

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA DAN PENURUNAN TEGANGAN JARINGAN DISTRIBUSI KRL

Pandya Kyv Firjatullah Susanto, Ratnasari Nur Rohmah
Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Sistem distribusi daya antar gerbong pada Kereta Rel Listrik (KRL) berperan penting dalam menyalurkan energi listrik ke sistem bantu (auxiliary) pada setiap gerbong. Penyaluran daya melalui kabel antar gerbong dapat menimbulkan resistansi penghantar, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya yang memengaruhi kualitas distribusi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kabel distribusi daya antar gerbong KRL serta pengaruhnya terhadap resistansi penghantar, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan analisis teknis berdasarkan data hasil observasi lapangan dan dokumen teknis selama magang di bagian electrical design PT INKA. Data yang digunakan meliputi panjang kabel, luas penampang penghantar, jenis kabel, dan konfigurasi distribusi daya antar gerbong. Analisis dilakukan dengan menghitung resistansi penghantar berdasarkan karakteristik kabel distribusi, kemudian dilakukan simulasi load flow menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memperoleh profil tegangan, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resistansi tertinggi terdapat pada jalur AUX 2 sebesar 2,450 Ω , sedangkan resistansi terendah terdapat pada jalur AUX 6 sebesar 0,410 Ω . Hasil simulasi ETAP menunjukkan bahwa penurunan tegangan terbesar terjadi pada Main Feeder sebesar 0,41%, sedangkan rugi-rugi daya terbesar sebesar 0,10 kW juga terjadi pada Main Feeder. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik penghantar berpengaruh terhadap penurunan tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa panjang kabel dan luas penampang penghantar memengaruhi nilai resistansi pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL, sedangkan arus beban dan resistansi penghantar memengaruhi besarnya penurunan tegangan dan rugi-rugi daya.

Kata kunci: Distribusi daya, KRL, penurunan tegangan, resistansi penghantar, rugi-rugi daya.

Abstract

The inter-car power distribution system in Electric Rail Trains (KRL) plays an important role in supplying electrical energy to the auxiliary systems installed in each carriage. Power transmission through inter-car cables may result in conductor resistance, voltage drop, and power losses that affect the quality and efficiency of electrical power distribution. This study aims to analyze the characteristics of inter-car power distribution cables in KRL and their effects on conductor resistance, voltage drop, and power losses. The research employed a quantitative descriptive approach with technical analysis based on field observations and technical documents collected during an internship in the Electrical Design Division of PT INKA. The data included cable length, conductor cross-sectional area, cable type, and inter-car power distribution configuration. The analysis was conducted by calculating the conductor resistance based on the characteristics of the distribution cables, followed by a load flow simulation using ETAP software to obtain the voltage profile, voltage drop, and power losses of the power distribution system. The results showed that the highest conductor resistance was found in the AUX 2 line at 2.450 Ω , while the lowest resistance was observed in the AUX 6 line at 0.410 Ω . The ETAP

simulation indicated that the maximum voltage drop occurred in the Main Feeder at 0.41%, while the highest power loss of 0.10 kW also occurred in the Main Feeder. These results indicate that the characteristics of the conductors influence the voltage drop and power losses in the inter-car power distribution system of Electric Rail Trains (KRL). Furthermore, the study revealed that cable length and conductor cross-sectional area influence the conductor resistance of the inter-car power distribution system, while load current and conductor resistance determine the magnitude of voltage drop and power losses.

Keywords: *Conductor resistance, electric rail train, power distribution, power loss, voltage drop.*

1. PENDAHULUAN

Kereta Rel Listrik (KRL) merupakan salah satu moda transportasi modern yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga utama. Selain digunakan untuk sistem traksi, energi listrik pada KRL juga digunakan untuk menyuplai berbagai sistem bantu seperti pendingin udara, pencahayaan, sistem kontrol pintu, sistem informasi penumpang, dan berbagai perangkat elektronik lainnya. Oleh karena itu, diperlukan sistem distribusi daya yang andal untuk menjaga kestabilan suplai daya pada seluruh rangkaian kereta.

Sistem distribusi daya antar gerbong berfungsi menyalurkan energi listrik dari sumber utama menuju beban *auxiliary* pada setiap gerbong. Distribusi daya dilakukan menggunakan kabel dan konektor antar gerbong yang bekerja secara kontinu selama kereta beroperasi. Kondisi operasi yang dinamis seperti getaran, perubahan posisi gerbong, serta variasi beban listrik menyebabkan penghantar mengalami rugi-rugi daya dan penurunan tegangan (IEC, 2004).

Rugi-rugi daya terjadi akibat adanya resistansi penghantar yang dialiri arus listrik. Semakin besar arus beban dan resistansi penghantar, maka rugi-rugi daya yang terjadi juga akan semakin besar. Selain itu, resistansi penghantar juga menyebabkan terjadinya penurunan tegangan pada sistem distribusi daya. Penurunan tegangan yang terlalu besar dapat memengaruhi performa sistem *auxiliary* seperti pendingin udara, pencahayaan, dan sistem kontrol pada kereta (Gonen, 2016).

