

OPTIMASI PENEMPATAN *RECLOSER* JARINGAN DISTRIBUSI MENGUNAKAN METODE *SECTION TECHNIQUE* DAN ALGORITMA *GREY WOLF OPTIMIZER*

Aulia Ummara¹, Suprawikno²

¹²Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe

Jln. Kampus Ronggolawe Blok B No. 1 Mentul Cepu, Blora, Jawa Tengah

¹auliaummara7@gmail.com, ²suprawikno@yahoo.co.id

Abstract

The electrical power distribution system plays an important role because any disruptions are immediately felt by customers. The reliability of this system is measured using the SAIFI and SAIDI indices, which can be improved by placing reclosers at strategic points in the network. This study uses the Section Technique method to calculate reliability and the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm to determine the most optimal location for reclosers. A case study was conducted on the Watu Jago feeder with two scenarios: maintaining existing reclosers and without existing reclosers. Simulation results show that gradually adding reclosers from 1 to 5 units can reduce SAIFI by 78.1% and SAIDI by 83.9% in Scenario 1, while in Scenario 2, the reduction reaches 85.4% and 87.3%. Unlike previous studies that primarily used PSO or ACO algorithms, the GWO-based approach in this study proved more effective in determining the strategic positions of reclosers and enhancing the reliability of the 20 kV distribution network.

Keywords : *Grey Wolf Optimizer, Recloser, SAIDI, SAIFI, Section Technique*

Abstrak

Sistem distribusi tenaga listrik memiliki peran penting karena gangguan yang terjadi langsung dirasakan pelanggan. Tingkat keandalan sistem ini diukur dengan indeks SAIFI dan SAIDI, yang dapat ditingkatkan melalui penempatan *recloser* pada titik strategis jaringan. Penelitian ini menggunakan metode *Section Technique* untuk menghitung keandalan serta algoritma *Grey Wolf Optimizer (GWO)* dalam menentukan lokasi *recloser* yang paling optimal. Studi kasus dilakukan pada Penyulang Watu Jago dengan dua skenario, yaitu mempertahankan *existing recloser* dan tanpa *existing recloser*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan *recloser* secara bertahap dari 1 hingga 5 unit mampu menurunkan SAIFI hingga 78,1% dan SAIDI hingga 83,9% pada Skenario 1, sementara pada Skenario 2 penurunannya mencapai 85,4% dan 87,3%. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang banyak menggunakan algoritma PSO atau ACO, pendekatan berbasis GWO dalam penelitian ini terbukti lebih efektif dalam menentukan posisi strategis *recloser* dan meningkatkan keandalan jaringan distribusi 20 kV.

Kata kunci : *Grey Wolf Optimizer, Recloser, SAIDI, SAIFI,, Section Technique*

1. PENDAHULUAN

Jaringan distribusi tenaga listrik berperan penting dalam menyalurkan energi dari gardu induk ke konsumen. Peningkatan konsumsi listrik per kapita di Indonesia dari 1.173 kWh/kapita pada 2022 menjadi 1.285 kWh/kapita pada 2023 [1] menunjukkan kebutuhan akan sistem distribusi yang lebih

andal dan efisien. Gangguan pada jaringan, seperti yang terjadi pada Penyulang Watu Jago dengan tiga kali pemadaman dalam 6 bulan pertama 2023, berdampak langsung pada keandalan sistem distribusi.

Keandalan sistem distribusi umumnya dinilai menggunakan dua parameter utama, yaitu SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*)

dan SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) [2]. Optimalisasi penempatan *recloser* terbukti dapat meningkatkan keandalan jaringan dan mempercepat pemulihan layanan dengan menurunkan nilai kedua indeks tersebut[3]–[5].

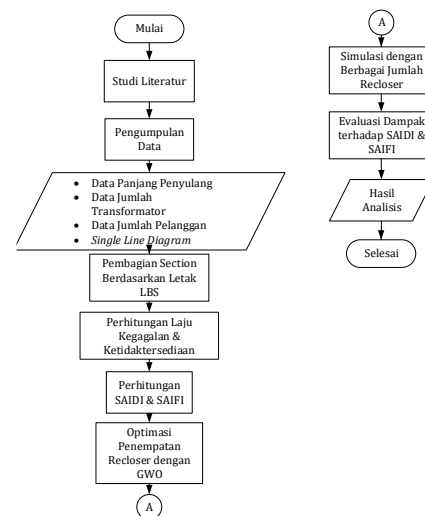
Beragam algoritma telah banyak digunakan dalam mendukung pengembangan dan pencarian solusi metode optimasi [6][7]. Beberapa algoritma yang digunakan penempatan *recloser*, di antaranya adalah *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), serta *Differential Evolution* (DE)[8]–[11], yang masing-masing memiliki kelemahan. PSO dan GA lebih rentan terjebak pada solusi lokal [12][13], DE sensitive terhadap parameter dan rentan konvergensi dini [14], sedangkan ACO lambat dalam eksplorasi awal [15].

Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini menggunakan *Grey Wolf Optimizer* (GWO) yang terinspirasi dari perilaku berburu serigala abu-abu. GWO memiliki struktur algoritma yang lebih sederhana dan mampu menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi secara adaptif [16][17]. Dengan memanfaatkan GWO, diharapkan konfigurasi penempatan *recloser* yang dihasilkan dapat secara signifikan menurunkan nilai SAIFI dan SAIDI, serta meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang mengimplementasikan GWO pada jaringan uji standar IEEE 37-bus [17], penelitian ini menerapkan GWO langsung pada kasus nyata penyulang distribusi di Indonesia dengan karakteristik gangguan spesifik, sehingga solusi yang diperoleh lebih relevan, adaptif, dan aplikatif.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Skema Alur Penelitian

Gambar 1. Menyajikan skema tahapan yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, data yang digunakan diperoleh melalui data sekunder dan studi literatur.

a. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP3 Bojonegoro-ULP Padangan. Data ini mencakup data panjang penyulang Watu Jago, jumlah pelanggan dan *single line diagram*.

b. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan menelaah berbagai sumber referensi yang relevan seperti buku, jurnal ilmiah, skripsi terdahulu dan artikel sumber terpercaya.

2.3. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan menghitung dan analisa indeks-indeks keandalan menggunakan metode *Section Technique* berdasarkan data-data dan juga rumus-rumus dari referensi terkait. Adapun tahapannya sebagai berikut :

a. Membagi penyulang Watu Jago menjadi 8 section berdasarkan letak LBS.

TABEL I. JUMLAH PELANGGAN DAN PANJANG PENYULANG WATU JAGO

Section	Pelanggan	Panjang (m)
01. GI - LBS Karang Asri	-	440
02. LBS Karang Asri - PMCB Prandon	-	4.395
03. PMCB Prandon - LBS Meduri	2.681	36.326

04. LBS Meduri - LBS Blimbing Gede	774	7.938
05. LBS Blimbing Gede - LBS Wanger	8.882	36.624
06. LBS Wanger - LBS Ngambon Kopel TGBR	3.352	21.606
07. LBS Ngrancang - Ujung	2.985	27.780
8. LBS Alas Malang - Ujung	2.975	12.489

- b. Identifikasi laju kegagalan dan waktu perbaikan peralatan sesuai dengan parameter kegagalan komponen yang diatur dalam SPLN No. 59 : 1985 dan SPLN No. 68-2 : 1986 [18], [19].

TABEL II. STANDAR LAJU KEGAGALAN DAN WAKTU PERBAIKAN KOMPONEN

No.	Komponen	λ (kegagalan/ tahun)	r (jam/ kegagalan)
1.	SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah)	0,2	3
2.	Transformator	0,005	10
3.	FCO (Fuse Cut Out)	0,003	0,25
4.	Recloser	0,005	10
5.	PMT (Pemutus Tenaga)	0,004	10
6.	LBS (Load Break Switch)	0,003	10

- c. Melakukan perhitungan laju kegagalan (λ) dan ketidaktersediaan (U) masing-masing section menggunakan persamaan (1) dan (2) [20].

$$\lambda_s = \sum \lambda_i \quad (1)$$

Keterangan :

λ_s = Laju kegagalan section

λ_i = Laju kegagalan komponen

$$U_s = \sum \lambda_i \times r_i \quad (2)$$

Keterangan :

U_s = Ketidaktersediaan (jam/tahun)

λ_i = Laju kegagalan komponen

r_i = Waktu perbaikan

- d. Menghitung nilai SAIFI dan SAIDI pada masing-masing section dengan persamaan (3) dan (4) [21].

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \times N_i}{\sum N} \quad (3)$$

Keterangan :

λ_i = Laju kegagalan rata-rata pada titik beban (kali/tahun)

N_i = Jumlah pelanggan pada titik beban

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \times N_i}{\sum N} \quad (4)$$

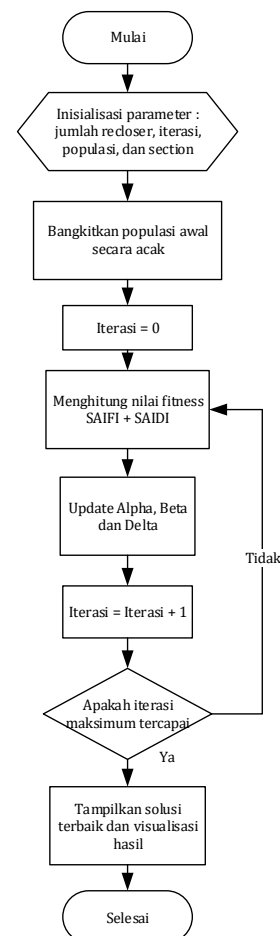
Keterangan :

