

Optimalisasi Daya Listrik Dengan Meminimalisasi Rugi Daya Distribusi Pada Kereta Passenger Coach Menggunakan Metode Feed Forward Neural Network

Bima Aditya Dwi Syah Putra ¹, Unit Three Kartini ², I Gusti Putu Asto Buditjahjanto ³,
Subuh Isnur Haryudo ⁴

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

Email : bima.4071@mhs.unesa.ac.id , unitthree@unesa.ac.id, asto@unesa.ac.id,
subuhisnur@unesa.ac.id

Abstract (English)

The electrical system in passenger train coaches plays a crucial role in supporting comfort and smooth operation. One of the main issues in this system is power loss caused by suboptimal electricity distribution. This study aims to optimize power distribution to minimize power losses using the Feed Forward Neural Network (FFNN) method. The model is trained using parameters such as voltage, current, electrical load of each coach, and actual power loss to generate optimal power values according to the system's load conditions. The simulation results show that this method can optimize the average power from 23379,90 W to 22746,72 W, with a difference of approximately $\pm 2.71\%$ compared to the actual average power. This approach demonstrates that FFNN can be utilized as a solution in the power distribution optimization process for passenger train electrical systems.

Article History

Submitted: 17 Juni 2025

Accepted: 22 Juni 2025

Published: 23 Juni 2025

Key Words

Power Loss, Power Optimization, Feed Forward Neural Network.

Abstrak (Indonesia)

Sistem kelistrikan pada gerbong kereta penumpang memiliki peranan penting dalam menunjang kenyamanan serta kelancaran operasional. Salah satu permasalahan utama dalam sistem ini adalah terjadinya rugi-rugi daya akibat distribusi energi listrik yang belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimalisasi distribusi daya listrik guna meminimalkan rugi daya menggunakan metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN). Model dilatih dengan parameter berupa tegangan, arus, beban listrik tiap gerbong, dan rugi daya aktual, untuk menghasilkan nilai daya optimal yang sesuai dengan kondisi beban sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini mampu mengoptimalkan rata-rata daya dari 23379,90 W menjadi 22746,72 W, dengan selisih sebesar $\pm 2,71\%$ terhadap rata-rata daya aktual. Pendekatan ini menunjukkan bahwa FFNN dapat dimanfaatkan sebagai solusi dalam proses optimalisasi distribusi daya listrik pada sistem kelistrikan kereta penumpang.

Sejarah Artikel

Submitted: 17 Juni 2025

Accepted: 22 Juni 2025

Published: 23 Juni 2025

Kata Kunci

Rugi Daya, Optimalisasi Daya, *Feed Forward Neural Network*.

PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan pada kereta penumpang modern memegang peran sentral dalam mendukung operasional berbagai perangkat seperti penerangan, sistem komunikasi, AC, hingga fasilitas hiburan dan keselamatan. Keandalan sistem ini menjadi krusial, karena gangguan kecil sekalipun dapat berimplikasi langsung pada kenyamanan dan keselamatan penumpang. Salah satu permasalahan teknis yang umum terjadi adalah rugi daya (*power loss*) dan jatuh tegangan (*voltage drop*) yang menyertai proses distribusi listrik dari sumber utama yakni kereta pembangkit menuju beban-beban di setiap gerbong. Rugi daya yang tinggi tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga dapat mempercepat degradasi komponen serta mengurangi umur operasional sistem kelistrikan kereta.

Seiring bertambahnya fasilitas kelistrikan pada kereta penumpang, tantangan dalam pengelolaan distribusi daya juga meningkat. Distribusi yang tidak seimbang dan pengaruh karakteristik kabel seperti panjang serta resistansi menjadi faktor dominan penyebab rugi daya. Dalam beberapa kasus, rendahnya faktor daya juga memperbesar jatuh tegangan sehingga

mengganggu stabilitas sistem. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan distribusi tenaga listrik yang tidak hanya efisien tetapi juga adaptif terhadap variasi beban dan kondisi sistem. Salah satu pendekatan yang relevan adalah dengan menerapkan metode berbasis kecerdasan buatan untuk memetakan, menganalisis, dan mengoptimalkan distribusi daya listrik secara prediktif dan adaptif.

Feed Forward Neural Network (FFNN) merupakan salah satu arsitektur jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Network/ANN*) yang dapat digunakan untuk memodelkan sistem kelistrikan secara nonlinier. Berbagai studi telah menunjukkan efektivitas FFNN dalam menyelesaikan masalah prediksi dan optimasi, termasuk dalam sistem distribusi energi. Beberapa penelitian sebelumnya juga telah menerapkan pendekatan ini untuk mengurangi rugi daya, memperbaiki profil tegangan, dan menentukan penempatan kapasitor secara optimal pada sistem distribusi. Meski demikian, penerapan spesifik metode ini pada sistem kelistrikan kereta penumpang di Indonesia, khususnya untuk mendukung proyek pengadaan 612 unit kereta stainless steel generasi baru oleh PT INKA dan PT KAI, masih sangat terbatas.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimalisasi daya listrik dengan minimalisasi rugi daya distribusi pada sistem kelistrikan kereta passenger coach menggunakan metode *Feed Forward Neural Network*. Fokus utama dari penelitian ini adalah bagaimana memanfaatkan hasil minimalisasi rugi daya sebagai acuan untuk menentukan daya optimal yang seharusnya disuplai ke tiap gerbong kereta. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh model distribusi daya yang efisien dan akurat, yang sesuai dengan karakteristik kelistrikan aktual dari sistem kereta satu trainset yang terdiri dari berbagai tipe gerbong seperti K1 (gerbong penumpang), M1 (gerbong makan), dan P1 (gerbong pembangkit).

