

Reposisi Cerdas *Recloser* Berbasis Algoritma Genetika untuk Efisiensi dan Keandalan Jaringan Listrik *Feeder* Andiang – Studi Kasus di PT PLN ULP 50 Kota

Muhammad Isa¹, Muhammad Ikhwanus²

^{1,2}Program Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Indonesia

Email: muhammad.210150133@mhs.unimal.ac.id¹

Article Info

Article history:

Received July 11, 2026

Revised August 01, 2026

Accepted August 06, 2026

Keywords:

Distribution System, Genetic Algorithm, *Recloser*, SAIDI, SAIFI

ABSTRACT

This study aims to determine the optimal repositioning of reclosers using a genetic algorithm to enhance distribution system reliability. The research methodology involved collecting data on network configuration, historical faults, and distribution system components, followed by an optimization process for recloser repositioning using a genetic algorithm guided by an objective function to identify the optimal placement configuration. The optimization results were compared against the existing conditions through an analysis of SAIFI and SAIDI values. The findings demonstrate that the genetic algorithm successfully determined more optimal recloser positions, thereby improving distribution system reliability by reducing SAIFI and SAIDI values compared to pre-optimization levels. This method serves as a viable alternative for recloser placement planning to enhance the efficiency and reliability of electric power distribution systems.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Article Info

Article history:

Received July 11, 2026

Revised August 01, 2026

Accepted August 06, 2026

Kata kunci:

Algoritma Genetika, *Recloser*, Sistem Distribusi, SAIDI, SAIFI

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menentukan reposisi *recloser* yang optimal menggunakan algoritma genetika untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi. Metode penelitian dilakukan melalui pengumpulan data konfigurasi jaringan, data historis gangguan, dan data komponen sistem distribusi, kemudian dilanjutkan dengan proses optimasi reposisi *recloser* menggunakan algoritma genetika berdasarkan fungsi objektif untuk memperoleh konfigurasi penempatan yang optimal. Hasil optimasi dibandingkan dengan kondisi eksisting melalui analisis nilai SAIFI dan SAIDI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma genetika mampu menghasilkan posisi *recloser* yang lebih optimal sehingga meningkatkan keandalan sistem distribusi dengan menurunkan nilai SAIFI dan SAIDI dibandingkan kondisi sebelum optimasi. Metode ini dapat dijadikan sebagai alternatif dalam perencanaan penempatan *recloser* guna meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Muhammad Isa

Program Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Indonesia

Email: muhammad.210150133@mhs.unimal.ac.id¹

PENDAHULUAN

Sistem distribusi merupakan salah satu bagian penting dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik hingga sampai ke pelanggan. Seiring berkembangnya kebutuhan energi listrik baik pada sektor industri maupun rumah tangga, diperlukan sistem

distribusi yang handal dan jarang mengalami gangguan agar kontinuitas pasokan tetap terjaga. Menurut Ibrahim (2006), keandalan suatu sistem distribusi tenaga listrik ditandai dengan kontinuitas pelayanan serta peningkatan efisiensi sistem, yang salah satunya diukur melalui angka SAIDI dan SAIFI. Tingkat keandalan menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap kesinambungan kerja sistem, sehingga sarana penyaluran daya seperti *feeder* atau penyulang beserta peralatan terkait harus mendapat perhatian khusus dalam pemeliharannya.

Feeder atau penyulang sebagai bagian dari sistem tenaga listrik merupakan komponen yang sering mengalami kegagalan, dan kegagalan komponen tersebut menyebabkan terputusnya aliran daya kepada konsumen. Saodah (2008) menyatakan bahwa dari beberapa faktor penentu kualitas energi listrik, kontinuitas pelayanan adalah faktor yang paling dirasakan langsung oleh pelanggan karena banyaknya keluhan terhadap pemadaman yang sering terjadi. Salah satu cara meningkatkan keandalan pada suatu penyulang adalah dengan meminimalisir gangguan yang menyebabkan pemadaman, antara lain melalui pemasangan *recloser* pada jaringan. Menurut SPLN No. 59 (1985), indeks keandalan merupakan besaran yang digunakan untuk membandingkan penampilan sistem distribusi, di mana indeks frekuensi pemadaman rata-rata dan indeks lama pemadaman rata-rata menjadi dua indikator yang paling sering digunakan.

