

Optimasi Sistem Distribusi Daya Listrik Menggunakan Pendekatan Metode GA, PSO, dan BPNN

Abel Dwi Rahmawati. S¹, Regina Caeli Endyarni², Anggraini Puspita Sari^{3*}

^{1,2,3}Informatika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

Email: ¹23081010231@student.upnjatim.ac.id, ²23081010025@student.upnjatim.ac.id,

³anggraini.puspita.if@upnjatim.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹anggraini.puspita.if@upnjatim.ac.id

Abstrak—Penelitian ini bertujuan menemukan solusi optimal untuk mengurangi rugi daya sehingga mengurangi pembuangan energi pada sistem tenaga listrik. Melalui fase optimasi terintegrasi, penelitian ini mengembangkan pendekatan metode GA-PSO-BPNN dengan arsitektur jaringan syaraf tiruan 3-8-6-3 untuk memaksimalkan efisiensi distribusi dan meminimalkan kerugian daya. Untuk mengoptimalkan sistem listrik, metode penelitian ini menggunakan pendekatan perbandingan dengan GA (200 generasi dengan 100 kromosom awal), PSO standar, dan BPNN. Data historis dari PLN untuk periode 2015-2024 digunakan untuk validasi. Dengan waktu komputasi 0.1336 detik, efisiensi distribusi energi 95% dan pengurangan kerugian daya sebesar 2.000.000 MW, data menunjukkan bahwa GA mencapai hasil optimasi. Prediksi BPNN mampu memprediksi hingga sepuluh tahun ke depan dengan angka yang konsisten, sedangkan PSO mencapai hasil optimasi dalam waktu 0.2366 detik, pengurangan kerugian daya sebesar 1.000.000 MW, dan efisiensi distribusi sebesar 95%. Dari awal iterasi hingga akhir, pendekatan GA-PSO-BPNN menunjukkan stabilitas terbaik. Pendekatan ini mampu mengurangi kerugian daya dari data aktual rata-rata PLN sebesar 3.972.55 MW menjadi 200.00 MW, mencapai efisiensi distribusi 99%, dan melakukan komputasi dalam waktu 0.0856 detik. Perkiraan untuk periode 2025-2034, menunjukkan efisiensi stabil sebesar 94.91%-95% dan kerugian daya sebesar 3.654.52-4.369.78 MW, sejalan dengan pola masa lalu. Model ini terbukti memberikan jawaban yang akurat untuk perencanaan strategis jangka panjang dalam bidang kelistrikan, sehingga memberikan kontribusi yang signifikan dalam menciptakan sistem kelistrikan yang berkelanjutan dan efektif.

Kata Kunci: Algoritma genetika, back propagation neural network, optimasi sistem distribusi, particle swarm optimization, susut daya listrik

Abstract—This study aims to find the best way to cut down on power loss so that less energy is wasted in the power system. Through an integrated optimisation phase, this study developed a GA-PSO-BPNN method approach with a 3-8-6-3 artificial neural network architecture to maximise distribution efficiency and minimise power losses. To optimise the power system, this study's method uses a comparative approach with GA (200 generations with 100 initial chromosomes), standard PSO, and BPNN. Historical data from PLN for the period 2015-2024 was used for validation. With a computation time of 0.1336 seconds, energy distribution efficiency of 95%, and a reduction in power loss of 2,000,000 MW, the data indicates that GA achieved optimal results. BPNN predictions can forecast up to ten years ahead with consistent figures, while PSO achieves optimal results in 0.2366 seconds, a power loss reduction of 1,000,000 MW, and a distribution efficiency of 95%. From the beginning to the end of the iterations, the GA-PSO-BPNN approach demonstrates the best stability. This approach reduces power losses from the average actual data of PLN from 3,972.55 MW to 200.00 MW, achieves distribution efficiency of 99%, and performs computations in 0.0856 seconds. Projections for the 2025-2034 period indicate stable efficiency of 94.91%-95% and power losses of 3,654.52-4,369.78 MW, consistent with past patterns. This model has proven to provide accurate answers for long-term strategic planning in the electricity sector, thereby making a significant contribution to creating a sustainable and effective electricity system.