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada sistem kelistrikan satu rangkaian kereta (*trainset*) tipe 612 generasi baru, dengan fokus pada analisis rugi daya aktif akibat hambatan kabel distribusi. Data yang digunakan meliputi tegangan, arus, kapasitas daya, panjang dan resistansi kabel, serta beban listrik masing-masing gerbong. Penelitian ini tidak membahas efisiensi peralatan elektronik, inverter, maupun rugi daya akibat arus harmonik. Simulasi dilakukan dalam lingkungan MATLAB menggunakan arsitektur FFNN untuk memprediksi daya optimal sebagai solusi dari minimisasi rugi daya distribusi.

Melalui hasil penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai potensi pengurangan rugi daya pada sistem distribusi kelistrikan kereta, sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan teknis pada proyek pengadaan dan pengoperasian kereta masa depan. Hasil simulasi yang valid dan andal juga dapat digunakan untuk mendukung implementasi sistem distribusi listrik yang hemat energi, meningkatkan keandalan suplai, serta memperpanjang umur sistem kelistrikan kereta penumpang di Indonesia.

Rugi Daya dalam Proses Distribusi

Rugi daya dalam sistem distribusi listrik merupakan kehilangan energi yang terjadi akibat hambatan listrik pada konduktor dan elemen jaringan lainnya selama proses penyaluran daya dari sumber ke beban. Energi yang hilang ini umumnya muncul dalam bentuk panas sebagai akibat dari aliran arus melalui konduktor, dan dapat memengaruhi performa serta efisiensi sistem secara keseluruhan. Masalah ini menjadi lebih signifikan dalam sistem distribusi kereta penumpang yang memiliki panjang kabel cukup besar dan beban listrik bervariasi di setiap gerbong.

Menurut standar IEC 60364-8-1 tentang efisiensi energi dalam instalasi listrik, batas maksimum rugi daya yang diperbolehkan dalam suatu sistem distribusi adalah sebesar 5%. Standar ini mendorong penerapan prinsip efisiensi energi, yang salah satunya dilakukan dengan pemilihan konduktor yang sesuai, optimalisasi konfigurasi distribusi, serta pengelolaan beban secara rasional.

Rugi daya dalam konduktor dapat dihitung menggunakan formulasi matematis berdasarkan hubungan antara arus listrik dan resistansi. Secara umum, rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan dasar sebagai berikut:

$$P_{losses} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

Pada penerapan Persamaan 1 tersebut, rugi daya dinyatakan dalam satuan watt, dengan arus listrik (I) dalam satuan ampere dan resistansi (R) dalam satuan ohm. Untuk menyatakan rugi daya dalam satuan kilowatt (kW), rumus tersebut dapat dikonversi menjadi:

$$P_{losses} = \frac{I^2 \cdot R}{1000} \quad (2)$$

Lebih lanjut, resistansi konduktor R dapat dihitung berdasarkan sifat material konduktor, panjang penghantar, dan luas penampang kabel, sebagaimana dijelaskan pada persamaan berikut:

$$P_{losses} = \frac{I^2}{1000} \times \frac{\rho \times \ell}{A \times 10^{-6}} \quad (3)$$

Resistansi (R) dihitung dari hambatan jenis (ρ) dikalikan panjang kabel (ℓ), dibagi luas penampang (A) dalam mm² untuk mempermudah perhitungan praktis. Untuk memperoleh arus listrik dari data daya aktual, rumus perhitungan arus pada sistem tiga fasa dapat digunakan sebagai berikut:

$$I = \frac{P}{V \times \sqrt{3} \times \cos\phi} \quad (4)$$

$$P_{losses} = 1000 \times \frac{I^2 \times \rho \times \ell}{A} \quad (5)$$

$$P_{losses}(\%) = \frac{P_{losses}}{P_{demand}} \times 100 \quad (6)$$

Dimana:

P losses = Rugi daya aktif (kW)

I = Arus listrik (A)

ρ = Hambatan jenis material konduktor (Ωm)

ℓ = Panjang kabel (m)

A = Luas penampang kabel (mm²)

Feed Forward Neural Network

Salah satu jenis *Artificial Neural Network* (ANN) yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Feed Forward Neural Network* (FFNN). FFNN memiliki karakteristik aliran data satu arah dari lapisan input ke lapisan output tanpa adanya umpan balik atau loop. Model ini dikenal sederhana namun efektif dalam menangani berbagai persoalan prediksi dan klasifikasi, termasuk dalam konteks optimalisasi sistem kelistrikan. Kemampuannya dalam mengaproksimasi fungsi nonlinier menjadikan FFNN cocok digunakan untuk menganalisis pola distribusi daya dan meminimalkan rugi daya listrik.

Struktur FFNN terdiri atas tiga komponen utama: lapisan input, satu atau lebih lapisan tersembunyi (*hidden layers*), dan lapisan output. Pada tahap pelatihan, jaringan dilatih menggunakan dataset yang terdiri dari parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, panjang kabel, dan resistansi. Setiap parameter diolah melalui proses pembobotan dan aktivasi hingga menghasilkan keluaran berupa daya optimal. Fungsi aktivasi yang digunakan antara lain *tansig* untuk *hidden layer* dan *purelin* untuk *output layer*. Proses pelatihan dilakukan dengan algoritma *Levenberg-Marquardt* (*trainlm*) karena kemampuannya yang cepat dalam konvergensi.

$$o = \phi \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i + \dots + x_n w_n + b \right) \quad (7)$$