Dengan adanya pemasangan *recloser*, gangguan pada jaringan dapat ditanggulangi dalam waktu singkat dan daerah yang terdampak dapat diperkecil karena bagian yang terganggu dapat dipisahkan secara cepat. Keandalan yang baik akan menunjang tujuan PT PLN (Persero) dalam mencapai *World Customer Service* (WCS) dan *World Class Company* (WCC), dengan target indeks keandalan SAIDI sebesar 100 menit/pelanggan/tahun dan SAIFI sebesar 3 kali/pelanggan/tahun. Penelitian mengenai optimasi penempatan *recloser* untuk meningkatkan keandalan telah banyak dilakukan, di antaranya oleh Jordan (2021) dan Waritza (2023) yang menganalisis pengaruh penempatan *recloser* terhadap kinerja proteksi jaringan distribusi 20 kV. Hasil serupa juga ditemukan oleh Purnama (2023) yang mengoptimasi penempatan *recloser* untuk meningkatkan keandalan penyulang, serta Akhmad (2022) yang menganalisis pengaruh penempatan *recloser* terhadap keandalan sistem.

PT PLN (Persero) ULP 50 Kota memiliki 11 *feeder*, dan di antara seluruh penyulang tersebut terdapat satu *feeder* yang paling sering mengalami pemadaman akibat gangguan, yaitu *feeder* Andiang. Pada periode Januari hingga Juni 2025 tercatat sebanyak 53 kali gangguan pada *feeder* ini, terdiri dari 15 gangguan akibat hewan dan ranting pohon, 28 gangguan temporer, dan 10 gangguan permanen. Hampir 50% panjang saluran utama pada *feeder* ini masih menggunakan penghantar telanjang jenis AAAC, sehingga rentan terhadap gangguan eksternal seperti petir, hewan, dan ranting pohon. Program rekonduktor menyeluruh dari AAAC ke AAACS memang memungkinkan, namun memerlukan waktu dan biaya yang sangat besar sehingga belum menjadi solusi jangka pendek yang efisien.

Feeder Andiang disuplai oleh Gardu Induk Payakumbuh dengan panjang total 78,945 kms dan memiliki tiga buah *recloser* eksisting, yaitu *recloser* PB Bungo, *recloser* Simpang 5 Andiang, dan *recloser* Mahat. Dalam mengoptimasi penempatan *recloser* telah dikembangkan berbagai metode, dan salah satu metode yang efektif adalah algoritma genetika. Menurut Sutojo dkk (2010), algoritma genetika merupakan metode pencarian yang meniru proses evolusi biologis untuk menemukan solusi optimal dari suatu permasalahan. Zukhri (2013) menjelaskan bahwa algoritma genetika bekerja melalui mekanisme seleksi, *crossover*, dan mutasi untuk memperoleh solusi terbaik dari ruang pencarian yang besar. Pendekatan serupa juga telah diterapkan oleh Putra (2020) serta Pakaya (2021) dalam perancangan penempatan *recloser* yang optimum pada jaringan distribusi. Hidayati (2024) turut menganalisis tingkat keandalan jaringan listrik terhadap gangguan, sedangkan Rijanto (2024) mengkaji penempatan *recloser* pada jaringan distribusi 20 kV untuk menekan indeks keandalan sistem.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini melakukan studi optimasi reposisi *recloser* untuk meningkatkan keandalan sistem pada *feeder* Andiang menggunakan metode algoritma genetika. Metode ini diharapkan mampu menentukan posisi penempatan *recloser* yang tepat guna menekan angka gangguan JTM serta menurunkan nilai indeks keandalan SAIDI, SAIFI, dan CAIDI dari realisasi tahun sebelumnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif dalam perencanaan penempatan *recloser* yang lebih efisien tanpa memerlukan penambahan perangkat baru pada jaringan.