Penelitian mengenai sistem kelistrikan perkeretaapian telah banyak dilakukan, terutama pada analisis kualitas daya sistem traksi, kompensasi daya, serta evaluasi jaringan distribusi listrik pada sarana kereta api. Kaleybar dan Farshad (2016) meneliti strategi pengendalian kualitas daya pada sistem traksi AC, sedangkan Mughny dan Hariyanto (2020) menganalisis parameter arus, tegangan, dan daya pada instalasi listrik kereta api.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada sistem traksi dan distribusi daya utama. Kajian yang secara khusus membahas distribusi daya *auxiliary* antar

gerbong, terutama yang meninjau pengaruh karakteristik kabel terhadap resistansi penghantar, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya, masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik kabel distribusi daya antar gerbong KRL serta pengaruhnya terhadap resistansi penghantar, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi teknis yang berguna dalam upaya peningkatan efisiensi dan keandalan sistem distribusi daya pada sarana perkeretaapian.

2. METODE

Penelitian dilakukan melalui observasi lapangan dan studi dokumen teknis pada bagian *electrical design* di PT INKA. Data penelitian diperoleh dari dokumen teknis distribusi kabel KRL yang meliputi panjang kabel, luas penampang penghantar, jenis kabel, jalur distribusi daya, dan konfigurasi sambungan antar gerbong.

Data arus beban aktual pada setiap jalur distribusi tidak tersedia dalam dokumen teknis yang dapat diakses selama kegiatan magang. Oleh karena itu, analisis penurunan tegangan dan rugi-rugi daya pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan simulasi variasi arus beban untuk menggambarkan pengaruh perubahan arus terhadap kinerja distribusi daya antar gerbong.

Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi jalur distribusi daya antar gerbong berdasarkan dokumen *wiring* dan *routing* kabel. Selanjutnya dilakukan perhitungan resistansi penghantar menggunakan persamaan:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

dengan:

R = resistansi penghantar (Ω)

ρ = resistivitas penghantar ($\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$)

L = panjang kabel (m)

A = luas penampang kabel (mm^2)

Perhitungan resistansi penghantar digunakan untuk mengetahui pengaruh panjang kabel dan luas penampang terhadap hambatan penghantar pada sistem distribusi daya (Stevenson & Grainger, 2017).

Setelah nilai resistansi diperoleh, dilakukan perhitungan penurunan tegangan menggunakan persamaan:

$$\Delta V = I \cdot R \quad (2)$$

dengan:

ΔV = penurunan tegangan (V)

I = arus beban (A)

R = resistansi penghantar (Ω)

Sedangkan rugi-rugi daya dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{loss} = I^2 R \quad (3)$$

dengan:

P_{loss} = rugi-rugi daya (W)

I = arus beban (A)

R = resistansi penghantar (Ω)

Perhitungan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi distribusi daya pada sistem *auxiliary* KRL serta mengetahui pengaruh karakteristik penghantar terhadap kualitas distribusi daya listrik (Kaleybar & Farshad, 2016).

Hasil perhitungan kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang penghantar, luas penampang kabel, dan arus beban terhadap rugi-rugi daya serta penurunan tegangan pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL.

Selain perhitungan teoritis, penelitian ini juga menggunakan simulasi *load flow* pada perangkat lunak ETAP untuk memodelkan sistem distribusi daya pada satu gerbong KRL. Model simulasi terdiri atas sumber tegangan 380 V, *Main Breaker*, *Main Bus*, kabel distribusi, serta beban *auxiliary* yang meliputi HVAC, *Air Compressor*, *Lighting*, *Door System*, *Battery Charger*, *Passenger Information*

System (PIS), dan CCTV. Simulasi dilakukan untuk memperoleh profil tegangan, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi sebagai pendukung hasil analisis perhitungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Kabel Distribusi Antar Gerbong

Sistem distribusi daya antar gerbong pada KRL berfungsi menyalurkan energi listrik dari sumber utama menuju berbagai beban *auxiliary* yang tersebar pada setiap gerbong. Dalam proses penyaluran tersebut, kabel distribusi menjadi komponen penting karena berperan sebagai media penghantar arus listrik antar panel, antar peralatan, maupun antar gerbong. Karakteristik kabel, seperti panjang penghantar dan luas penampang, berpengaruh terhadap kualitas distribusi daya karena akan menentukan besar kecilnya resistansi penghantar, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya yang terjadi pada sistem distribusi (Gonen, 2016; Stevenson & Grainger, 2017).

Pada penelitian ini, karakteristik kabel distribusi daya antar gerbong dianalisis berdasarkan dokumen teknis instalasi kelistrikan KRL yang diperoleh selama kegiatan magang di bagian *electrical* PT INKA. Data yang digunakan meliputi panjang kabel dan luas penampang penghantar pada setiap jalur distribusi daya antar gerbong. Identifikasi karakteristik kabel dilakukan pada tujuh jalur distribusi *auxiliary*, yaitu AUX 1 sampai AUX 7, yang mewakili jalur distribusi daya pada rangkaian KRL.

Hasil identifikasi karakteristik kabel pada masing-masing jalur distribusi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Kabel Distribusi Antar Gerbong

Jalur AUX	Penampang (mm ²)	Panjang (m)
AUX 1	0,75	70,0
AUX 2	1,50	210,0
AUX 3	2,50	77,0
AUX 4	2,50	135,15
AUX 5	2,50	142,75
AUX 6	2,50	58,5
AUX 7	2,50	70,5

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa panjang kabel distribusi pada setiap jalur memiliki variasi yang cukup besar. Jalur dengan panjang kabel terpanjang adalah AUX 2 sepanjang 210 m, sedangkan kabel terpendek terdapat pada jalur AUX 6 sepanjang 58,5 m. Variasi panjang kabel tersebut

menunjukkan bahwa konfigurasi distribusi daya antar gerbong tidak seragam, karena setiap jalur memiliki kebutuhan penyaluran daya dan posisi beban yang berbeda pada rangkaian kereta.