Dimana:

x = Input

w = Bobot Input

o = Output

$\emptyset$ = Fungsi Aktivasi

b = Bias

i = Total Input

Minimalisasi Rugi Daya

Rugi daya merupakan aspek krusial dalam sistem distribusi tenaga listrik karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi dan keandalan pasokan. Rugi-rugi ini umumnya timbul akibat resistansi kabel distribusi yang dilalui arus, mengakibatkan sebagian energi listrik berubah menjadi panas. Dalam sistem distribusi yang kompleks dengan banyak cabang, rugi daya total dihitung sebagai penjumlahan rugi daya pada tiap cabang. Persamaan matematis yang merepresentasikan fungsi objektif minimisasi rugi daya dituliskan sebagai:

$$\min P_{losses} = \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_i \quad (8)$$

Dimana:

n = Jumlah Cabang Distribusi

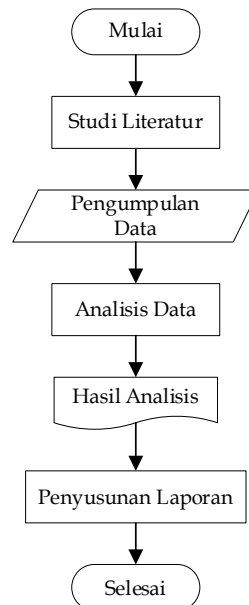
I_i = Arus Pada Cabang Ke- i

R_i = Resistansi Pada Cabang Ke- i

Fungsi objektif dalam optimasi sistem distribusi daya menunjukkan bahwa rugi-rugi daya cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya arus yang mengalir atau tingginya resistansi pada jalur distribusi. Oleh karena itu, strategi optimasi dapat diarahkan pada upaya pengurangan arus, misalnya melalui redistribusi beban, atau penurunan resistansi dengan mengganti konduktor menggunakan material atau ukuran penampang yang lebih baik [10]. Selain itu, pendekatan berbasis kecerdasan buatan seperti Artificial Neural Network (ANN) juga dapat diterapkan untuk memprediksi dan menyesuaikan parameter sistem secara adaptif, sehingga rugi-rugi daya dapat ditekan seminimal mungkin sesuai kondisi operasional sistem yang berubah-ubah.

METODE

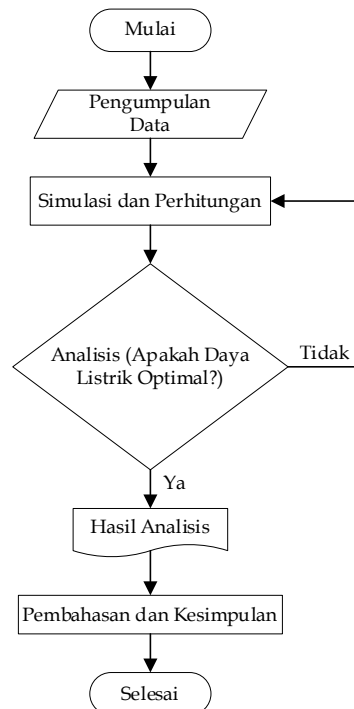
Penelitian ini merupakan studi kuantitatif yang berfokus pada pengumpulan dan analisis data numerik seperti tegangan, rugi daya, dan parameter teknis lainnya dalam sistem kelistrikan kereta penumpang. Metode *Feed Forward Neural Network* digunakan untuk mengoptimalkan variabel-variabel tersebut, sehingga memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap hubungan antara faktor-faktor yang mempengaruhi kondisi tegangan dan rugi daya. Data yang digunakan diperoleh melalui hasil pengukuran langsung pada sistem kelistrikan untuk mendukung pemodelan dan pengambilan keputusan berbasis data.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mengkaji berbagai referensi terkait sistem kelistrikan kereta dan metode optimasi daya yang relevan. Tahap ini bertujuan memperoleh landasan teori yang kuat serta memahami pendekatan yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data yang mencakup parameter teknis seperti tegangan, arus, kapasitas daya, daya keluaran, panjang kabel, resistansi kabel, dan beban listrik pada setiap gerbong. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung pada rangkaian kereta *passenger coach* tipe 612 *new generation replacement*, studi literatur, serta wawancara dengan divisi terkait guna memperoleh rincian spesifikasi sistem kelistrikan. Data diperoleh dari 11 gerbong, dengan pengambilan dilakukan setiap 15 menit mulai pukul 08.00 hingga 10.00 WIB.

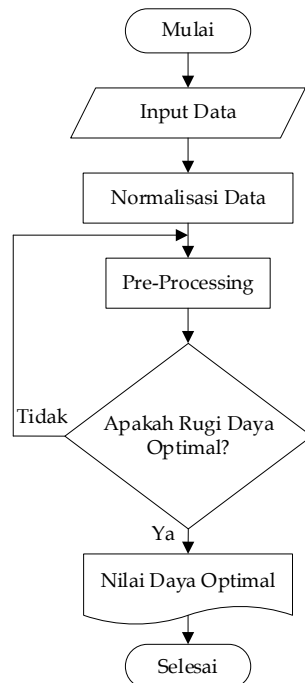
Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) untuk memodelkan hubungan antara input berupa tegangan, arus, beban, dan rugi daya dengan output berupa daya optimal pada masing-masing gerbong. Proses ini bertujuan menemukan pola distribusi daya yang optimal serta meminimalisasi rugi daya pada sistem. Hasil dari model FFNN dianalisis untuk mengetahui besarnya potensi pengurangan rugi daya dan strategi optimasi yang dapat diterapkan.