METODE

Jenis penelitian yang digunakan adalah studi kasus dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan mengkaji data-data teknis pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 20 kV, dengan lokasi kajian pada *feeder* Andiang dari total 11 *feeder* yang ada di PT PLN (Persero) ULP Lima Puluh Kota. Populasi penelitian adalah seluruh komponen jaringan distribusi pada *feeder* Andiang, sedangkan sampel difokuskan pada tiga *recloser* eksisting beserta jalur Bungo, Anding, dan Mahat yang menaunginya. Data yang dikumpulkan meliputi panjang penyulang, jumlah dan kapasitas transformator distribusi, peralatan *switching*, jumlah pelanggan tersambung, peralatan proteksi, serta *single line diagram* sistem distribusi 20 kV. Instrumen pengukuran keandalan yang digunakan adalah indeks SAIDI, SAIFI, dan CAIDI yang dihitung berdasarkan model seksi mengacu pada standar IEEE Std 1366-2012, dengan parameter laju gangguan saluran, durasi padam sebelum dan sesudah isolasi, serta jumlah pelanggan per gardu distribusi.

Prosedur penelitian diawali dengan observasi dan survei langsung di lapangan untuk mencocokkan kondisi jaringan dengan *single line diagram* yang ada, dilanjutkan dengan pencatatan data historis gangguan penyulang selama periode 2023 hingga September 2025. Data tersebut kemudian digunakan untuk menghitung indeks keandalan pada kondisi eksisting (*baseline*) sebagai titik awal analisis. Selanjutnya dilakukan proses optimasi reposisi *recloser* menggunakan algoritma genetika, di mana setiap posisi *recloser* direpresentasikan sebagai kromosom dan dievaluasi melalui fungsi *fitness* yang meminimalkan nilai gabungan SAIDI dan SAIFI. Hasil posisi optimal kemudian dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengetahui besarnya peningkatan keandalan. Seluruh proses perhitungan dan optimasi diimplementasikan menggunakan perangkat lunak *Python* dengan validasi hasil melalui simulasi *software* ETAP, sehingga kesimpulan mengenai efektivitas metode dapat ditarik secara kuantitatif berdasarkan persentase penurunan indeks keandalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Sistem yang Dianalisis

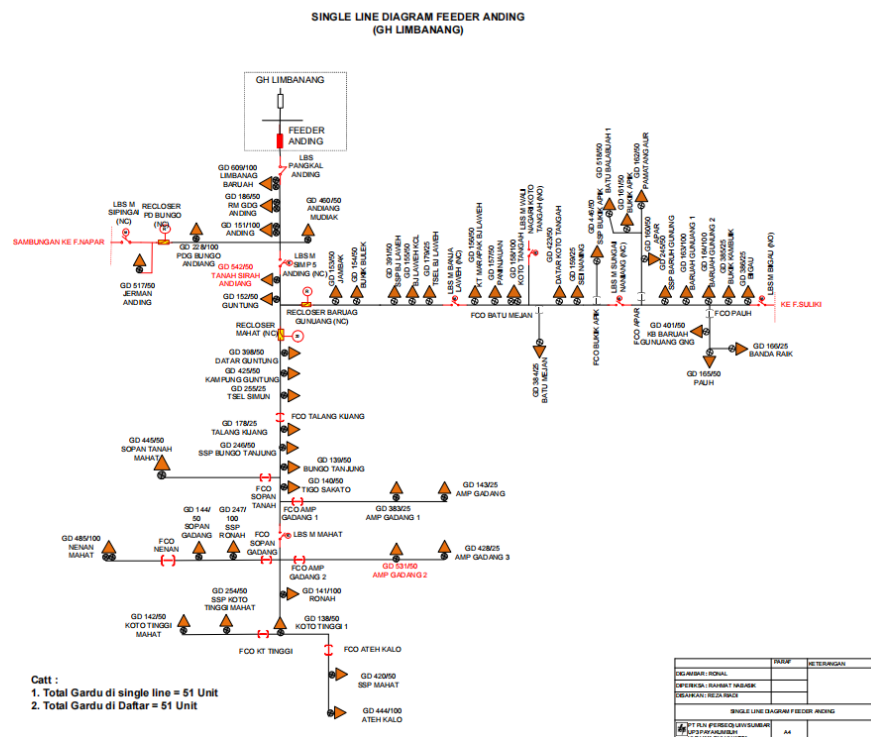
Penelitian ini menganalisis sistem jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV pada *Feeder* Anding yang bersumber dari Gardu Hubung (GH) Limbang. Jaringan ini melayani wilayah distribusi yang terbagi dalam beberapa jalur utama, yaitu jalur Bungo, jalur Anding, dan jalur Mahat. Rekapitulasi komponen jaringan disajikan pada Tabel 1, sedangkan *single line diagram* keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Komponen Jaringan *Feeder* Anding