U_i = Durasi pemadaman tahunan pada titik beban (jam/tahun)

N_i = Jumlah pelanggan pada titik beban

2.4. Penerapan Algoritma GWO

Setelah melakukan perhitungan SAIFI dan SAIDI menggunakan metode *Section Technique*, selanjutnya akan diterapkan algoritma GWO untuk menentukan penempatan recloser yang optimal. Berikut adalah diagram alir penerapan GWO :



Gambar 2. Diagram Alir Algoritma GWO

- a. Inisialisasi Parameter
Pada tahap ini ditetapkan jumlah *recloser* yang akan ditempatkan, jumlah iterasi maksimum, ukuran populasi, serta pembagian section jaringan. Dalam penelitian ini digunakan ukuran populasi 30 serigala dan iterasi maksimum 100. Parameter α , β , dan δ didefinisikan secara dinamis mengikuti mekanisme GWO agar menjaga keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi
- b. Pembangkitan Populasi Awal
Dibangkitkan sejumlah solusi awal secara acak. Setiap solusi merepresentasikan kemungkinan konfigurasi penempatan *recloser* pada section jaringan.
- c. Evaluasi Fitness
Fitness dihitung dengan menjumlahkan nilai SAIFI dan SAIDI yang dihasilkan setiap konfigurasi. Semakin kecil nilai fitness, semakin baik kualitas solusi tersebut.
- d. Pembaruan Alpha, Beta, dan Delta
Tiga solusi terbaik dipilih sebagai alpha (terbaik), beta (kedua terbaik), dan delta (ketiga terbaik). Solusi lain (omega) diperbarui posisinya dengan merujuk pada ketiga serigala tersebut untuk mendeteksi solusi optimal.
- e. Iterasi dan Konvergensi
Proses pembaruan posisi serigala dilakukan berulang hingga iterasi maksimum tercapai atau nilai fitness tidak lagi menunjukkan perbaikan signifikan.
- f. Hasil Akhir
Pada tahap ini ditampilkan solusi terbagi berupa konfigurasi penempatan *recloser* optimal, disertai visualisasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan dua skenario simulasi untuk menganalisis pengaruh penempatan *recloser* terhadap peningkatan keandalan sistem distribusi 20 kV. Kedua skenario menggunakan struktur jaringan dan data gangguan yang sama, namun memiliki perbedaan dalam kondisi awal jumlah *recloser*.

- a. Skenario 1 – Dengan *Existing Recloser*
Pada skenario ini, sistem distribusi diasumsikan telah memiliki satu *recloser* yang sudah terpasang sebelumnya, yaitu

pada section 2. Selanjutnya, dilakukan penambahan *recloser* baru secara bertahap mulai dari satu hingga lima unit. Lokasi penempatan *recloser* tambahan ditentukan menggunakan algoritma GWO. Tujuan dari skenario ini adalah untuk mengetahui seberapa besar peningkatan keandalan sistem jika dilakukan penguatan proteksi tanpa mengubah posisi *recloser* awal yang sudah ada.

- b. Skenario 2 – Tanpa *Existing Recloser*
Pada skenario kedua, diasumsikan bahwa sistem distribusi belum memiliki *recloser* yang terpasang. Dengan demikian, seluruh *recloser*, mulai dari satu hingga lima unit, ditempatkan secara penuh berdasarkan hasil optimasi menggunakan algoritma GWO tanpa ada batasan lokasi awal. Skenario ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan keandalan sistem distribusi jika dilakukan perencanaan penempatan *recloser* dari awal secara menyeluruh.

3.1. Perhitungan Metode *Section Technique*

Dalam perhitungan menggunakan metode *Section Technique*, tahap awal analisis nilai keandalan diawali dengan membagi penyulang menjadi beberapa section. Pada penelitian ini, penyulang Watu Jago dibagi menjadi 8 section. Setelah dibagi dalam beberapa section, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai laju kegagalan (λ_i). ketidaktersediaan komponen (U_i), SAIFI dan SAIDI.

TABEL III. HASIL PERHITUNGAN METODE *SECTION TECHNIQUE* SKENARIO 1

Sc	$\Sigma \lambda_i$	ΣU_i	N_i	SAIFI	SAIDI
1.	0,088	0,264	0	0	0
2.	0,879	2,637	0	0	0
3.	7,364	22,551	2.681	0,911	2,792
4.	1,610	4,963	774	0,057	0,177
5.	0,311	2,069	8.882	0,127	0,848
6.	0,537	2,220	3.352	0,083	0,343
7.	5,659	17,523	2.985	0,780	2,416
8.	2,561	8,0457	2.975	0,352	1,105

Pada skenario 1, *recloser* yang telah dipasang di Section 2 berfungsi untuk memisahkan gangguan antara bagian *upstream* dan *downstream*. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai SAIFI dan SAIDI pada Section 1 dan 2 menunjukkan 0 (nol). Namun, hal ini tidak sepenuhnya disebabkan oleh keberadaan *recloser*, melainkan karena tidak terdapat pelanggan yang terhubung pada kedua Section tersebut. Dengan demikian, nilai gangguan baru

teramati mulai dari *Section 3* hingga *Section 8*. Secara keseluruhan, total SAIFI dan SAIDI pada skenario ini masing-masing adalah 1,537251742 dan 7,68458.