Keywords: Genetic algorithm, back propagation neural network, distribution system optimization, particle swarm optimization, power losses

1. PENDAHULUAN

Sistem distribusi daya listrik yang andal dan efektif pada struktur kelistrikan sangat diperlukan karena adanya kenaikan jumlah permintaan listrik dari pertumbuhan penduduk, pembangunan buatan, serta kemajuan teknologi[1]. Konfigurasi jaringan yang buruk, kesetimbangan muatan yang dinamis, serta rugi daya menyebabkan pemborosan energi, adanya kehilangan daya yang tinggi, mengurangi efektivitas dan kualitas tenaga listrik yang akan diberikan pada konsumen, sehingga hal-hal tersebut merupakan tantangan kebutuhan energi[2]. Fokus pada kajian ini adalah di mana dapat mengoptimalkan konfigurasi sistem distribusi tenaga listrik serta meminimalkan rugi daya, mampu meningkatkan keandalan daya serta mengelola muatan secara kokoh dan adaptif[3]. Peningkatan keandalan, penempatan dan pengukuran Distribusi Generator (DG), rekonfigurasi jaringan distribusi untuk perbaikan rugi daya, serta menghindari *rolling knock-out* dengan pengaturan muatan sangat diperlukan disini[4],[5]. Gaya optimasi secara

konvensional seringkali kurang efektif digunakan atau tidak dapat mencapai hasil yang optimal sehingga terjadi kompleksitas sistem bersifat non linear dan dinamis, hal ini menjadi tantangan utama pada sistem distribusi daya listrik[6].

Gaya optimasi *Genetic Algorithm* (GA) dilakukan seperti proses evolusi alamiah dengan tujuan menemukan solusi optimal dari suatu masalah, seperti memiliki ruang pencarian yang besar dan rumit[7]. Proses GA dimulai ketika terdapat solusi acak yang dinilai berdasarkan nilai *fitness*, lalu memilih solusi terbaik untuk mencapai *crossover* serta mutasi juga dilakukan untuk membentuk generasi baru, siklus dilakukan berulang hingga nantinya menemukan solusi yang mendekati optimal[8]. Gaya optimasi GA ini mampu untuk menemukan solusi pada situasi yang rumit dan kompleks, namun GA juga berisiko mengalami konvergensi prematur jika parameter tidak diatur dengan tepat dan memerlukan waktu komputasi lebih lama [4],[9]. *Particle Swarm Optimization* (PSO) memanfaatkan kumpulan solusi yang disebut partikel, masing-masing partikel ini berusaha untuk menemukan posisi optimal dalam ruang solusi[10]. Tiap partikel menyimpan posisi terbaiknya (*pbest*) dan mengikuti solusi terbaik kelompok (*gbest*), lalu memperbarui posisi berdasarkan informasi tersebut. Siklus ini diulang hingga mendapatkan hasil yang konsisten atau jumlah iterasi yang ditentukan tercapai[11]. Kemampuan PSO dalam menemukan solusi optimal secara lebih cepat dibandingkan dengan metode lain, memiliki struktur yang sederhana, mudah untuk diprogram, dan memerlukan sedikit parameter untuk disesuaikan merupakan keunggulan dari PSO[12]. PSO juga rentan terhadap jebakan solusi lokal jika parameter awal tidak tepat, perlu melakukan penyesuaian khusus untuk masalah yang kompleks, hasilnya juga sangat bergantung pada inisialisasi awal partikel[13].

Jaringan Syaraf Tiruan *Back Propagation Neural Network* (BPNN) merupakan metode yang bekerja dengan menggunakan dua tahap yaitu *forward propagation* (dari input ke output menggunakan bobot dan fungsi aktivasi) dan *backpropagation* (menghitung kesalahan output, memperbarui bobot dengan algoritma berbasis gradien)[14]. BPNN efektif dalam mengelola hubungan rumit antara input dan output, meskipun pola datanya bersifat non-linier serta bersifat fleksibel karena dapat digunakan untuk berbagai tipe data dan masalah, baik itu klasifikasi maupun prediksi[15]. Proses dapat menjadi lambat atau tidak stabil, risiko terjebak dalam local minimum, serta kesulitan dalam menentukan parameter jaringan yang tepat juga dapat terjadi pada BPNN[16]. Hasil optimasi yang beragam telah dikembangkan dan diterapkan dalam sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian yang dilakukan oleh Jawwad S.H et.al (2021) menunjukkan bahwa PSO disini digunakan sebagai penentuan posisi optimal turbin angin menggunakan parameter kecepatan angin, jarak antar turbin, dan luas lahan yang tersedia, hasilnya menunjukkan PSO mampu mengurangi kerugian daya antar turbin hingga 12%, dengan memberikan prediksi biaya yang akurat, serta meningkatkan kinerja sistem distribusi[17]. GA juga telah terbukti efektif dalam menyempurnakan efektivitas dan kualitas sistem distribusi tenaga listrik, seperti yang ditunjukkan pada penelitian oleh Putri.A.A. et.al (2020) yang memverifikasi kemampuan GA untuk mengurangi rugi daya pada sistem distribusi sebesar 18,6% jika dibandingkan dengan konfigurasi awal[18].