Gambar 2. Flowchart Analisis Data

Gambar 2 menyajikan alur proses analisis data yang digunakan dalam penelitian ini. Proses dimulai dengan tahap pengumpulan data berdasarkan teknik yang telah ditetapkan, mencakup parameter seperti tegangan, arus, daya, spesifikasi kabel, dan detail beban listrik pada rangkaian kereta passenger coach. Data yang telah diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan perhitungan dan simulasi menggunakan metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) yang diimplementasikan melalui perangkat lunak MATLAB. Simulasi ini menghasilkan output numerik yang selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi tingkat optimalisasi daya listrik yang telah dicapai. Jika hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi daya telah teroptimasi sesuai dengan standar yang diharapkan, data tersebut akan dicatat dan diinterpretasikan lebih lanjut untuk mendapatkan pemahaman mendalam mengenai performa sistem. Langkah akhir dari proses ini adalah penyusunan pembahasan dan kesimpulan, yang merangkum hasil analisis, menjelaskan implikasi temuan, serta memberikan rekomendasi bagi penelitian selanjutnya.

Feed Forward Neural Network (FFNN) merupakan jenis jaringan saraf tiruan yang memproses data secara searah, dari input ke output tanpa umpan balik. Model ini efektif digunakan untuk prediksi dan optimasi, termasuk dalam optimalisasi distribusi daya listrik dengan meminimalkan rugi daya. Alur kerja FFNN ditampilkan pada Gambar 3.3.

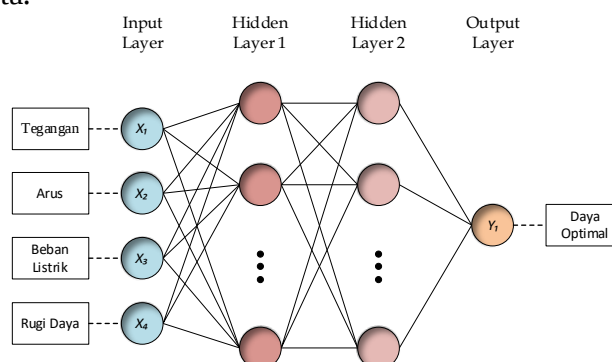


Gambar 3. Flowchart Analisis Data

Gambar 3 menunjukkan alur kerja metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) dalam proses optimasi daya. Langkah pertama dimulai dengan memasukkan data input berupa tegangan, arus, beban listrik tiap gerbong, dan rugi daya. Selanjutnya, data tersebut dinormalisasi untuk menyelaraskan skala antar variabel agar proses pelatihan jaringan berjalan lebih efisien. Tahap *pre-processing* dilakukan untuk menyusun data dalam format yang sesuai dengan struktur jaringan neural. Setelah itu, dilakukan analisis untuk mengevaluasi apakah nilai rugi daya yang dihasilkan telah optimal. Jika belum, jaringan akan menjalani proses pelatihan dan pengujian ulang. Bila hasil telah optimal, jaringan menghasilkan nilai daya yang dapat digunakan sebagai acuan dalam strategi distribusi daya yang lebih baik.

Desain Arsitektur Feed Forward Neural Network

Arsitektur *Feed Forward Neural Network* (FFNN) dalam penelitian ini berperan sebagai alat analisis untuk memahami karakteristik teknis sistem kelistrikan pada kereta passenger coach. Jaringan ini dirancang untuk mempelajari hubungan antara berbagai parameter seperti tegangan, arus, beban, dan rugi daya, serta mengevaluasi dampaknya terhadap performa sistem. Dengan memasukkan data spesifikasi ke dalam model, FFNN dilatih untuk menghasilkan distribusi daya yang optimal, sehingga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan sistem kelistrikan kereta.



Gambar 4. Flowchart Analisis Data

Berdasarkan Gambar 4, arsitektur *Feed Forward Neural Network* (FFNN) yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari empat komponen utama, yaitu input layer, dua hidden layer, dan output layer. Input layer memiliki empat neuron yang masing-masing mewakili variabel utama sistem kelistrikan kereta, yaitu tegangan (x_1), arus (x_2), beban listrik (x_3), dan rugi daya (x_4). Informasi dari keempat parameter ini menjadi dasar pemrosesan data oleh jaringan. Hidden layer pertama bertugas menangkap pola non-linear dari input, sementara hidden layer kedua memperdalam proses identifikasi fitur-fitur penting yang berkontribusi terhadap hasil akhir. Output layer terdiri dari satu neuron (y_1) yang menghasilkan output berupa nilai rugi daya setelah proses optimasi dilakukan oleh jaringan. Arsitektur ini dirancang untuk mengkaji hubungan antarparameter secara sistematis guna mendukung pengambilan keputusan dalam sistem kelistrikan kereta.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Optimalisasi Daya Dengan Metode *Feed Forward Neural Network*

Simulasi optimalisasi daya dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) yang diimplementasikan melalui perangkat lunak MATLAB. Data input yang digunakan berasal dari 11 gerbong kereta, diperoleh melalui pengukuran langsung pada rentang waktu pukul 08.00 hingga 10.00 WIB dengan interval setiap 15 menit. Parameter yang dimasukkan mencakup tegangan, arus, beban listrik tiap gerbong, dan rugi daya. Proses simulasi melibatkan tahapan *training*, *validation*, dan *testing* untuk membentuk model jaringan yang mampu melakukan optimalisasi daya berdasarkan pola distribusi beban aktual. MATLAB dipilih karena kemampuannya dalam merancang arsitektur jaringan saraf, mengatur parameter seperti jumlah neuron, *learning rate*, dan jumlah *epoch*, serta menyediakan visualisasi performa model. Hasil simulasi menunjukkan bahwa FFNN dapat mengenali karakteristik distribusi daya dan menghasilkan output daya optimal yang sesuai dengan kondisi teknis setiap gerbong.