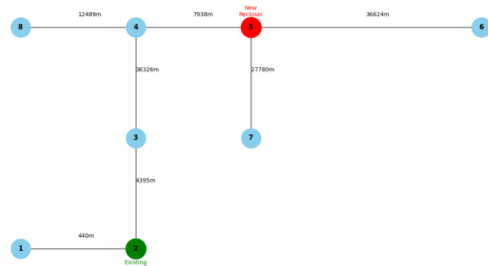
TABEL VI. HASIL PERHITUNGAN METODE *SECTION TECHNIQUE* SKENARIO 2

Sc	$\Sigma \lambda_i$	ΣU_i	N_i	SAIFI	SAIDI
1.	0,088	0,264	21.649	0,088	0,264
2.	0,879	2,637	21.649	0,879	2,637
3.	7,364	22,551	2.681	0,911	2,792
4.	1,610	4,963	774	0,057	0,177
5.	0,311	2,069	8.882	0,127	0,848
6.	0,537	2,220	3.352	0,083	0,343
7.	5,659	17,523	2.985	0,780	2,416
8.	2,561	8,0457	2.975	0,352	1,105

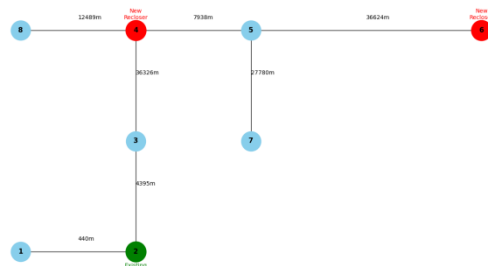
Pada skenario 2, *recloser* tidak dipasang di *Section 2*. Meskipun demikian, nilai SAIFI dan SAIDI pada *Section 1* dan *2* tetap dihitung. Hal ini terjadi karena mempertimbangkan gangguan yang dapat menjalar ke seluruh sistem. Total SAIFI dan SAIDI pada skenario ini mencapai 2,50429 dan 10,5856 yang lebih tinggi dibandingkan skenario 1.

3.2. Hasil Optimasi Penempatan *Recloser*

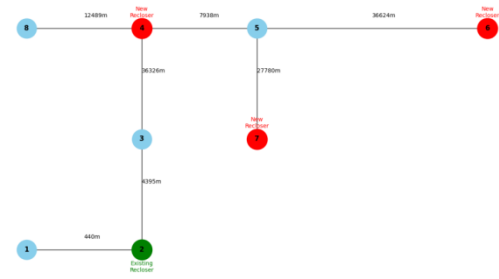
Berdasarkan simulasi yang dilakukan, dapat dilihat perubahan nilai indeks keandalan SAIFI dan SAIDI pada penyulang Watu Jago. Berikut disajikan hasil dan perbandingan kedua indeks keandalan tersebut sebelum dan setelah optimasi.



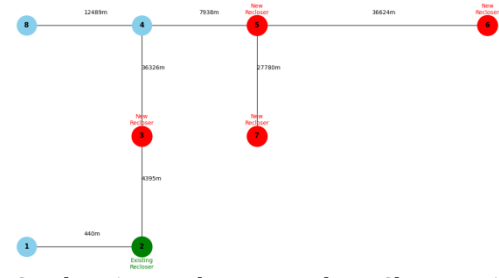
Gambar 3. Visualisasi 1 *Recloser* Skenario 1



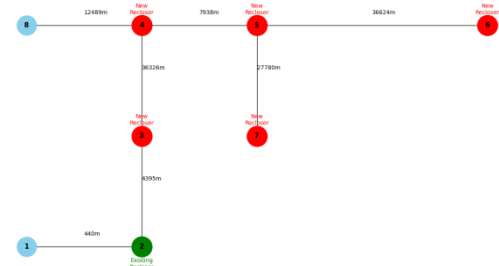
Gambar 4. Visualisasi 2 *Recloser* Skenario 1