Studi ini memiliki tujuan untuk menerapkan dan mengembangkan gaya optimasi berdasar pada GA, PSO, BPNN, dan pendekatan integrasi yang menggabungkan keunggulan masing-masing sistem dalam mengoptimalkan sistem distribusi tenaga listrik sebagai pembeda utama dalam penelitian ini, membandingkan efektivitas masing-masing sistem dalam lingkungan optimasi sistem distribusi dan memeriksa kemungkinan untuk menyempurnakan kinerja melalui metode GA-PSO-BPNN[19]. Penggunaan GA dalam eksplorasi hasil, kecepatan konvergensi PSO, dan kemampuan prediksi BPNN dalam menangani data non linier dan dinamis, sistem integrasi dari ketiga metode ini diharapkan mampu untuk memberikan hasil yang lebih optimal dan adaptif daripada sistem tunggal. Penelitian ini menggunakan data set dari PLN Indonesia dari tahun 2015-2024. Studi ini diantisipasi menjadi hasil yang efektif dalam menambah efektivitas, kepercayaan, dan kualitas tenaga listrik yang sangat dibutuhkan untuk mendukung pembangunan yang menguntungkan dan kesejahteraan masyarakat yang berkelanjutan[20].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis untuk mengembangkan dan mengevaluasi tingkat efektivitas pendekatan optimasi distribusi daya listrik menggunakan tiga metode, yaitu Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), dan Backpropagation Neural Network (BPNN). Setiap tahapan dirancang untuk dapat menangani kompleksitas sistem distribusi daya pada skala nasional, serta berfokus pada pengurangan rugi-rugi daya, efisiensi distribusi energi, dan biaya operasional. Keseluruhan proses penelitian ini dijelaskan secara visual dalam diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

2.1 Identifikasi Masalah

Sistem distribusi daya listrik di Indonesia masih menghadapi beberapa masalah, seperti rugi-rugi daya yang besar, efisiensi distribusi energi yang belum seimbang, dan biaya operasional yang masih terlalu besar karena sistem yang digunakan masih belum cukup baik. Hal ini terlihat dari data PLN (Perusahaan Listrik Negara) 2015 hingga 2024 yang menunjukkan adanya fluktuasi pada rugi-rugi daya, efisiensi distribusi, dan biaya operasional.

2.2 Studi Literatur

Tahapan studi literatur adalah proses kajian ilmiah yang dilakukan secara sistematis, kritis, dan komprehensif terhadap berbagai sumber pustaka yang relevan dengan topik penelitian yang diteliti. Kegiatan ini melibatkan analisis mendalam terhadap karya-karya ilmiah terdahulu dengan tujuan utama untuk membangun fondasi teoritis yang kokoh, mengidentifikasi celah atau kesenjangan pengetahuan (*research gap*) yang masih perlu dieksplorasi, serta memposisikan penelitian yang dilakukan dalam kerangka keilmuan yang lebih luas dan kontekstual.

2.3 Pengumpulan Data

Data utama dalam penelitian ini berasal dari data PLN selama periode 2015-2024 dan mencakup seluruh data operasional yang relevan. Seluruh data tersebut disajikan secara lengkap dalam artikel ini untuk mendukung transparansi.

Tabel 1. Data Aktual PLN

Tahun	Rugi Daya (MW)	Efisiensi Distribusi Energi (%)	Biaya Operasional (Rp)	Waktu Komputasi
2015	3.261.35	90	53.480.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2016	4.296.64	90.25	50.480.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2017	3.394.75	90.98	53.020.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2018	3.687.42	90.25	44.210.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2019	3.863.81	90.4	49.020.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2020	3.665.47	90.59	45.330.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2021	3.676.53	91	43.210.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2022	3.645.04	90.71	45.070.000.000.000	Tidak Terdefinisi
Tahun	Rugi Daya (MW)	Efisiensi Distribusi Energi (%)	Biaya Operasional (Rp)	Waktu Komputasi
2023	4.994.41	90.82	46.170.000.000.000	Tidak Terdefinisi
2024	5.240.11	90.81	50.480.000.000.000	Tidak Terdefinisi