Selain panjang kabel, luas penampang penghantar pada masing-masing jalur juga bervariasi. Jalur AUX 1 menggunakan kabel dengan luas penampang $0,75 \text{ mm}^2$, jalur AUX 2 menggunakan kabel $1,50 \text{ mm}^2$, sedangkan jalur AUX 3 hingga AUX 7 menggunakan kabel dengan luas penampang $2,50 \text{ mm}^2$. Perbedaan luas penampang ini menunjukkan bahwa pemilihan kabel pada sistem distribusi daya antar gerbong mempertimbangkan kebutuhan penghantaran arus, panjang jalur distribusi, serta fungsi beban yang disuplai.

Secara teoritis, panjang penghantar dan luas penampang merupakan dua parameter utama yang memengaruhi nilai resistansi kabel. Semakin panjang kabel yang digunakan, maka resistansi penghantar cenderung semakin besar, sedangkan penggunaan kabel dengan luas penampang yang lebih besar akan menurunkan resistansi penghantar pada material yang sama (Hayt et al., 2019; Gonen, 2016). Oleh karena itu, variasi karakteristik kabel pada Tabel 1 menunjukkan bahwa setiap jalur distribusi daya antar gerbong berpotensi memiliki nilai resistansi yang berbeda-beda.

Karakteristik kabel pada subbab ini menjadi dasar untuk analisis selanjutnya, yaitu perhitungan resistansi penghantar, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL. Dengan demikian, identifikasi panjang kabel dan luas penampang penghantar diperlukan untuk memahami pengaruh karakteristik penghantar terhadap kualitas distribusi daya pada rangkaian kereta.

3.2 Analisis Resistansi Penghantar

Resistansi penghantar merupakan salah satu parameter penting dalam sistem distribusi daya karena memengaruhi besarnya penurunan tegangan dan rugi-rugi daya pada penghantar (Gonen, 2016; Kaleybar & Farshad, 2016). Nilai resistansi dipengaruhi oleh karakteristik kabel, terutama panjang penghantar, luas penampang, dan jenis material penghantar. Pada penelitian ini, perhitungan resistansi dilakukan untuk mengetahui karakteristik hambatan listrik pada setiap jalur distribusi daya antar gerbong KRL berdasarkan data panjang kabel dan luas penampang penghantar yang telah diidentifikasi pada subbab sebelumnya.

Perhitungan resistansi penghantar dilakukan menggunakan Persamaan (1).

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai resistansi penghantar pada masing-masing jalur distribusi daya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Resistansi Penghantar

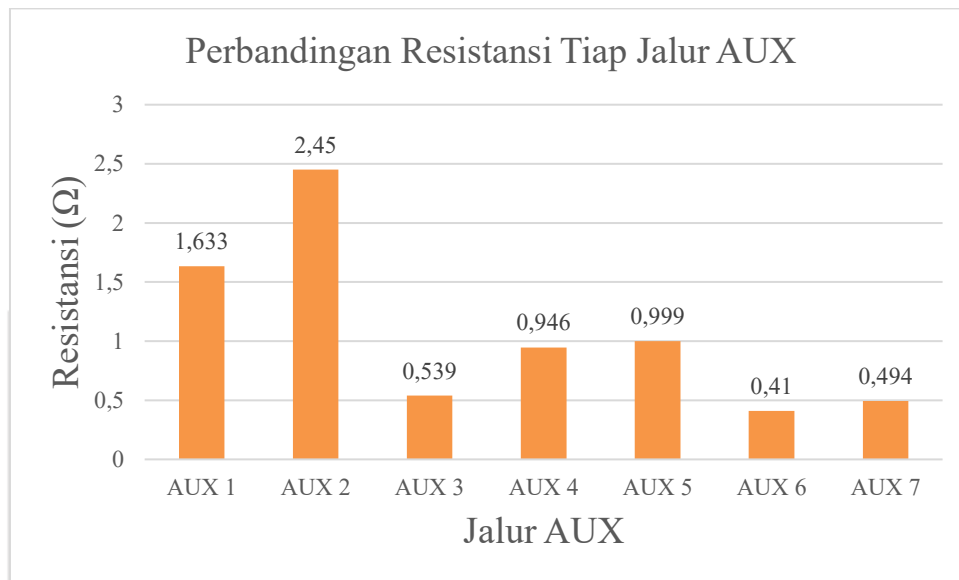
Jalur AUX	Penampang (mm²)	Panjang (m)	Resistansi (Ω)
AUX 1	0,75	70,0	1,633
AUX 2	1,50	210,0	2,450
AUX 3	2,50	77,0	0,539
AUX 4	2,50	135,15	0,946
AUX 5	2,50	142,75	0,999
AUX 6	2,50	58,5	0,410
AUX 7	2,50	70,5	0,494

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa nilai resistansi penghantar pada jalur distribusi daya antar gerbong memiliki variasi yang cukup besar. Nilai resistansi tertinggi terdapat pada jalur AUX 2 sebesar 2,450 Ω , sedangkan nilai resistansi terendah terdapat pada jalur AUX 6 sebesar 0,410 Ω . Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik penghantar pada setiap jalur distribusi memiliki pengaruh langsung terhadap besar kecilnya hambatan listrik yang terjadi pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL.