Gambar 5. Visualisasi 3 *Recloser* Skenario 1



Gambar 6. Visualisasi 4 *Recloser* Skenario 1



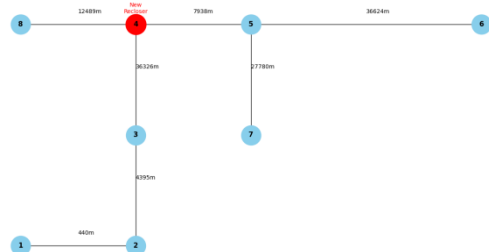
Gambar 7. Visualisasi 5 *Recloser* Skenario 1

TABEL V. HASIL OPTIMASI SKENARIO 1

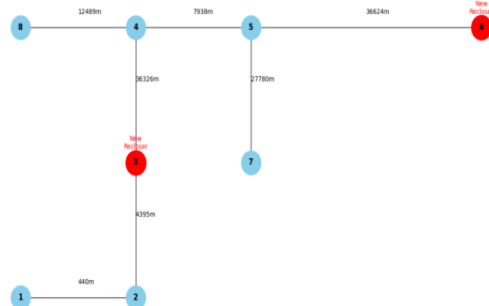
Jumlah <i>Recloser</i>	Section	SAIFI	SAIDI
1	5	1,148218	3,839038
2	4, 6	0,58575	2,117535
3	4, 6, 7	0,429991	1,633087
4	3, 5, 6, 7	0,364492	1,341919
5	3, 4, 5, 6, 7	0,336297	1,238763

Hasil optimasi penempatan *recloser* pada Skenario 1 menunjukkan bahwa penambahan *recloser* secara bertahap dari satu hingga lima unit mampu menurunkan SAIFI dan SAIDI secara signifikan. Sebelum optimasi, sistem hanya memiliki satu *recloser* di section 2 dengan SAIFI sebesar 1,5374 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI sebesar 7,6846 jam/pelanggan/tahun. Penambahan *recloser* pertama di section 5 menurunkan SAIFI menjadi 1,148 dan SAIDI menjadi 3,839. Penambahan *recloser* kedua di section 4 dan 6 menurunkan SAIFI menjadi 0,586 dan SAIDI menjadi 2,118. Dengan tiga *recloser*, penempatan di section 7 menurunkan SAIFI menjadi 0,430 dan SAIDI 1,633.

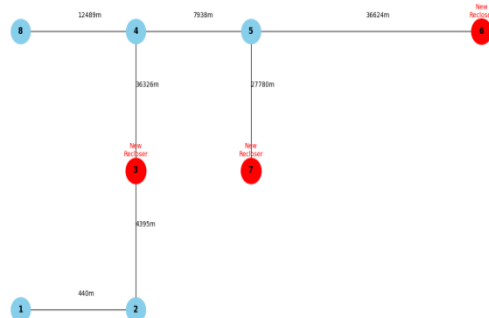
Penempatan empat *recloser* menambahkan section 3 sehingga SAIFI menjadi 0,364 dan SAIDI 1,342. Pada lima *recloser*, seluruh section kritis dari 3 hingga 7 dilengkapi *recloser* sehingga SAIFI menurun menjadi 0,336 dan SAIDI menjadi 1,239, menandakan mitigasi gangguan menyeluruh dan peningkatan keandalan sistem distribusi 20 kV sebesar 78,11% untuk SAIFI dan 83,91% untuk SAIDI.



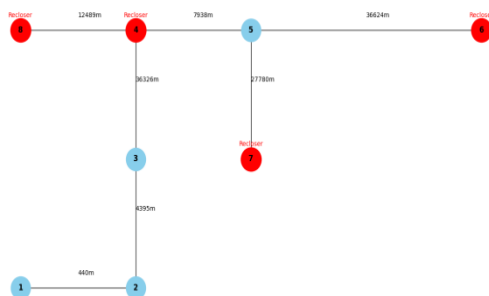
Gambar 8. Visualisasi 1 *Recloser* Skenario 2



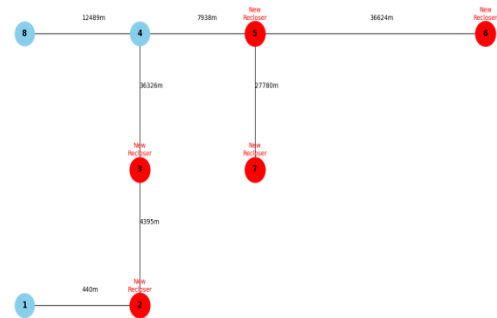
Gambar 9. Visualisasi 2 *Recloser* Skenario 2