Persamaan rata-rata setiap parameter:

$$\text{rata-rata} = \frac{\text{jumlah data}}{\text{banyak data}} \tag{1}$$

2.4 Perancangan Tahapan Metode

2.4.1 Genetic Algorithm (GA)

Algoritma Genetika Standar (*Simple Genetic Algorithm*) digunakan dalam metode GA pada penelitian ini. Implementasi algoritma dimulai dengan menggunakan pengumpulan data 10 tahun terakhir dari 2015-2024 (data PLN Indonesia) dan menginisialisasi populasi acak sebanyak 100 kromosom, fungsi multi-objektif diformulasikan untuk mengoptimalkan rugi daya, efisiensi, dan biaya. Proses evolusi berlangsung selama 200 generasi menggunakan *tournament selection*, *arithmetic tournament selection* dengan tingkat 85%, dan *gaussian mutation* dengan tingkat 15%. Pertahanan 10% individu terbaik pada

setiap generasi dilakukan dengan menerapkan Strategi elitisme. Analisis konvergensi *fitness score*, perbandingan dengan data aktual, dan perhitungan tingkat perbaikan sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja.

2.4.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO pada penelitian ini diawali dengan pengumpulan data dari PLN Indonesia dari tahun 2015-2024. Metode PSO dimulai dengan adanya inisialisasi kelas. PSO menggunakan 50 partikel untuk 100 iterasi maksimum, serta dilengkapi dengan parameter PSO dan batasan pencarian. Tahap inisialisasi akan membangkitkan populasi awal dengan posisi acak dan kecepatan yang terbatas. Setiap iterasi melakukan *update personal best* dan *global best* berdasarkan performa *fitness*, kemudian diikuti *update particles* untuk memperbarui kecepatan dan posisi menggunakan persamaan PSO dengan *inertia weight* yang menurun adaptif. Program akan menampilkan hasil melalui *display result* dan *create comparison* untuk perbandingan kondisi aktual dengan optimasi.

2.4.3 Back Propagation Neural Network (BPNN)

BPNN pada penelitian ini juga menggunakan pengumpulan data dari PLN Indonesia dari tahun 2015-2024. BPNN ini menggunakan arsitektur 3-8-6-3 yang dirancang khusus untuk optimasi listrik, dimana *input layer* dengan 3 neuron akan menerima parameter kritis yaitu rugi daya (MW), efisiensi (%), dan biaya operasional (Rp), *hidden layer* pertama dengan 8 neuron digunakan untuk ekstraksi fitur primer untuk menangkap pola non-linear, *hidden layer* kedua dengan 6 neuron berfungsi sebagai *feature combiner* untuk abstraksi tinggi, dan *output layer* dengan 3 neuron menghasilkan prediksi optimasi berupa pengurangan rugi daya, peningkatan efisiensi, dan pengurangan biaya operasional. Fase *forward propagation* memproses data *input* melalui setiap *layer* secara berurutan dengan mengalikan input dengan bobot serta penambahan bias. Fase *backward propagation* akan menghitung *error* dari *output layer* hingga *input layer* dengan cara terbalik untuk menentukan seberapa besar setiap bobot berkontribusi terhadap *error*, lalu memperbarui semua bobot dan bias berdasarkan gradien *error* yang dihitung menggunakan *learning rate* 0.001 selama 2000 *epoch training*.



Gambar 2. Arsitektur BPNN

2.4.4 Metode GA-PSO-BPNN

Proses optimasi menggunakan integrasi dari GA, PSO, BPNN diawali menggunakan *loading* data historis mencakup data rugi daya, efisiensi distribusi energi, dan biaya operasional pada periode 2015-2024. Sistem akan melanjutkan ke tahap inisialisasi metode GA dengan populasi awal sebanyak 100 kromosom dengan evolusi GA selama 200 generasi yang berlangsung secara iteratif hingga mencapai batas maksimum generasi setelah data data berhasil dimuat dan divalidasi. Sistem akan mendapatkan solusi terbaik GA berupa kromosom dengan nilai *fitness* tertinggi sebagai kombinasi optimal. Solusi terbaik dari GA kemudian digunakan untuk inisialisasi PSO dimana solusi GA ditetapkan sebagai posisi *global best* awal, sementara 50 partikel lainnya diinisialisasi secara acak dalam ruang pencarian. Proses optimasi PSO berlangsung selama 100 iterasi dengan pembaruan kecepatan dan posisi partikel berdasarkan *personal best* dan *global best*, serta penerapan *inertia weight* yang menurun secara dinamis untuk menyeimbangkan eksplorasi dan eksploitasi. PSO ketika mencapai konvergensi, maka sistem akan mendapatkan solusi optimal yang merupakan *refinement* dari solusi GA dengan presisi yang lebih tinggi. Solusi optimal ini kemudian digunakan dalam tahap persiapan BPNN dimana data aktual menjadi *input* dan solusi optimal PSO menjadi target *output*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Metode GA-PSO-BPNN