No.	Komponen	Simbol	Jumlah
1	Gardu Hubung	GH	1 unit
2	Gardu Distribusi	GD	54 unit
3	<i>Recloser</i>	REC	3 unit
4	<i>Load Break Switch</i>	LBS	9 unit

No.	Komponen	Simbol	Jumlah
5	<i>Fuse Cut Out</i>	FCO	14 unit
6	<i>Feeder / Penyulang</i>	FDR	2 unit
7	<i>Node / Titik Percabangan</i>	N	11 unit
Total			94 unit

Berdasarkan Tabel 1, jaringan *Feeder* Anding tersusun atas 94 unit komponen dengan tiga buah *recloser* eksisting yang terpasang pada posisi awal masing-masing jalur, yaitu *Recloser* PD Bungo pada jalur Bungo, *Recloser* Simp. 5 Anding pada jalur Anding, dan *Recloser* Mahat pada jalur Mahat. Keberadaan *recloser* ini berfungsi sebagai perangkat proteksi otomatis yang mampu melakukan pemutusan dan penutupan (*reclosing*) secara mandiri apabila terjadi gangguan pada saluran di sebelah hilirnya, sehingga daerah terdampak dapat dipersempit.



Gambar 1. *Single Line Diagram Feeder Anding*

Parameter Keandalan yang Digunakan

Perhitungan indeks keandalan dalam penelitian ini mengacu pada standar IEEE Std 1366-2012 dengan menggunakan model seksi (*section-based reliability model*). Parameter-parameter keandalan yang digunakan dirangkum dalam Tabel 2.