Jalur AUX 2 memiliki nilai resistansi tertinggi karena menggunakan kabel dengan panjang penghantar paling besar, yaitu 210 m, meskipun luas penampang kabel yang digunakan adalah 1,50 mm². Nilai resistansi yang tinggi pada jalur ini menunjukkan bahwa panjang penghantar akan meningkatkan hambatan listrik, terutama apabila tidak diimbangi dengan luas penampang kabel yang memadai. Sebaliknya, jalur AUX 6 memiliki resistansi terendah karena panjang kabelnya relatif pendek, yaitu 58,5 m, dengan luas penampang penghantar 2,50 mm², sehingga hambatan listrik yang terjadi menjadi lebih kecil.

Hasil penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa nilai resistansi pada setiap jalur distribusi tidak dapat ditinjau hanya berdasarkan panjang kabel, karena resistansi juga dipengaruhi oleh luas penampang penghantar. Sebagai contoh, jalur AUX 1 dan AUX 7 memiliki panjang kabel yang hampir sama, yaitu sekitar 70 m, tetapi nilai resistansinya berbeda cukup besar. Jalur AUX 1 memiliki resistansi sebesar 1,633 Ω , sedangkan jalur AUX 7 hanya sebesar 0,494 Ω . Perbedaan ini terjadi karena jalur AUX 1 menggunakan kabel dengan luas penampang 0,75 mm², sedangkan jalur AUX 7 menggunakan kabel dengan luas penampang 2,50 mm². Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kabel

dengan luas penampang yang lebih besar dapat menurunkan nilai resistansi meskipun panjang penghantar relatif serupa.



Gambar 1. Perbandingan Resistansi Penghantar pada Setiap Jalur AUX

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa nilai resistansi penghantar pada setiap jalur AUX memiliki variasi yang cukup besar. Jalur AUX 2 memiliki resistansi tertinggi sebesar 2,450 Ω , sedangkan jalur AUX 6 memiliki resistansi terendah sebesar 0,410 Ω . Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik kabel pada masing-masing jalur distribusi memberikan pengaruh terhadap besar kecilnya resistansi penghantar. Jika dikaitkan dengan data pada Tabel 1, nilai resistansi tersebut dipengaruhi oleh kombinasi panjang kabel dan luas penampang penghantar yang digunakan pada setiap jalur distribusi.

3.3 Analisis Penurunan Tegangan

Penurunan tegangan (*voltage drop*) merupakan salah satu parameter penting dalam sistem distribusi daya karena berpengaruh terhadap kualitas tegangan yang diterima oleh beban. Pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL, penurunan tegangan terjadi akibat adanya resistansi penghantar saat arus listrik mengalir melalui kabel distribusi. Semakin besar arus beban yang mengalir dan semakin tinggi resistansi penghantar, maka nilai penurunan tegangan yang terjadi juga akan semakin besar (Gonen, 2016; Hayt et al., 2019; Putri et al., 2024).

Analisis penurunan tegangan pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan simulasi variasi arus beban untuk menggambarkan pengaruh perubahan arus terhadap besarnya *voltage drop* pada sistem distribusi daya antar gerbong. Hasil perhitungan resistansi pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa jalur AUX 2 memiliki nilai resistansi terbesar, yaitu 2,450 Ω . Oleh karena itu,

jalur AUX 2 dipilih sebagai objek simulasi karena mewakili kondisi distribusi daya dengan potensi penurunan tegangan terbesar. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh karakteristik penghantar terhadap kualitas distribusi tegangan pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL.

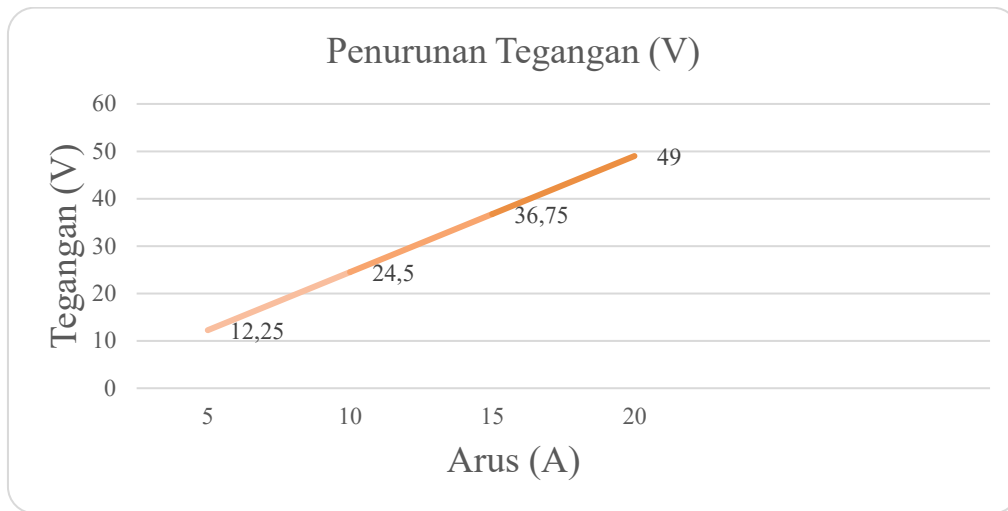
Penurunan tegangan dihitung menggunakan Persamaan (2).