Penentuan Arsitektur *Feed Forward Neural Network*

Penentuan arsitektur *Feed Forward Neural Network* (FFNN) dalam penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan mempertimbangkan karakteristik data masukan, yang terdiri dari tegangan, arus, dan beban listrik tiap gerbong, serta output berupa daya optimal. Jumlah neuron pada lapisan input disesuaikan dengan jumlah parameter input, sementara jumlah neuron pada lapisan tersembunyi (hidden layer) ditentukan melalui serangkaian uji coba untuk mendapatkan konfigurasi dengan performa terbaik berdasarkan nilai kesalahan terkecil (*Mean Squared Error*). Proses pelatihan jaringan dilakukan melalui pendekatan *trial and error*, dengan menguji berbagai kombinasi arsitektur guna memperoleh model yang mampu memetakan hubungan nonlinier antara input dan output secara akurat. Pemilihan arsitektur akhir mempertimbangkan efisiensi komputasi serta tingkat akurasi selama proses pelatihan dan validasi.

Tabel 1. Perbandingan Arsitektur *Feed Forward Neural Network*

No	Input	Hidden Layer 1	Hidden Layer 2	Output	MSE
1	4	4	2	1	0,000201
2	4	5	3	1	0,000204
3	4	6	2	1	0,000244
4	4	7	4	1	0,000196
5	4	8	3	1	0,001297
6	4	9	2	1	1,388965
7	4	10	3	1	0,000212
8	4	5	4	1	0,000425
9	4	6	3	1	0,000209
10	4	7	2	1	0,000199
11	4	8	4	1	0,008897
12	4	9	3	1	0,000365
13	4	10	2	1	0,000218
14	4	6	4	1	0,129739
15	4	7	6	1	0,000803
16	4	8	5	1	0,008124
17	4	9	4	1	0,001059
18	4	10	5	1	0,000241
19	4	5	6	1	0,000658
20	4	6	5	1	0,003580
21	4	7	3	1	0,000268
22	4	8	6	1	0,004378
23	4	9	5	1	0,009630
24	4	10	6	1	0,000178
25	4	6	8	1	0,005628
26	4	7	9	1	0,000201
27	4	8	7	1	0,000196
28	4	9	8	1	0,000196
29	4	10	9	1	0,000907
30	4	12	10	1	0,002998

Berdasarkan hasil perbandingan arsitektur yang disajikan pada Tabel 1, konfigurasi terbaik diperoleh dengan jumlah neuron sebanyak 10 pada *hidden layer* pertama, 6 pada *hidden layer* kedua, dan 1 pada *output layer*. Konfigurasi ini ditetapkan setelah melalui 30 kali proses *trial and error* dengan berbagai kombinasi parameter untuk mengevaluasi performa model dalam melakukan optimalisasi daya. Setiap percobaan dilakukan untuk mengidentifikasi nilai *Mean Squared Error* (MSE) terendah sebagai indikator akurasi model. Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut mampu memberikan performa paling optimal dengan nilai MSE paling minimal, sehingga dipilih sebagai arsitektur akhir dalam pelatihan *Feed Forward Neural Network* (FFNN) pada penelitian ini.

Penentuan Data Input

Dalam penelitian ini, penentuan data input difokuskan pada parameter kelistrikan yang memiliki pengaruh langsung terhadap performa distribusi daya pada sistem kelistrikan kereta penumpang. Variabel yang digunakan mencakup tegangan (Volt), arus (Ampere), beban listrik tiap gerbong (Watt), dan rugi daya (Watt). Pemilihan keempat parameter ini didasarkan pada relevansinya terhadap kondisi rugi daya sebelum dilakukan proses optimasi. Data diperoleh melalui kombinasi pengukuran lapangan dan perhitungan teknis, kemudian disusun dalam format numerik untuk digunakan dalam pelatihan model *Artificial Neural Network* (ANN) berarsitektur *feed-forward*. Pemilihan input yang tepat berperan penting dalam meningkatkan

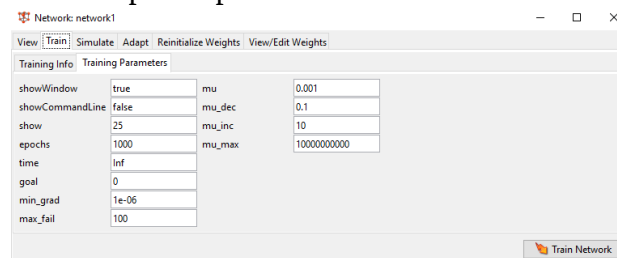
kemampuan model dalam mengidentifikasi pola hubungan antarparameter serta menghasilkan hasil optimalisasi yang representatif terhadap kondisi sistem aktual.

Penentuan Data Output

Dalam penelitian ini, output yang digunakan adalah nilai daya optimal pada sistem kelistrikan kereta penumpang, yang ditetapkan sebagai target utama untuk meminimalisasi rugi daya akibat karakteristik kabel distribusi dan parameter kelistrikan lainnya. Daya optimal merepresentasikan besarnya daya yang idealnya diterima beban setelah proses optimasi distribusi dilakukan. Nilai ini menjadi sasaran pelatihan model *Artificial Neural Network* (ANN) berarsitektur *feed-forward*, guna membentuk sistem yang mampu mengoptimalkan distribusi daya secara akurat dan adaptif terhadap kondisi teknis sistem kelistrikan kereta.

Tahap Pelatihan

Pelatihan model dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN) tipe *feed-forward* dengan dua *hidden layer*, melalui toolbox **nntool** pada MATLAB. Tujuan utama pelatihan adalah membentuk model yang mampu mengenali hubungan antara tujuh parameter input kelistrikan dan output berupa daya optimal. Data dimasukkan secara vertikal dalam bentuk tabel dan dibagi ke dalam tiga subset: pelatihan, validasi, dan pengujian, dengan proporsi tertentu. Proses pelatihan dijalankan hingga 1000 *epoch* dengan *maximum fail* sebesar 100, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.3.