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, penerapan pendekatan GA-PSO-BPNN dalam penelitian ini menunjukkan hasil dari proses optimasi yang dijalankan melalui 100 iterasi. Nilai *fitness* optimum secara konsisten mencapai -280.000.000 pada setiap tahap iterasi berikut: 20, 40, 60, 80, dan 100. Nilai ini mencerminkan hasil optimasi yang stabil, menunjukkan bahwa algoritma telah menemukan solusi terbaik dengan cepat dan mempertahankannya hingga akhir. Dengan tingkat efisiensi sistem sebesar 99% dan

kerugian daya sebesar 200.000 MW, optimasi menghasilkan penurunan signifikan dalam biaya operasional dari data aktual PLN (2015-2024) sebesar Rp 48.047 triliun menjadi Rp 15 triliun. Dengan waktu komputasi 0.0856 detik, prosedur selesai dengan cepat, membuktikan keefektifan algoritma GA-PSO-BPNN dalam menyelesaikan masalah optimasi sistem tenaga listrik.

```
Iterasi 20: Fitness terbaik = -280.000000
Rugi Daya: 200.00 MW, Efisiensi: 99.00%, Biaya: 15.00T
Iterasi 40: Fitness terbaik = -280.000000
Rugi Daya: 200.00 MW, Efisiensi: 99.00%, Biaya: 15.00T
Iterasi 60: Fitness terbaik = -280.000000
Rugi Daya: 200.00 MW, Efisiensi: 99.00%, Biaya: 15.00T
Iterasi 80: Fitness terbaik = -280.000000
Rugi Daya: 200.00 MW, Efisiensi: 99.00%, Biaya: 15.00T
Iterasi 100: Fitness terbaik = -280.000000
Rugi Daya: 200.00 MW, Efisiensi: 99.00%, Biaya: 15.00T
-----
Optimasi selesai!
Waktu komputasi: 0.0856 detik
```

Gambar 3. Hasil Komputasi GA-PSO-BPNN

3.2 Hasil Metode GA

Berdasarkan hasil optimasi GA pada Gambar 4, kinerja sistem tenaga listrik telah meningkat secara signifikan berkat penerapan GA. Dengan efisiensi sistem sebesar 95%, kerugian daya sebesar 2.000.000 MW, dan biaya operasional total sebesar Rp 40 triliun, solusi ideal berhasil dihasilkan. Optimasi ini menghasilkan peningkatan 49.65% dalam pengurangan kerugian daya, peningkatan 4.88% dalam efisiensi, dan penghematan biaya sebesar 16.75% dibandingkan dengan kondisi aktual, yang memiliki kerugian daya rata-rata 3.972.55 MW, efisiensi 90.58% dan biaya operasional sebesar Rp 48.047 triliun. Efisiensi metode dalam hal waktu komputasi dibuktikan dengan fakta bahwa seluruh prosedur selesai dalam waktu 0.1364 detik.

```
=====
HASIL OPTIMASI ALGORITMA GENETIKA
=====
SOLUSI OPTIMAL:
- Rugi Daya Optimal : 2000.00 MW
- Efisiensi Optimal : 95.00%
- Biaya Optimal : Rp 40,000,000,000,000
- Waktu Komputasi : 0.1336 detik

PERBANDINGAN DENGAN DATA AKTUAL:
Rata-rata Aktual : 3972.55 MW | 90.58% | Rp 48,047,000,000,000
Perbaikan Rugi Daya : +49.65%
Perbaikan Efisiensi : +4.88%
Perbaikan Biaya : +16.75%
```

Gambar 4. Hasil Komputasi GA

3.3 Hasil Metode PSO

Berdasarkan hasil optimasi listrik pada Gambar 5 yang menggunakan metode PSO, terlihat bahwa kinerja sistem tenaga listrik mengalami peningkatan yang signifikan ketika metode optimasi PSO diterapkan dibandingkan dengan data aktual. Kerugian daya berkurang sebesar 2.972.55 MW, dari rata-rata 3.972.55 MW menjadi hanya 1.000.000 MW. Selain itu, efisiensi sistem meningkat sebesar 4.88% dari 90.58% menjadi 95%. Secara ekonomi, optimasi ini juga menyebabkan penurunan biaya operasional tahunan dari Rp 48.047 triliun menjadi Rp 30 triliun, menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp 18.047 triliun. Perhitungan penuh yang diperlukan untuk mencapai hasil ideal dalam algoritma ini selesai dalam waktu 0.2366 detik.