Tabel 3. Simulasi Penurunan Tegangan pada Jalur AUX 2

Arus (A)	Resistansi (Ω)	Penurunan Tegangan (V)
5	2,450	12,25
10	2,450	24,50
15	2,450	36,75
20	2,450	49,00

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa nilai penurunan tegangan meningkat seiring bertambahnya arus beban yang mengalir pada penghantar. Pada arus 5 A diperoleh penurunan tegangan sebesar 12,25 V, sedangkan pada arus 20 A penurunan tegangan meningkat menjadi 49,00 V. Hasil tersebut menunjukkan bahwa besarnya arus beban memiliki pengaruh langsung terhadap nilai *voltage drop* yang terjadi pada sistem distribusi daya antar gerbong.

Peningkatan penurunan tegangan tersebut terjadi karena nilai resistansi penghantar dianggap konstan selama simulasi. Sesuai Hukum Ohm, penurunan tegangan berbanding lurus dengan arus yang mengalir pada penghantar. Dengan demikian, semakin besar arus beban yang dialirkan, maka semakin besar pula penurunan tegangan yang terjadi pada sistem distribusi daya (Hayt et al., 2019; Gonen, 2016).



Gambar 2. Hubungan Arus Beban terhadap Penurunan Tegangan pada Jalur AUX 2

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa hubungan antara arus beban dan penurunan tegangan membentuk pola linier. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan arus beban memberikan pengaruh yang proporsional terhadap kenaikan nilai penurunan tegangan. Dengan kata lain, apabila resistansi penghantar tetap, maka setiap kenaikan arus akan diikuti oleh kenaikan *voltage drop* secara sebanding. Temuan ini sesuai dengan teori sistem distribusi tenaga listrik yang menyatakan bahwa nilai penurunan tegangan pada penghantar dipengaruhi langsung oleh besarnya arus dan resistansi penghantar (Stevenson & Grainger, 2017; Gonen, 2016).

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa resistansi penghantar memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas distribusi tegangan pada sistem daya antar gerbong. Semakin besar arus beban yang mengalir pada penghantar, maka semakin besar pula nilai penurunan tegangan yang terjadi. Oleh karena itu, pemilihan karakteristik kabel yang sesuai, terutama dari sisi luas penampang penghantar terhadap panjang jalur distribusi, menjadi faktor penting untuk menjaga kualitas distribusi tegangan pada sistem kelistrikan KRL.

3.4 Analisis Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya (*power loss*) merupakan energi listrik yang hilang dalam bentuk panas akibat adanya resistansi penghantar pada sistem distribusi daya. Pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL, rugi-rugi daya terjadi ketika arus listrik mengalir melalui kabel distribusi yang memiliki hambatan tertentu. Besarnya rugi-rugi daya dipengaruhi oleh nilai arus beban dan resistansi penghantar. Semakin besar arus yang mengalir dan semakin tinggi resistansi kabel, maka rugi-rugi daya yang terjadi akan semakin besar (Gonen, 2016; Stevenson & Grainger, 2017; Widagdo et al., 2025).

Analisis rugi-rugi daya pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan simulasi variasi arus beban untuk menggambarkan pengaruh perubahan arus terhadap besarnya energi listrik yang hilang pada penghantar distribusi daya antar gerbong. Simulasi dilakukan pada jalur AUX 2 karena jalur tersebut memiliki resistansi paling tinggi, yaitu 2,450 Ω , sehingga mewakili kondisi distribusi daya dengan potensi rugi-rugi daya terbesar.

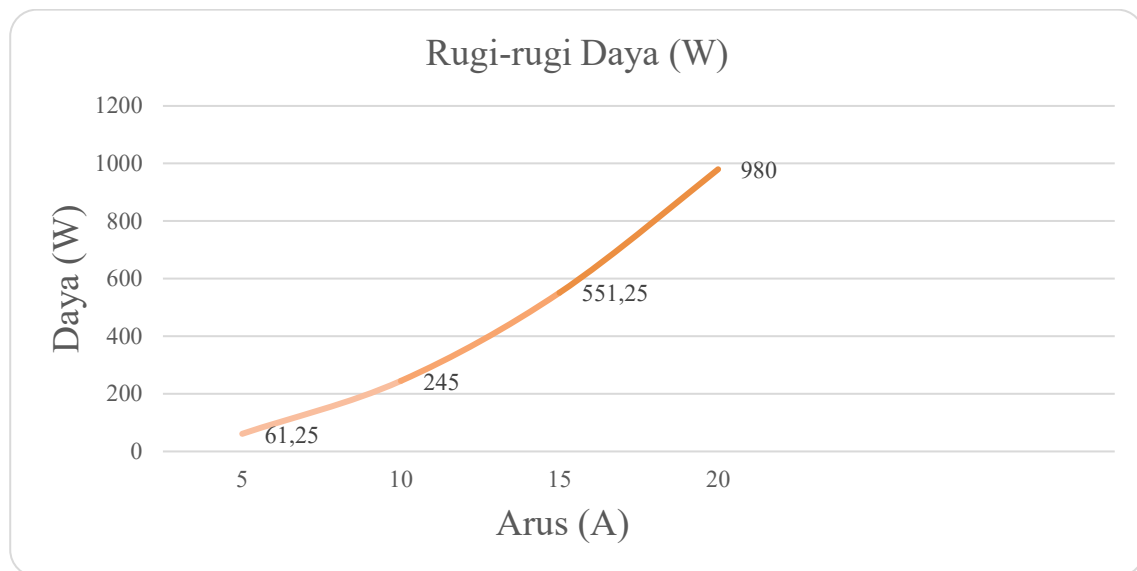
Rugi-rugi daya dihitung menggunakan Persamaan (3).