Gambar 5. Pelatihan Data

Kinerja model dievaluasi berdasarkan nilai koefisien determinasi (R), dengan target mendekati $R = 1$ sebagai indikator kecocokan tinggi. Setelah pelatihan berhasil, hasil model diuji menggunakan fitur *Simulate Networks* untuk menilai kemampuannya dalam menghasilkan daya optimal berdasarkan data uji.

Tahap Pengujian

Setelah pelatihan selesai, tahap pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model terhadap data yang belum pernah digunakan sebelumnya. Pengujian menggunakan subset data uji yang dipisahkan sejak awal, guna memastikan objektivitas evaluasi. Model diuji dengan input baru, dan hasil keluarannya dibandingkan dengan nilai target aktual untuk menghitung tingkat kesalahan. Proses ini penting untuk menilai akurasi dan kemampuan prediktif jaringan dalam mengestimasi rugi daya secara mandiri, serta memastikan bahwa model tidak mengalami *overfitting* terhadap data pelatihan.

Hasil Minimalisasi Rugi Daya Berdasarkan Proses Optimasi *Feed Forward Neural Network*

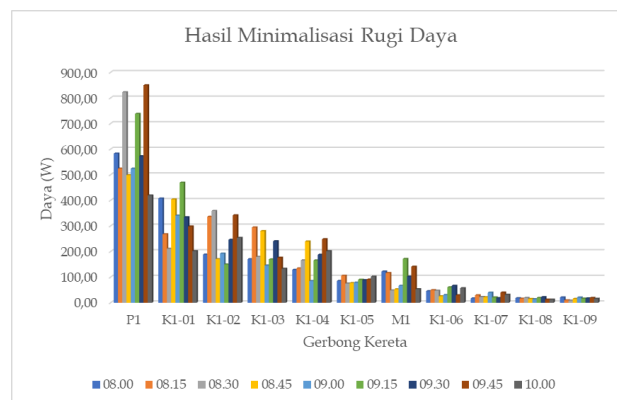
Minimalisasi rugi daya pada sistem kelistrikan kereta penumpang dicapai melalui optimasi berbasis *Feed Forward Neural Network* (FFNN), dengan memanfaatkan data daya aktual tiap gerbong sebagai input dan daya optimal sebagai output. Selisih antara keduanya

merepresentasikan rugi daya yang berhasil diminimalkan. Hasil optimasi menunjukkan adanya perbaikan distribusi daya antar gerbong, yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mendukung analisis kuantitatif. Seluruh data diperoleh dari satu rangkaian kereta (*trainset*) dalam periode pengamatan tertentu, sehingga memungkinkan penerapan pendekatan ini secara efektif dalam meningkatkan performa distribusi daya sistem kelistrikan kereta.

Tabel 2. Hasil Minimalisasi Rugi Daya

Hasil Minimalisasi Rugi Daya Dengan Satuan Watt (W)											
Waktu	P1	K1-01	K1-02	K1-03	K1-04	K1-05	M1	K1-06	K1-07	K1-08	K1-09
08.00	582,74	407,17	188,06	170,19	128,55	85,08	122,05	45,35	17,08	17,88	20,85
08.15	524,07	267,65	335,89	294,15	134,27	105,59	116,39	49,06	29,15	16,11	9,59
08.30	822,37	210,95	358,51	179,24	165,58	75,05	48,26	47,16	22,62	18,88	8,48
08.45	498,58	403,64	170,23	279,98	239,20	76,95	52,81	25,49	21,68	14,99	15,24
09.00	523,99	340,58	192,06	145,60	84,66	78,68	66,15	30,25	39,66	14,03	20,49
09.15	737,88	469,21	149,49	169,31	165,40	89,86	171,23	60,39	20,80	18,74	16,26
09.30	572,31	333,81	245,97	240,21	187,54	88,11	102,15	66,13	18,05	21,85	17,10
09.45	849,46	297,97	341,54	176,00	248,18	90,75	140,95	29,24	39,81	12,34	18,82
10.00	419,07	201,51	253,61	132,86	201,46	102,15	52,92	56,79	31,21	12,29	15,65
Rata-rata	614,50	325,83	248,37	198,62	172,76	88,02	96,99	45,54	26,67	16,35	15,83

Tabel 2 menyajikan hasil minimisasi rugi daya pada masing-masing gerbong dalam satu rangkaian kereta (*trainset*) selama periode pengamatan pukul 08.00 hingga 10.00 dengan interval 15 menit. Setiap kolom merepresentasikan gerbong, mulai dari P1, K1-01 hingga K1-09, serta M1, sementara baris menunjukkan nilai rugi daya pada setiap waktu pengukuran. Visualisasi hasil disajikan dalam bentuk kurva untuk menggambarkan tren penurunan rugi daya secara menyeluruh.



Gambar 6. Kurva Minimalisasi Rugi Daya

Hasil perhitungan rugi daya yang telah diminimalkan sebagai bagian dari proses optimasi daya listrik. Terdapat variasi antar gerbong dan waktu, dengan rata-rata rugi daya tertinggi pada gerbong P1 sebesar 614,50 W, dan terendah pada gerbong K1-08 sebesar 16,35 W. Data ini memberikan gambaran distribusi rugi daya pasca optimasi selama periode dua jam pengamatan, serta menunjukkan efektivitas model dalam menyesuaikan kebutuhan tiap gerbong secara spesifik.