Gambar 10. Visualisasi 3 *Recloser* Skenario 2



Gambar 11. Visualisasi 4 *Recloser* Skenario 2

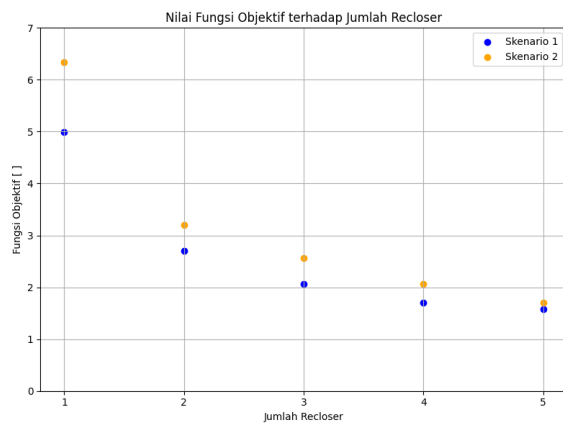


Gambar 12. Visualisasi 5 *Recloser* Skenario 2

TABEL VI. HASIL OPTIMASI SKENARIO 2

Jumlah <i>Recloser</i>	Section	SAIFI	SAIDI
1	4	1,438049	4,898946
2	3, 6	0,705854	2,497894
3	4, 6, 7	0,55095	2,013446
4	3, 5, 6, 7	0,429991	1,633087
5	3, 4, 5, 6, 7	0,364492	1,341919

Pada Skenario 2, kondisi awal tanpa *recloser* menghasilkan SAIFI 2,50429 dan SAIDI 10,5856. Penambahan *recloser* pertama di section 4 menurunkan SAIFI menjadi 1,438 dan SAIDI menjadi 4,899, yaitu penurunan masing-masing sekitar 42,6% untuk SAIFI dan 53,7% untuk SAIDI dibanding kondisi awal. Penambahan *recloser* kedua di section 3 dan 6 menurunkan SAIFI menjadi 0,706 dan SAIDI menjadi 2,498, atau penurunan kumulatif 71,8% untuk SAIFI dan 76,4% untuk SAIDI. Dengan tiga *recloser*, penempatan di section 7 menurunkan SAIFI menjadi 0,551 dan SAIDI menjadi 2,013, dengan penurunan kumulatif 78,0% untuk SAIFI dan 81,0% untuk SAIDI. Strategi empat *recloser* menempatkan di section 3, 5, 6, dan 7 sehingga SAIFI menjadi 0,430 dan SAIDI 1,633, atau penurunan kumulatif 82,8% dan 84,6%. Penempatan lima *recloser* mencakup section 3 hingga 7 sehingga SAIFI menjadi 0,364 dan SAIDI 1,342, menunjukkan penurunan kumulatif 85,44% untuk SAIFI dan 87,33% untuk SAIDI, menandakan mitigasi optimal dan peningkatan keandalan yang signifikan.

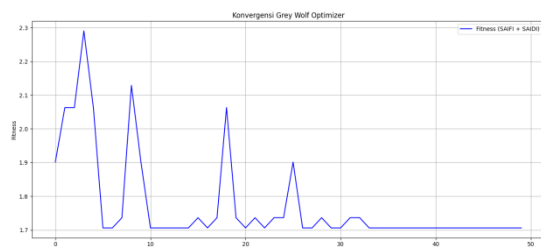


Gambar 13. Grafik Nilai Fungsi Objektif

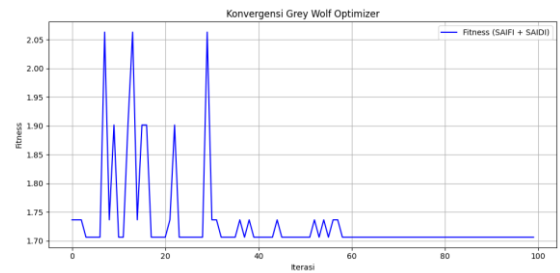
Gambar 13 menggambarkan hubungan antara jumlah *recloser* dan nilai fungsi objektif pada 2 skenario. Terlihat bahwa semakin banyak *recloser* yang ditempatkan, nilai fungsi objektif cenderung menurun pada kedua skenario, yang menunjukkan peningkatan keandalan sistem distribusi listrik. Penurunan paling signifikan terjadi ketika jumlah *recloser* bertambah dari 1 hingga 3 unit. Setelah itu, penurunannya cenderung melambat. Skenario 1, yang memiliki *existing recloser* di *Section 2*, secara konsisten menunjukkan nilai fungsi objektif yang lebih rendah dibandingkan Skenario 2. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan *recloser* awal memberikan dampak positif dalam membatasi area gangguan, sehingga *recloser* tambahan dapat bekerja lebih efektif dalam meningkatkan keandalan jaringan.

3.3. Uji Sensitivitas Parameter Algoritma GWO

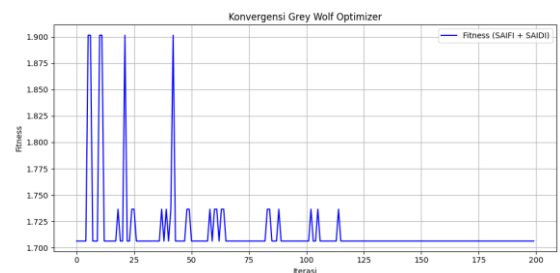
Pengujian sensitivitas dilakukan dengan variasi populasi serigala pada algoritma GWO, yaitu 20, 30, dan 50, masing-masing dengan jumlah iterasi maksimum 50, 100, dan 200.