KONDISI AKTUAL (Rata-rata):	
Rugi Daya	: 3,972.55 MW
Efisiensi	: 90.58%
Biaya Operasional	: Rp 48,047,000,000,000
HASIL OPTIMASI:	
Rugi Daya	: 1,000.00 MW
Efisiensi	: 95.00%
Biaya Operasional	: Rp 30,000,000,000,000
PENINGKATAN PERFORMA:	
Pengurangan Rugi Daya	: +74.83%
Peningkatan Efisiensi	: +4.88%
Penghematan Biaya	: +37.56%
WAKTU KOMPUTASI: 0.2366 detik	

Gambar 5. Hasil Komputasi PSO

3.4 Hasil Metode BPNN

Hasil evaluasi dan optimasi model, yang ditampilkan pada Gambar 6, menunjukkan bahwa strategi distribusi listrik yang digunakan dapat meningkatkan kinerja sistem distribusi listrik. Dengan waktu komputasi prosedur pelatihan 0.33 detik dan MSE sebesar 0.083863 serta MAE sebesar 0.250767 berdasarkan matriks evaluasi, pendekatan BPNN menunjukkan tingkat kesalahan yang rendah dan efisiensi waktu yang baik. Kerugian daya berkurang dari 3.972.55 MW menjadi 3.559.41 MW, yang merupakan peningkatan sebesar 10.4% dalam hal kinerja sistem. Efisiensi distribusi meningkat sebesar 4.7%, naik dari 90.58% menjadi 94.88%. Sementara itu, biaya operasional tahunan berhasil dikurangi sebesar 21.3%, dari Rp 48.047 triliun menjadi sekitar Rp 37.82 triliun. Hasil-hasil ini membuktikan keefektifan model dalam mengurangi biaya operasional dan kerugian teknis sistem distribusi listrik.

METRIK EVALUASI MODEL:	
• Mean Squared Error (MSE)	: 0.083863
• Mean Absolute Error (MAE)	: 0.250767
• Waktu Komputasi Training	: 0.33 detik
HASIL OPTIMASI (Rata-rata):	
• Rugi Daya	: 3972.55 MW → 3559.41 MW
↳ Perbaikan	: 10.4% (pengurangan)
• Efisiensi	: 90.58% → 94.88%
↳ Peningkatan	: 4.7%
• Biaya Operasional	: Rp 48047000000000 → Rp 3781853847826
↳ Penghematan	: 21.3%

Gambar 6. Hasil Optimasi Metode BPNN

Hasil prediksi metode BPNN yang ada pada Gambar 7 untuk periode tahun 2025 hingga 2034 jika dibandingkan dengan data aktual dari PLN untuk periode 2015 hingga 2024, hasil prediksi pendekatan BPNN untuk periode 2025 hingga 2034, yang ditampilkan pada Gambar 7, menunjukkan tren yang cukup konsisten dalam kinerja sistem kelistrikan. Kerugian daya diperkirakan mencapai 3.654.52 MW pada tahun 2025, efisiensi distribusi akan mencapai 94.91%, dan biaya operasional akan mencapai sekitar Rp 37.5 triliun. Dengan efisiensi yang terus berada di angka 95%, nilai kerugian daya dari tahun 2026 hingga 2034 bervariasi antara 4.350.89 MW hingga 4.369.78 MW. Selama periode ini, biaya operasional tetap stabil sekitar Rp 34.6 triliun per tahun. Jika dibandingkan dengan data historis aktual dari PLN, temuan prediksi ini menunjukkan bahwa kinerja sistem diperkirakan akan tetap berada dalam rentang yang wajar.