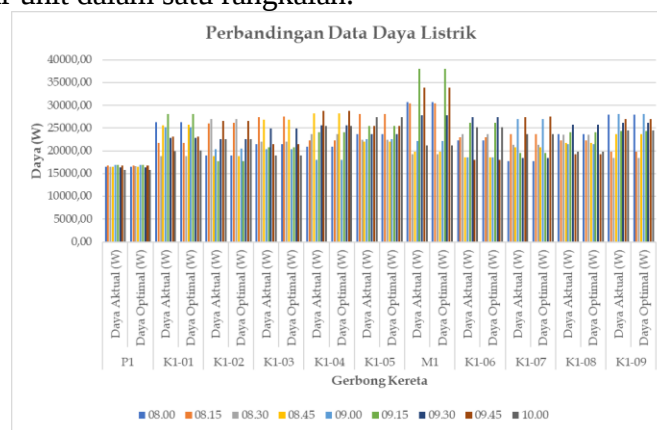
Hasil Optimalisasi Daya Listrik Dengan *Feed Forward Neural Network*

Optimalisasi daya listrik dengan metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) menunjukkan efektivitas model dalam menentukan daya optimal berdasarkan pola input sistem kelistrikan kereta penumpang. Dengan parameter input berupa tegangan, arus, beban per gerbong, dan rugi daya, serta output berupa daya optimal, FFNN berhasil memetakan hubungan nonlinier dalam sistem melalui proses pelatihan dan validasi. Hasilnya, model mampu menghasilkan nilai optimalisasi daya pada tiap gerbong dalam berbagai kondisi operasional, sehingga menawarkan pendekatan berbasis kecerdasan buatan untuk mendukung pengelolaan distribusi daya yang lebih adaptif dan responsif.

Tabel 3. Hasil Optimalisasi Daya Listrik Dengan *Feed Forward Neural Network*

Waktu	P1	K1-01	K1-02	K1-03	K1-04	K1-05	M1	K1-06	K1-07	K1-08	K1-09
08.00	16557,37	26348,05	18976,23	21483,77	20960,61	23654,05	30793,44	22260,97	17752,68	23726,99	27967,52
08.15	16858,22	21731,95	26104,38	27491,86	22315,53	28150,91	30507,49	22967,99	23710,01	22333,81	19867,07
08.30	16632,51	18855,38	27034,61	22036,66	23749,87	22502,58	19270,29	23695,67	21293,73	23515,60	18400,85
08.45	16528,05	25694,62	18920,24	26920,13	28284,29	21995,92	19852,07	18638,75	20839,55	21731,46	23742,01
09.00	16925,37	25205,82	20449,87	20434,83	18017,20	22617,94	22224,59	18532,51	27054,25	21431,43	28077,11
09.15	16978,93	28130,36	17754,98	20828,72	24136,93	25465,43	38086,77	26219,36	19566,10	24133,28	24347,65
09.30	16392,29	22902,79	22585,19	24993,52	25615,74	23647,47	27890,11	27477,79	18473,47	25696,45	26203,82
09.45	16823,33	23205,33	26549,41	21506,34	28769,65	25483,84	33850,61	17994,85	27485,01	19325,82	26985,69
10.00	15838,15	20036,73	22589,14	19026,77	25526,95	27470,18	21138,80	25152,84	23626,85	19768,63	24570,62
Rata-rata	16614,91	23567,89	22329,34	22746,95	24152,97	24554,26	27068,24	22548,97	22200,18	22407,05	24462,48

Tabel 3 menyajikan hasil optimalisasi daya listrik pada tiap gerbong kereta dalam interval 15 menit dari pukul 08.00 hingga 10.00. Baris merepresentasikan gerbong, sementara kolom menunjukkan waktu, menggambarkan dinamika kebutuhan daya sepanjang periode operasional. Hasil menunjukkan gerbong M1 memiliki rata-rata daya tertinggi sebesar 27.068,24 W, sedangkan P1 mencatat daya terendah rata-rata 16.614,91 W. Fluktuasi juga terlihat, seperti pada K1-05 dengan kisaran daya antara 23.654,05 W hingga 25.842,36 W. Rata-rata daya tiap gerbong digunakan sebagai indikator performa sistem pasca optimasi dan untuk menilai distribusi beban antar unit dalam satu rangkaian.



Gambar 7. Kurva Minimalisasi Rugi Daya

Gambar 6 menampilkan kurva perbandingan antara daya aktual dan hasil optimalisasi pada tiap gerbong dalam interval waktu tertentu. Setiap titik menggambarkan nilai daya pada satu gerbong di waktu tertentu, dengan dua garis yang merepresentasikan perbedaan antara kondisi aktual dan hasil optimasi. Meskipun tren keduanya serupa, perbedaan mencolok terlihat pada waktu-waktu tertentu, seperti pada gerbong M1 pukul 09.00 dan 09.15. Rata-rata daya aktual tercatat sebesar 23.379,90 W, sedangkan hasil optimalisasi sebesar 22.746,72 W, menunjukkan efisiensi penyesuaian daya sebesar 2,71%. Kurva ini menegaskan dinamika kebutuhan daya antar gerbong dan menunjukkan bahwa model mampu menyesuaikan distribusi daya secara adaptif terhadap kondisi operasional.

PENUTUP

Simpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan berdasarkan hasil simulasi mengenai Optimalisasi Daya Listrik dengan Minimalisasi Rugi Daya Distribusi pada Kereta *Passenger Coach* Menggunakan Metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) terbukti mampu menghasilkan nilai daya optimal untuk masing-masing gerbong berdasarkan parameter input berupa tegangan, arus, beban, dan rugi daya aktual. Model FFNN mampu mengenali pola distribusi yang kompleks dan menghasilkan output daya optimal untuk tiap gerbong. Simulasi mencatat penurunan rata-rata konsumsi daya dari 23.379,90 W menjadi 22.746,72 W, dengan reduksi rugi daya distribusi sekitar 2,71%. Temuan ini menegaskan potensi FFNN sebagai pendekatan adaptif dalam perencanaan sistem kelistrikan berbasis data operasional dinamis.