Gambar 14. Konvergensi GWO dengan populasi 20 dan iterasi maksimum 50



Gambar 15. Konvergensi GWO dengan populasi 30 dan iterasi maksimum 100



Gambar 16. Konvergensi GWO dengan populasi 50 dan iterasi maksimum 200

TABEL VII. HASIL UJI SENSITIVITAS

Populasi	Iterasi	Nilai Fitness	Iterasi Konvergen
20	50	1,706411	33
30	100	1,706411	58
50	200	1,706411	116

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi populasi mampu menemukan nilai fitness optimal yang sama, yaitu sebesar 1,706411, sehingga dapat disimpulkan bahwa GWO memiliki stabilitas yang baik dalam menemukan solusi optimal. Namun, kecepatan konvergensi berbeda: populasi 20 lebih cepat mencapai solusi, populasi 30 sedikit lebih lambat, dan populasi 50 paling lambat karena ruang pencarian lebih luas.

Jika dibandingkan secara kuantitatif dengan algoritma lain seperti PSO dan GA dari penelitian sebelumnya, GWO menunjukkan kinerja yang lebih unggul. Misalnya, penempatan lima *recloser* dengan ACO hanya mampu menurunkan SAIFI sekitar 73% dan SAIDI 66% [11], sedangkan PSO mencapai 58% dan 52% [10]. Dalam penelitian ini, GWO mampu menurunkan SAIFI hingga 85,44% dan SAIDI 87,33%. Artinya, GWO tidak hanya stabil dalam pencarian solusi, tetapi juga lebih efektif dalam memberikan perbaikan indeks keandalan sistem distribusi 20 kV.

4. Kesimpulan dan Saran

Algoritma *Grey Wolf Optimizer* terbukti efektif meningkatkan keandalan jaringan distribusi 20 kV dengan menurunkan nilai SAIFI dan SAIDI secara signifikan. Pada Skenario 1 (dengan *recloser* awal), penurunan SAIFI dan SAIDI masing-masing mencapai 78,11% dan 83,89%, sementara pada Skenario 2 (tanpa *recloser* awal) penurunannya lebih besar, yakni 85,44% dan 87,33%. Penerapan GWO pada kasus nyata jaringan distribusi PLN menunjukkan efektivitas dan stabilitas yang baik, meskipun penelitian ini masih terbatas karena belum mempertimbangkan aspek biaya, koordinasi proteksi, serta keterbatasan data gangguan historis.

Penelitian selanjutnya disarankan membandingkan GWO dengan algoritma lain serta memasukkan faktor biaya dan efisiensi investasi sebagai variabel optimasi. Kajian juga dapat diperluas pada jaringan yang lebih kompleks dan menggunakan data gangguan riil untuk hasil yang lebih representatif. Selain itu, analisis dampak penempatan *recloser* terhadap sistem proteksi secara menyeluruh juga menjadi topik penting untuk dikaji.

Daftar Pustaka:

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkat, Tahun 2023 Capai 1.285 kWh/Kapita," Jan. 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/konsumsi-listrik-masyarakat-meningkat-tahun-2023-capai-1285-kwh-kapita>.
- [2] Arman, T. Rijanto, Joko, and R. Harimurti, "Analisis Penempatan *Recloser* Terhadap Keandalan Sistem Tenaga Listrik Jaringan Distribusi 20kV di PT. PLN (Persero) ULP AMUNTAI," vol. Vol. 13 No, 2024, doi: <https://doi.org/10.26740/jte.v13n2.p130-134>.
- [3] D. A. P. Hasugian, "Penempatan *Recloser* Terhadap Keandalan Sistem Distribusi di PT. PLN (Persero) Kota Subulussalam Aceh," vol. 3, 2023.
- [4] A. Afrah, B. Badriana, D. Fariadi, and A. Bintoro, "Studi *Recloser* untuk Memaksimalkan Kinerja Sistem Tenaga Listrik pada Jaringan Distribusi di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Beureunuen," *J. Energi Elektr.*, vol. 12, no. 1, p. 19, Apr. 2023, doi: [10.29103/jee.v12i1.11729](https://doi.org/10.29103/jee.v12i1.11729).
- [5] H. A. Waritza, G. Gunawan, and A. A. Nugroho, "Optimalisasi Kinerja Proteksi *Recloser* Jaringan Distribusi 20kV Penyulang RDT03 Menggunakan Algoritma Particle Swarm Optimization," *Elektrika*, vol. 15, no. 1 SE-Articles, pp. 11–22, 2023, doi: [10.26623/elektrika.v15i1.5623](https://doi.org/10.26623/elektrika.v15i1.5623).
- [6] S. Fadli and K. Imtihan, "PENERAPAN MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION ON THE BASIS OF RATIO ANALYSIS (MOORA) METHODÂ DALAM MENGEVALUASI KINERJA GURU HONORER," *J. Inform. dan Rekayasa Elektron.*, vol. 2, no. 2 SE-Articles, pp. 10–19, Dec. 2019, [Online]. Available: <https://e-journal.stmiklombok.ac.id/index.php/jire/article/view/109>.
- [7] A. Nurhayati, "PERBANDINGAN CHAOTIC ELEPHANT HERDING OPTIMIZATION ALGORITHM DENGAN ELEPHANT SWARM WATER SEARCH ALGORITHM," *J. Inform. dan Rekayasa Elektron.*, vol. 5, no. 1 SE-Articles, pp. 32–40, Apr. 2022, doi: [10.36595/jire.v5i1.389](https://doi.org/10.36595/jire.v5i1.389).
- [8] I. Pakaya, A. W. Basolle, and Z. Zulfatman, "Optimasi Penempatan *Recloser* pada Penyulang Olak Alen untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi Menggunakan Algoritma Differential Evolution," *Transmisi*, vol. 23, no. 1, pp. 14–20, Jan. 2021, doi: [10.14710/transmisi.23.1.14-20](https://doi.org/10.14710/transmisi.23.1.14-20).
- [9] S. I. Sari, H. Hermawan, and N. A. Darmanto, "Optimasi Penempatan *Recloser* Tambahan untuk Meminimalkan SAIFI dan SAIDI pada Jaringan Distribusi 20 kV Feeder KTN 11 PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Yogyakarta Menggunakan Genetic Algorithm (GA)," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 4, pp. 612–618, Dec. 2020, doi: [10.14710/transient.v9i4.612-618](https://doi.org/10.14710/transient.v9i4.612-618).
- [10] V. F. Seran, "Analisa Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Penyulang Renon di PT. PLN (Persero) UP2D Bali Menggunakan Metode PSO (Particle Swarm Optimization)," 2024.
- [11] B. Winardi, S. Sudjadi, and B. Winardi, "Recloser Placement Optimization In The PDP-03 Radial Network Distribution System Using Ant Colony Optimization (ACO)," *Eng. Technol. Int. J.*, vol. 4, no. 03, pp. 146–152, Nov. 2022, doi: [10.55642/eatij.v4i03.240](https://doi.org/10.55642/eatij.v4i03.240).

- [12] J. Aguila-leon, C. Chiñas-palacios, C. Vargas-salgado, E. Hurtado-perez, and E. X. M. Gaecia, "Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithm and Grey Wolf Optimizer Algorithms Performance Comparative for a DC-DC Boost Converter PID Controller," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 619–625, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.25046/aj060167>.
- [13] D. Freitas, L. G. Lopes, and F. Morgado-Dias, "Particle Swarm Optimisation: A historical review up to the current developments," *Entropy*, vol. 22, no. 3, pp. 1–36, 2020, doi: [10.3390/E22030362](https://doi.org/10.3390/E22030362).
- [14] S. Chakraborty, A. K. Saha, S. Sharma, S. K. Sahoo, and G. Pal, "Comparative Performance Analysis of Differential Evolution Variants on Engineering Design Problems," *J. Bionic Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 1140–1160, 2022, doi: [10.1007/s42235-022-00190-4](https://doi.org/10.1007/s42235-022-00190-4).
- [15] K. Lawal, "Comparative Study of Grey Wolf Optimizer and Other Metaheuristic Algorithms," no. April, 2025.
- [16] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: [10.1016/j.advengsoft.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [17] G. A. Affonso and C. B. Donadel, "Optimal Recloser Placement in Medium Voltage Distribution Networks Using Grey Wolf Optimizer," *Next Res.*, vol. 2, no. 1, p. 100120, Mar. 2025, doi: [10.1016/j.nexres.2024.100120](https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100120).
- [18] Perusahaan Umum Listrik Negara, "SPLN 59 1985 : Keandalan Pada Sistem Distribusi 20 kV dan 6 kV." Jakarta, 1985.
- [19] Perusahaan Umum Listrik Negara, "SPLN 68-2 1986 : Tingkat Jaminan Sistem Tenaga Listrik (Bagian Dua : Sistem Distribusi)." Jakarta, 1986.
- [20] R. Allan and R. Billinton, "Probabilistic Assessment of Power Systems," *Proc. IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 140–162, Feb. 2000, doi: [10.1109/5.823995](https://doi.org/10.1109/5.823995).
- [21] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluation of power systems*, 2nd ed., vol. 26, no. 5. New York: Plenum Press, 1996.