PREDIKSI DETAIL PER TAHUN:			
Tahun	Rugi Daya (MW)	Efisiensi (%)	Biaya (Triliun Rp)
2025	3654.52	94.91	37.5
2026	4350.89	95.00	34.6
2027	4369.55	95.00	34.6
2028	4369.78	95.00	34.6
2029	4369.78	95.00	34.6
2030	4369.78	95.00	34.6
2031	4369.78	95.00	34.6
2032	4369.78	95.00	34.6
2033	4369.78	95.00	34.6
2034	4369.78	95.00	34.6

Gambar 7. Hasil Komputasi Prediksi 10 Tahun Kedepan dengan BPNN

3.4 Perbandingan Metode dengan Data Aktual PLN (2015-2024)

Seperti terlihat pada Tabel 1 dan Gambar 3-6, Tabel 2 membandingkan data PLN yang sebenarnya dengan hasil implementasi optimasi distribusi daya dari masing-masing metode. Tabel ini menunjukkan bahwa pendekatan GA-PSO-BPNN adalah metode yang paling efektif untuk mengoptimalkan distribusi daya. Dibandingkan dengan metode tunggal, metode GA-PSO-BPNN secara signifikan meningkatkan daya aktual rata-rata dan mencapai efisiensi distribusi daya 99% dengan kerugian daya sebesar 200.00 MW.

Tabel 2. Perbandingan Data PLN dengan Metode GA-PSO-BPNN

Parameter	Data PLN	GA-PSO-BPNN	GA	PSO	BPNN
Rugi daya (MW)	3.972.55	200.00	2.000.000	1.000.00	3.972.55
Parameter	Data PLN	GA-PSO-BPNN	GA	PSO	BPNN
Efisiensi distribusi energi (%)	90.58	99	95	95	94.88
Biaya operasional (rupiah)	48.047 triliun	15 triliun	40 triliun	30 triliun	37.82 triliun
Waktu komputasi (detik)	Tidak Terdefinisi	0.0856	0.1336	0.2366	0.33

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian diatas dapat, disimpulkan bahwa metode GA-PSO-BPNN merupakan metode yang paling efisien dan optimal dalam melakukan proses optimasi distribusi daya listrik jika dibandingkan dengan penggunaan metode tunggal lainnya seperti GA, PSO, ataupun BPNN secara terpisah. Hal ini ditunjukkan melalui evaluasi berupa nilai rugi daya, efisiensi distribusi energi, biaya operasional, dan dengan waktu komputasi yang cepat sebesar 200.00 MW, 99%, Rp 15 triliun, dan 0.0856 detik. Ketiga parameter utama (rugi daya, efisiensi distribusi energi, dan biaya operasional) ini menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan dengan hasil optimal dari metode tunggal lainnya dan jauh lebih baik jika dibandingkan dengan rata-rata daya aktual PLN pada periode 2015-2024 yaitu rugi daya sebesar 3.972.55, efisiensi distribusi energi 90.58%, dan biaya operasional 48.047 triliun. Masing-masing metode tunggal memang memiliki keunggulan masing-masing, namun dengan menggabungkan ketiganya dalam satu pendekatan GA-PSO-BPNN, diperoleh sistem yang mampu melakukan perbaikan iteratif dan menyeluruh, mengambil kelebihan dari setiap metode, serta menyempurnakan kelemahan yang ada. Kombinasi ini menjadikan metode GA-PSO-BPNN tidak hanya unggul dalam hal-hal akurasi hasil, tetapi juga efisiensi waktu dan stabilitas solusi. Selain itu, prediksi yang dihasilkan oleh metode BPNN tunggal untuk rentang tahun 2025 hingga 2034 menunjukkan tren yang stabil dan akurat, sangat berbeda dengan data aktual PLN yang cenderung fluktuatif. Dengan demikian, metode GA-PSO-BPNN sangat direkomendasikan untuk pengambilan keputusan dalam pengelolaan dan optimasi sistem distribusi daya listrik secara nasional untuk masa yang akan mendatang.

