasil yang stabil karena masih dalam ambang batas toleransi SPLN yaitu kurang dari 10 %. Rugi-rugi daya yang terjadi pada SUTT 150 kV disebabkan oleh resistansi dan induktansi pada penghantar, jarak saluran, beban yang fluktuatif, serta kondisi lingkungan dan operasional. Dalam pengembangan penelitian selanjutnya, perlu dilakukan dengan perluasan cakupan, yaitu pada sistem interkoneksi yang terhubung dengan PLTU Batang.

REFERENSI

- [1] Engr. Alumona T. L, Nwosu Moses. O, Ezechukwu A. O, Chijioke Jonah, "Overview of Losses and Solutions in Power Transmission Lines," *Network and Complex Systems*, vol. 4, no. 8, hal. 24–31, 2014.
- [2] A. Azis, I. K. Pebrianti, "Analisis Penyaluran Daya Listrik pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dari PLTU Bukit Asam ke Gardu Induk Keramasan Palembang," *Jurnal Surya Energy*, vol. 3, no. 2, hal. 282–290, 2019. <https://doi.org/10.32502/jse.v3i2.1534>
- [3] H. Sujatmiko, "Analisis Kerugian Daya pada Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV di P.T. PLN (Persero) Penyaluran & Pusat Pengaturan Beban (P3B) Jawa Bali Regional Jawa Tengah & DIY Unit Pelayanan Transmisi Semarang," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 1, hal. 33–44, 2009.
- [4] Bayu Andik Anggoro, Sukarno Budi Utomo, Ida 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, hal. 80–85, 2020. <http://dx.doi.org/10.26623/elektrika.v12i2.2828>
- [5] N. Y. Siregar, B. Sirait, Purwoharjono, "Analisa Rugi-Rugi Daya pada Saluran Transmisi Tegangan 150 kV Di PT. PLN (Persero) Sistem Khatulistiwa," *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology*, vol. 8, no. 1, 2020. <https://dx.doi.org/10.26418/j3eit.v8i1.39015>
- [6] U. Khoirunnisa, B. Bayu Murti, and M. Budiyanto, "Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan pada Saluran Transmisi 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung," *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, vol. 2, no. 2, hal. 54–68, Jul. 2024. <https://doi.org/10.21063/jtv.2024.2.2.7>
- [7] N. K. Lal and Dr. S. E. Mubeen, "A Review on Load Flow Analysis," *International Journal of Innovative Research & Development*, vol. 3, no. 11, hal. 337–341, 2014.
- [8] A. Gustian Nigara dan Yohanes Primadiyono, "Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik pada Bagian Texturizing di PT Asia Pasific Fibers Tbk Kendal menggunakan Software ETAP Power Station 4.0," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, hal. 7–10, 2015. <https://doi.org/10.15294/jte.v7i1.8580>
- [9] R. Trialviano Bagus, D. Irawan, "Analisis Perbaikan Jatuh Tegangan Pada Gardu Induk Cerme Sistem Transmisi 150kV Menggunakan Aplikasi Digsilent," *Jurnal Ampere*, vol. 8, no. 01, hal. 10–21, 2023. <https://doi.org/10.31851/ampere.v8i1.11635>
- [10] S. A. Koesardhinata, A. H. Andriawan, G. Budiono, I. A. Wardah, "Analisa rugi-rugi daya pada Jaringan Transmisi 150 kV Gardu Induk Waru Bay Sidoarjo," *EL Sains*, vol. 5, no. 1, pp. 55–58, 2023. <https://doi.org/10.30996/elsains.v5i1.8826>