Tabel 4. Simulasi Rugi-Rugi Daya pada Jalur AUX 2

Arus (A)	Resistansi (Ω)	Rugi-Rugi Daya (W)
5	2,450	61,25
10	2,450	245,00
15	2,450	551,25
20	2,450	980,00

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa nilai rugi-rugi daya meningkat seiring bertambahnya arus beban yang mengalir pada penghantar. Pada arus 5 A diperoleh rugi-rugi daya sebesar 61,25 W, sedangkan pada arus 20 A nilai rugi-rugi daya meningkat menjadi 980,00 W. Hasil tersebut menunjukkan bahwa arus beban memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap besarnya energi listrik yang hilang selama proses distribusi daya.

Peningkatan rugi-rugi daya terjadi akibat adanya resistansi penghantar yang menyebabkan sebagian energi listrik berubah menjadi panas. Sesuai Persamaan (3), rugi-rugi daya berbanding lurus dengan kuadrat arus dan resistansi penghantar. Hal ini menyebabkan kenaikan arus akan menghasilkan kenaikan rugi-rugi daya yang lebih besar dibandingkan kenaikan penurunan tegangan. Sebagai contoh, ketika arus meningkat dari 10 A menjadi 20 A, arus hanya meningkat dua kali lipat, tetapi rugi-rugi daya meningkat dari 245,00 W menjadi 980,00 W atau empat kali lebih besar (Hayt et al., 2019; Gonen, 2016).



Gambar 3. Hubungan Arus Beban terhadap Rugi-Rugi Daya pada Jalur AUX 2

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa hubungan antara arus beban dan rugi-rugi daya membentuk pola kurva yang meningkat tajam. Kondisi ini menunjukkan bahwa rugi-rugi daya tidak meningkat secara linier, melainkan mengikuti hubungan kuadrat terhadap arus sesuai persamaan $P_{loss} = I^2 R$. Dengan demikian, arus beban menjadi parameter yang sangat menentukan besarnya energi yang hilang pada penghantar distribusi daya. Hasil ini sejalan dengan teori sistem distribusi tenaga listrik yang menyatakan bahwa rugi-rugi daya pada penghantar sangat dipengaruhi oleh arus yang mengalir dan nilai resistansi penghantar (Stevenson & Grainger, 2017; Gonen, 2016).

Untuk melengkapi analisis rugi-rugi daya, penelitian ini juga menggunakan data distribusi beban *auxiliary* yang diperoleh dari dokumen teknis sistem distribusi daya KRL selama kegiatan magang di bagian *Electrical Design* PT INKA. Dokumen tersebut memuat konfigurasi distribusi daya pada satu rangkaian KRL yang terdiri atas gerbong bermotor (*Motor Car/M*), gerbong trailer (*Trailer Car/T*), dan gerbong kabin (*Trailer Cab/TC*). Masing-masing jenis gerbong memiliki komponen kontrol dan proteksi yang memperoleh suplai daya melalui sistem distribusi antar gerbong. Data ini digunakan sebagai informasi pendukung untuk menjelaskan bahwa hasil analisis rugi-rugi daya berkaitan langsung dengan proses penyaluran daya menuju beban *auxiliary* pada setiap gerbong.