REFERENCES

- [1] N. Selle, N. Yudistira, and C. Dewi, "Perbandingan Prediksi Penggunaan Listrik dengan Menggunakan Metode Long Short Term Memory (LSTM) dan Recurrent Neural Network (RNN)," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 1, pp. 155–162, 2022.
- [2] H. Pratomo, "Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan Optimalisasi Susut Jaringan Tegangan Rendah dengan Metode Algoritma Genetika Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan," vol. 2, no. 1, pp. 24–28, 2024.
- [3] Agus Khumaidi *et al.*, "Prediksi Komsumsi Daya Listrik Pada Panel Listrik Menggunakan Metode Neural Network," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 11, no. 2, pp. 350–362, 2024.
- [4] A. Khan, Y. Wang, S. Khan, I. Khan, and M. Sajjad, "Genetic algorithm-based optimization for power system operation: case study on a multi-bus network," *Int. J. Adv. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 76–85, 2024.
- [5] R. Simanjuntak, Abrar Tanjung, Zulfahri, and Masnur P. Halilintar, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kV Feeder Balam Dengan Metoda Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) Di PT. PLN (Persero) Bagan Batu," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 4, pp. 443–450, 2020.
- [6] M. Mudjiono, I. Ridzki, and P. Surya, "Aplikasi Particle Swarm Optimization Pada Pemasangan Kapasitor Bank Pada Jaringan Distribusi," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 3, pp. 65–71, 2021.
- [7] A. Tanjung, "Optimalisasi Pengaturan Tegangan Di Jaringan Listrik Dengan Menggunakan Genetik Algoritma," vol. 14, no. Oktober, pp. 216–222, 2020.
- [8] M. R. Priyatama, N. Busaeri, and M. A. Risnandar, "Rekonfigurasi jaringan dan penambahan trafo sisip pada jaringan radial menggunakan algoritma genetika," vol. 4, no. 3, pp. 185–194, 2024.
- [9] M. M. Al Haromainy, D. A. Prasetya, and A. P. Sari, "Improving Performance of RNN-Based Models With Genetic Algorithm Optimization For Time Series Data," *TIERS Inf. Technol. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 16–24, 2023.
- [10] M. Faridha and D. Dewiani, "Pemanfaatan Aplikasi Particle Swarm Optimization (PSO) untuk Pengaturan Pengurangan Beban Tenaga Listrik," *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 8, no. 2, pp. 412–418, 2024.
- [11] E. Control, C. Information, and P. Systems, "JE-UNISLA," vol. 7, no. 1, pp. 42–48, 2022.
- [12] Z. M. Ahmad Putra, P. Asri, F. Romadloni, and R. R. Arnestanta, "Penerapan Algoritma Particle Swarm Optimization Untuk Meningkatkan Efisiensi Daya Keluaran Panel Surya," *J. Tek. Elektro dan Komput. TRIAC*, vol. 10, no. 2, pp. 56–64, 2023.
- [13] H. Nugroho, N. A. Yusva, and O. I. M. Pandiangan, "Penerapan Metode Particle Swarm Optimization dan Genetic Algorithm pada Optimisasi Sudut Kelengkungan Turbin Air Banki Untuk Mendapatkan Efisiensi Daya Optimal," *Energi & Kelistrikan*, vol. 14, no. 1, pp. 82–89, 2022.
- [14] H. Hartono, Y. Muharni, I. Setiawan, I. Saraswati, and A. Maulana, "Load Forecasting Energi Listrik Provinsi Banten Tahun 2022-2030 Menggunakan Metode Backpropagation Neural Network," *J. Syst. Eng. Manag.*, vol. 2, no. 1, p. 45, 2023.
- [15] A. P. Sari, H. Suzuki, T. Kitajima, T. Yasuno, D. A. Prasetya, and N. Nachrowie, "Prediction model of wind speed and direction using convolutional neural network - Long short term memory," *PECon 2020 - 2020 IEEE Int. Conf. Power Energy*, no. 1, pp. 356–361, 2020.
- [16] M. Dasuki, "Optimasi Nilai Bobot Algoritma Backpropagation Neural Network Dengan Algoritma Genetika," *JUSTINDO (Jurnal Sist. dan Teknol. Inf. Indones.)*, vol. 6, no. 1, pp. 38–44, 2021.
- [17] J. S. Habiby, A. Triwiyatno, and T. Andromeda, "Perancangan Algoritma Optimasi Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) Untuk Model Wind Turbine Farm," *AutoMech J. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 01, pp. 5–11, 2021.
- [18] P. ayu Andira, E. Suswaini, and M. R. Rathomi, "Optimasi Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Algoritma Genetika Untuk Mengurangi Rugi Daya Pada Sistem Distribusi Daya Listrik," *J. Sustain. J. Has. Penelit. dan Ind. Terap.*, vol. 9, no. 2, pp. 82–88, 2020.
- [19] N. Nurmela and N. Hiron, "Optimasi Kinerja Sistem Pembangkit Hybrid," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–11, 2019.
- [20] A. Hammains, C. Setianingsih, and M. A. Murti, "Prediksi Penggunaan Energi Listrik Menggunakan Metode Feedforward Neural Network Prediction of Electricity Using Feedforward Neural Network Method," vol. 8, no. 6, pp. 12125–12134, 2021.