Saran

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut guna memperoleh hasil yang lebih optimal. Salah satu arah pengembangan yang disarankan adalah penerapan pendekatan hybrid, yaitu dengan menggabungkan metode *Feed Forward Neural Network* (FFNN) dengan teknik optimasi seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Particle Swarm Optimization* (PSO). Kombinasi ini berpotensi meningkatkan kemampuan model dalam menemukan parameter distribusi daya yang lebih efisien dan akurat. Selain itu, pengembangan sistem monitoring dan kontrol berbasis FFNN secara *real-time* juga perlu dipertimbangkan. Implementasi sistem tersebut memungkinkan proses optimalisasi daya dilakukan secara adaptif selama operasional kereta berlangsung, bukan hanya terbatas pada tahap simulasi atau perencanaan, sehingga mendukung kinerja sistem kelistrikan yang lebih responsif dan terintegrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] RAMDHONI, A. (2021). EVALUASI PERHITUNGAN LOAD FLOW GENSET PADA KERETA API SENJA UTAMA SOLO KA 133 MENGGUNAKAN ETAP POWER STATION 12.6 (Doctoral dissertation, Universitas Mercu Buana Jakarta).
- [2] INKA - Tentang INKA. (2017). Inka.co.id. <https://www.inka.co.id>.
- [3] Kurniawati, Y. A. Z. (2022). Sistem Distribusi Listrik pada Politeknik Penerbangan Indonesia Curug. *Jurnal Kewarganegaraan*, 6(1).
- [4] Setiaji, N., Sumpena, S., & Sugiharto, A. (2022). Analisis Konsumsi Daya Dan Distribusi Tenaga Listrik. *Jurnal Teknologi Industri*, 11(1).
- [5] Razmi, D., Lu, T., Papari, B., Akbari, E., Fathi, G., & Ghadamyari, M. (2023). An overview on power quality issues and control strategies for distribution networks with the presence of distributed generation resources. *IEEE Access*, 11, 10308-10325.
- [6] DICKY, M. (2020). Analisis Penempatan dan Kapasitas Distributed Generation (DG) Terhadap Profil Tegangan dan Rugi Daya pada Penyulang Lipat Kain-Riau (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU).
- [7] Fahroji, F., Lamtiar, S., & Kusuma, D. W. (2024). ANALISIS PENGARUH FAKTOR DAYA TERHADAP JATUH TEGANGAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI POWER HOUSE LAMA DI BANDAR UDARA HALIM PERDANAKUSUMA. *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran (JRPP)*, 7(4), 12650-12657.
- [8] Mughny, W. A., & Hariyanto, N. (2022). Studi Arus, Tegangan, dan Daya pada Instalasi Listrik Kereta Api Turangga. *e-Proceeding FTI*.
- [9] Martins, A. P., Rodrigues, P., Hassan, M., & Morais, V. A. (2021). Voltage unbalance, power factor and losses optimization in electrified railways using an electronic balancer. *Electricity*, 2(4), 554-572.
- [10] Rizkiana, A. F., & Saputra, Y. M. Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya dengan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah dan Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah pada Gardu Distribusi MI-44-150-21 PT PLN ULP Magelang Kota. *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, 5(1), 1-8.
- [11] Angkouw, B. J., Tumaliang, H., & Tulung, N. M. (2023). Analisa Rugi-Rugi Daya Dan Jatuh Tegangan Pada Jaringan Distribusi Area Minahasa Utara.
- [12] Asnil, A., & Myori, D. E. (2024). Analisis Jatuh Tegangan Pada Sistem Distribusi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Wilayah Ngatau Baribuik. *Suluah Bendang: Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 24(1).
- [13] Ferdiansah, B., Margiantono, A., & Ahmad, F. (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya Dan Nilai Jatuh Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 234-241.

- [14] Mujiburrahman, M., Joko, J., Suprianto, B., & Kartini, U. T. (2021). Analisis Tegangan Jatuh (Drop Voltage) Pada Unit Boiler Di PPSDM Migas Cepu Menggunakan Etap 12.6.0. JURNAL TEKNIK ELEKTRO, 10(3), 757-768.
- [15] Yazdani-Asrami, M., Taghipour-Gorjilaie, M., Song, W., Zhang, M., & Yuan, W. (2020). Prediction of nonsinusoidal AC loss of superconducting tapes using artificial intelligence-based models. IEEE access, 8, 207287-207297.
- [16] Kaushal, J., & Basak, P. (2020). Power quality control based on voltage sag/swell, unbalancing, frequency, THD and power factor using artificial neural network in PV integrated AC microgrid. Sustainable Energy, Grids and Networks, 23, 100365.
- [17] Putra, D. F. U., Firdaus, A. A., Putra, N. U., & Penangsang, O. (2022). Prediksi Voltage Stability Index (VSI) Metode Artificial Neural Network (ANN) untuk Mendeteksi Tegangan Jatuh. Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi, 192-197.
- [18] Hasnira, H., Windarko, N. A., Tjahjono, A., Nugroho, M. A. B., & Jati, M. P. (2020). Efficient Maximum Power Point Estimation Monitoring of Photovoltaic Using Feed Forward Neural Network. Jurnal Integrasi, 12(2), 92-104.
- [19] Alfikri, R., & Kartini, U. T. (2023). Optimal Capacitor Placement Menggunakan Metode Newton Raphson–Neural Network Untuk Meminimalisasi Rugi Daya. JURNAL TEKNIK ELEKTRO, 12(3), 102-115.
- [20] Pangestu, M. H. R. (2022). Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Untuk Meminimalisasi Rugi-Rugi Daya Dengan Menggunakan Metode Grey Wolf Optimizer (GWO). Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro, 16(3), 238-246.