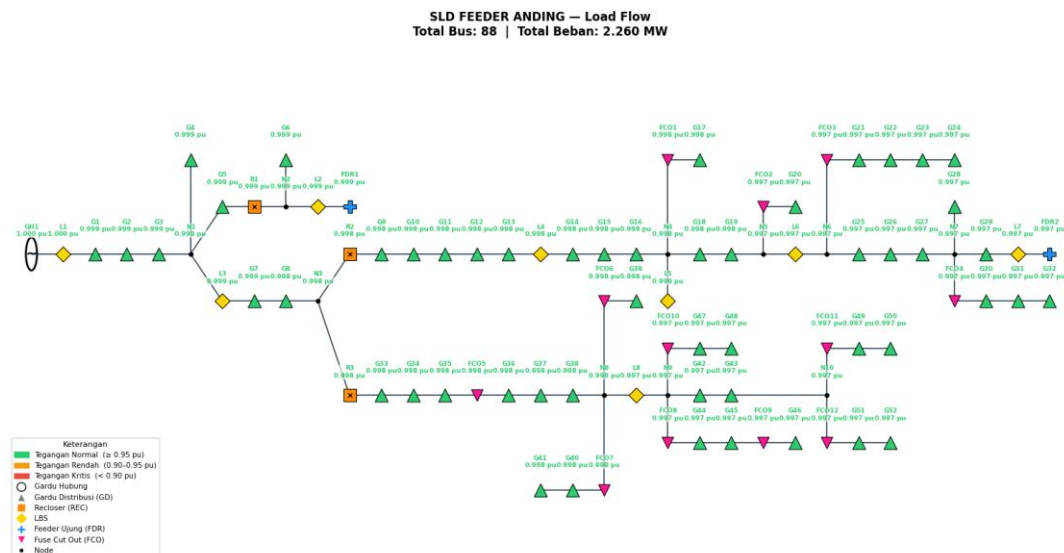
Tabel 2. Parameter Keandalan Jaringan

No.	Parameter	Simbol	Nilai
1	Laju gangguan saluran	λ	0,20 ggn/km/tahun
2	Durasi padam sebelum isolasi (manual)	Usblm	2,0 jam
3	Durasi padam setelah isolasi (<i>recloser</i>)	Ustlh	0,5 jam
4	Jumlah pelanggan per gardu distribusi	NGD	130 pelanggan
5	Total pelanggan terlayani	Ntotal	6.779 pelanggan

Berdasarkan Tabel 2, indeks keandalan yang dihitung meliputi SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*), ASAI (*Average Service Availability Index*), dan ENS (*Energy Not Supplied*). Perhitungan menggunakan model seksi, di mana setiap saluran diperlakukan sebagai titik gangguan potensial dengan laju gangguan sebesar λ dikalikan panjang saluran, dan pelanggan yang terdampak dibedakan menjadi dua zona setelah *recloser* beroperasi, yaitu zona yang dapat dipulihkan (*restore*) dan zona yang tidak dapat dipulihkan (seksi *fault*). Model ini menjadikan nilai SAIFI bersifat dinamis terhadap posisi *recloser*, berbeda dengan pendekatan konvensional yang menganggap SAIFI konstan.

Analisis Keandalan Kondisi Eksisting (*Baseline*)

Analisis kondisi eksisting dilakukan untuk mengetahui performa awal sistem distribusi pada *Feeder Anding* sebelum dilakukan rekonfigurasi. Evaluasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi aliran daya (*load flow*) dan kondisi profil tegangan pada setiap bus, dengan hasil *Single Line Diagram* sebelum optimasi ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh total 88 bus dengan total beban sebesar 2,260 MW, dan sebagian besar bus masih berada pada kondisi normal dengan nilai tegangan di atas 0,95 pu.



Gambar 2. SLD *Feeder Anding* Hasil Simulasi Sebelum Optimasi

Rekapitulasi jumlah kejadian gangguan *feeder Anding* berdasarkan data historis selama tiga tahun (2023–September 2025) disajikan pada Tabel 3, sebagai dasar perhitungan indeks keandalan sistem pada kondisi eksisting.

Tabel 3. Rekapitulasi Jumlah Gangguan *Feeder Anding* Tahun 2023–2025

No.	Tahun	Jumlah Gangguan
1	2023	85 kali
2	2024	91 kali
3	2025*	82 kali
Total		258 kali

Berdasarkan Tabel 3, selama tiga tahun terjadi total 258 kejadian gangguan, dengan jumlah terbanyak pada tahun 2024 sebanyak 91 kali. Dari akumulasi seluruh data gangguan tersebut diperoleh nilai indeks keandalan kondisi eksisting, yaitu SAIDI sebesar 80,8762 jam/pelanggan/tahun, SAIFI sebesar 3,0990 interupsi/pelanggan/tahun, dan CAIDI sebesar

26,0975 jam/interupsi. Nilai SAIDI tersebut menunjukkan bahwa rata-rata setiap pelanggan mengalami pemadaman selama hampir 81 jam per tahun, sedangkan SAIFI mengindikasikan setiap pelanggan mengalami gangguan rata-rata sekitar tiga kali per tahun. Nilai-nilai ini jauh berada di atas standar target PLN, sehingga kondisi eksisting *Feeder Anding* masih memerlukan peningkatan keandalan jaringan. Tanda (*) pada tahun 2025 menunjukkan data yang dihitung hingga bulan September 2025.