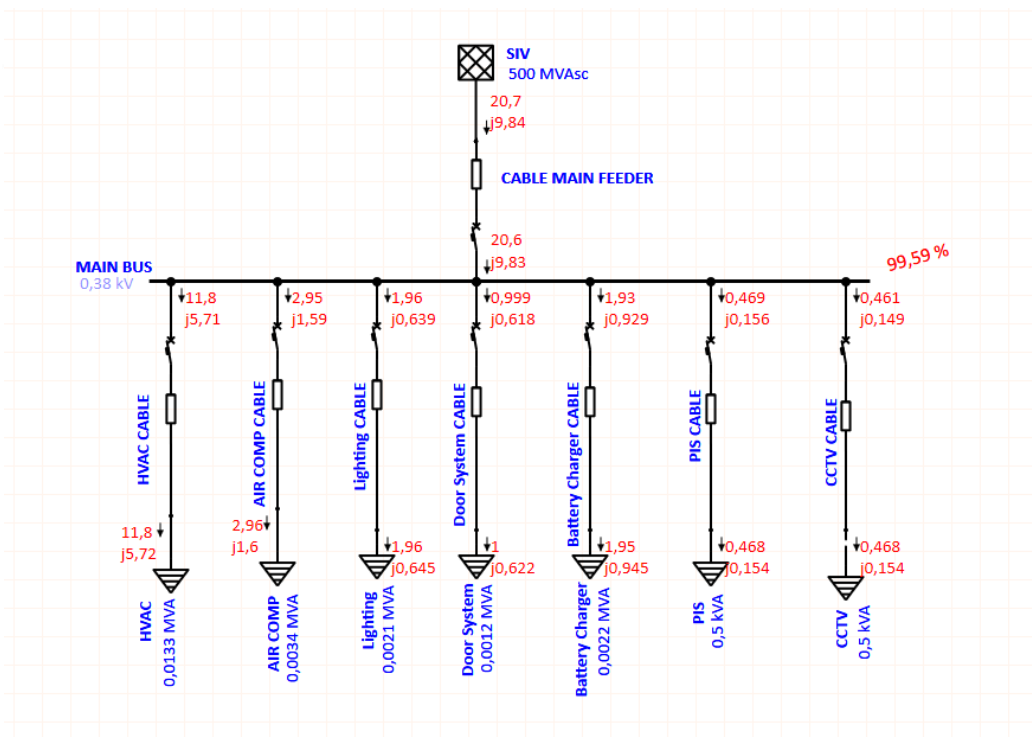
Berdasarkan data tersebut, total daya komponen kontrol dan proteksi pada gerbong M1–M2 tercatat sebesar 62,28 W, pada gerbong T1 & T1', T2, dan T3 sebesar 55,48 W, serta pada gerbong TC1 dan TC2 sebesar 54,68 W. Data ini menunjukkan bahwa sistem distribusi antar gerbong tidak hanya berfungsi sebagai jalur penghantar daya, tetapi juga mendukung suplai energi bagi beban *auxiliary* yang berperan dalam pengoperasian rangkaian KRL.

Dalam kaitannya dengan hasil simulasi, rugi-rugi daya pada penghantar perlu diperhatikan karena akan memengaruhi efisiensi penyaluran daya menuju komponen-komponen tersebut. Semakin besar resistansi penghantar dan arus beban yang mengalir, maka semakin besar pula energi listrik yang hilang selama proses distribusi daya. Oleh karena itu, pemilihan karakteristik kabel yang sesuai menjadi penting untuk menekan rugi-rugi daya, sehingga energi listrik dapat disalurkan secara lebih efisien ke beban *auxiliary* pada setiap gerbong.

Secara keseluruhan, hasil simulasi rugi-rugi daya pada penelitian ini menegaskan bahwa karakteristik penghantar memiliki peranan penting dalam efisiensi sistem distribusi daya antar gerbong KRL. Jalur distribusi dengan resistansi yang lebih besar akan menghasilkan rugi-rugi daya yang lebih tinggi, terutama ketika arus beban meningkat. Oleh karena itu, penyesuaian luas penampang penghantar terhadap panjang jalur distribusi menjadi salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan kualitas distribusi daya pada sistem *auxiliary* KRL.

3.5 Simulasi Sistem Distribusi Daya Menggunakan ETAP

Untuk melengkapi hasil analisis perhitungan, penelitian ini juga melakukan simulasi sistem distribusi daya menggunakan perangkat lunak ETAP. Simulasi dilakukan dengan metode *load flow* menggunakan model sistem distribusi daya pada satu gerbong KRL yang terdiri atas sumber tegangan, *Main Breaker*, *Main Bus*, kabel distribusi, dan beban *auxiliary*. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui profil tegangan, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi daya.



Gambar 4. One-line diagram sistem distribusi daya menggunakan ETAP

Tabel 5. Hasil Simulasi *Load Flow* Menggunakan ETAP

Parameter	Nilai
Total Beban	21,0 kW
Tegangan Sumber	380 V (100%)
Tegangan <i>Main Bus</i>	378,44 V (99,59%)
Penurunan Tegangan Maksimum	0,41%
Penurunan Tegangan Minimum	0,04%
Rugi-rugi Daya Aktif Total	0,10 kW
Rugi-rugi Daya Reaktif Total	0,00 kvar

Berdasarkan hasil simulasi ETAP pada Tabel 5, sistem distribusi daya memiliki total beban sebesar 21,0 kW dengan tegangan *Main Bus* sebesar 378,44 V atau 99,59% dari tegangan sumber 380 V. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan tegangan terbesar terjadi pada *Main Feeder* sebesar 0,41%, Penurunan tegangan pada jalur distribusi menuju beban berada pada rentang 0,04% hingga 0,25%, dengan nilai terbesar terjadi pada jalur menuju beban HVAC sebesar 0,25% dan nilai terkecil pada jalur menuju beban PIS sebesar 0,04%. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa karakteristik penghantar dan besarnya arus yang mengalir pada setiap jalur distribusi memengaruhi penurunan tegangan pada sistem distribusi daya.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa rugi-rugi daya aktif terbesar terjadi pada *Main Feeder* sebesar 0,10 kW, sedangkan rugi-rugi daya pada jalur distribusi menuju masing-masing beban ditampilkan sebesar 0,00 kW karena nilainya sangat kecil sehingga dibulatkan oleh perangkat lunak ETAP. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa rugi-rugi daya lebih dominan terjadi pada jalur utama yang menyalurkan daya menuju seluruh beban *auxiliary* dibandingkan pada jalur distribusi menuju masing-masing beban.

Secara keseluruhan, hasil simulasi ETAP menunjukkan bahwa sistem distribusi daya pada satu gerbong KRL memiliki profil tegangan yang relatif merata dengan penurunan tegangan terbesar sebesar 0,41% dan rugi-rugi daya terbesar sebesar 0,10 kW pada *Main Feeder*.

3.6 Evaluasi Sistem Distribusi Daya Antar Gerbong Kereta Rel Listrik

Berdasarkan hasil perhitungan teoritis dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP, sistem distribusi daya antar gerbong KRL menunjukkan bahwa karakteristik penghantar memiliki pengaruh terhadap nilai resistansi, penurunan tegangan, dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi. Jalur distribusi dengan panjang penghantar yang lebih besar dan luas penampang yang lebih kecil cenderung menghasilkan nilai resistansi yang lebih tinggi sehingga meningkatkan penurunan tegangan dan rugi-rugi daya pada penghantar.

Hasil simulasi ETAP mendukung hasil analisis teoritis dengan menunjukkan bahwa penurunan tegangan terbesar terjadi pada *Main Feeder* sebesar 0,41%, sedangkan rugi-rugi daya aktif terbesar sebesar 0,10 kW juga terjadi pada *Main Feeder*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jalur utama memiliki kontribusi terbesar terhadap penurunan tegangan dan rugi-rugi daya karena menjadi jalur penyaluran daya menuju seluruh beban *auxiliary* pada sistem distribusi.

Dengan demikian, hasil simulasi ETAP memperkuat hasil analisis perhitungan bahwa karakteristik penghantar berpengaruh terhadap kualitas tegangan dan efisiensi penyaluran daya pada sistem distribusi daya antar gerbong KRL.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil analisis sistem distribusi daya antar gerbong Kereta Rel Listrik (KRL), dapat disimpulkan bahwa karakteristik kabel berupa panjang penghantar dan luas penampang memiliki pengaruh terhadap nilai resistansi penghantar pada setiap jalur distribusi daya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai resistansi tertinggi terdapat pada jalur AUX 2 sebesar 2,450 Ω , sedangkan resistansi terendah terdapat pada jalur AUX 6 sebesar 0,410 Ω . Perbedaan nilai resistansi tersebut menunjukkan bahwa panjang jalur distribusi dan luas penampang penghantar menjadi faktor utama yang menentukan besar kecilnya hambatan listrik pada sistem distribusi daya antar gerbong.

Hasil simulasi ETAP menunjukkan bahwa penurunan tegangan terbesar terjadi pada *Main Feeder* sebesar 0,41%, sedangkan rugi-rugi daya terbesar sebesar 0,10 kW juga terjadi pada *Main Feeder*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jalur utama memberikan kontribusi terbesar terhadap penurunan tegangan dan rugi-rugi daya karena menjadi lintasan distribusi energi menuju seluruh beban *auxiliary*. Dengan demikian, hasil simulasi ETAP memperkuat hasil analisis teoritis bahwa karakteristik penghantar dan besarnya arus beban memengaruhi kualitas distribusi daya pada sistem distribusi antar gerbong KRL.

Secara umum, penelitian ini menunjukkan bahwa penyesuaian luas penampang penghantar terhadap panjang jalur distribusi merupakan faktor penting dalam perancangan sistem distribusi daya

antar gerbong KRL. Penggunaan kabel dengan karakteristik yang sesuai dapat menjadi salah satu upaya untuk menekan resistansi penghantar, mengurangi penurunan tegangan, dan meminimalkan rugi-rugi daya sehingga kualitas distribusi daya pada sistem *auxiliary* dapat ditingkatkan.

DAFTAR PUSTAKA

- BSI. (2007). BS EN 50155:2007 Railway applications—Electronic equipment used on rolling stock. British Standards Institution.
- Gonen, T. (2016). *Electric power distribution engineering (3rd ed.)*. CRC Press.
- International Electrotechnical Commission. (2004a). *IEC 60077-1: Railway applications—Electric equipment for rolling stock—Part 1: General service conditions and general rules*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2004b). *IEC 60077-2: Railway applications—Electric equipment for rolling stock—Part 2: Electrotechnical components—General rules*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2004c). *IEC 60077-3: Railway applications—Electric equipment for rolling stock—Part 3: Electrotechnical components—Rules for DC circuit-breakers*. IEC.
- Kaleybar, H. J., & Farshad, S. (2016). *A comprehensive control strategy of railway power quality compensator for AC traction power supply systems*. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(6), 4582–4603. <https://doi.org/10.3906/elk-1404-250>
- Mughny, W. A., & Hariyanto, N. (2020). *Studi arus, tegangan, dan daya pada instalasi listrik Kereta Api Turangga*. Institut Teknologi Nasional Bandung / e-Proceeding Fakultas Teknologi Industri.
- Stevenson, W. D., & Grainger, J. J. (2017). *Power system analysis*. McGraw-Hill Education.
- UIC. (2001). *Recommendations concerning electric power supply systems for railway rolling stock*. International Union of Railways.
- Putri, M., et al. (2024). *Stabilizing voltage and managing power loss in medium-voltage distribution systems during feeder maneuvering*. *International Journal of Electrical Engineering Research*.
- Widagdo, R. S., Kastiawan, I. M., Tauladan, I. S., & Hermawan, I. B. (2025). *Voltage Regulation and Power Loss Analysis on 500 kV EHV Transmission Line Krian-Grati*. *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, 8(1), 40–54.