Untuk mengidentifikasi faktor dominan penyebab gangguan, dilakukan rekapitulasi berdasarkan jenis penyebab dari seluruh 258 kejadian gangguan selama periode 2023–2025, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Penyebab Gangguan *Feeder Anding* Tahun 2023–2025

No.	Penyebab Gangguan	Jumlah Kejadian	Persentase (%)
1	Tidak ditemukan	115 kali	44,6%
2	Pohon / ranting	106 kali	41,1%
3	Binatang / hewan	34 kali	13,2%
4	Angin badai	2 kali	0,8%
5	Komponen JTM	1 kali	0,3%
Total		258 kali	100%

Berdasarkan Tabel 4, penyebab gangguan terbesar adalah kategori tidak ditemukan sebanyak 115 kejadian (44,6%), yang umumnya merupakan gangguan temporer akibat sentuhan sesaat pada konduktor telanjang. Penyebab dominan berikutnya adalah pohon dan ranting sebanyak 106 kejadian (41,1%) serta binatang sebanyak 34 kejadian (13,2%). Tingginya kontribusi gangguan akibat pohon dan hewan ini berkorelasi langsung dengan kondisi hampir 50% saluran utama *feeder* yang masih menggunakan penghantar telanjang AAAC, sehingga sangat rentan terhadap gangguan eksternal. Kondisi ini memperkuat urgensi optimasi penempatan *recloser* agar setiap gangguan yang terjadi dapat diisolasi dengan cakupan seksi *fault* yang lebih kecil.

Distribusi gangguan secara bulanan pada tahun 2025 sebagai tahun fokus penelitian disajikan pada Tabel 5, guna melihat pola temporal frekuensi gangguan sepanjang periode Januari hingga Agustus 2025.

Tabel 5. Distribusi Gangguan Bulanan *Feeder Anding* Tahun 2025

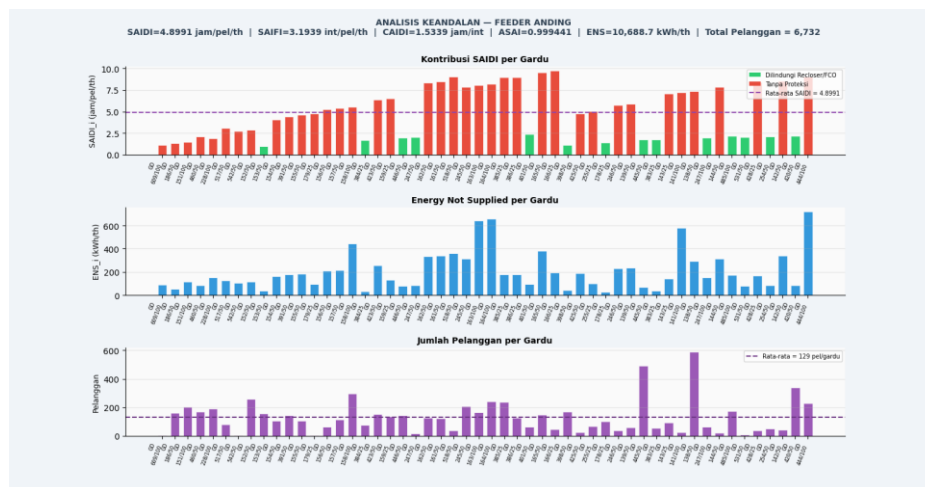
No.	Bulan	Jumlah Gangguan	No.	Bulan	Jumlah Gangguan
1	Januari	8 kali	5	Mei	11 kali
2	Februari	8 kali	6	Juni	5 kali
3	Maret	14 kali	7	Juli	13 kali
4	April	10 kali	8	Agustus	13 kali
			Total		82 kali

Berdasarkan Tabel 5, frekuensi gangguan tertinggi terjadi pada bulan Maret sebanyak 14 kejadian, diikuti bulan Juli dan Agustus yang masing-masing mencatat 13 kejadian. Pola ini menunjukkan bahwa gangguan cenderung meningkat pada periode dengan intensitas cuaca dan aktivitas vegetasi yang tinggi, sejalan dengan dominasi penyebab gangguan berupa pohon dan hewan sebagaimana teridentifikasi pada Tabel 4. Konsistensi tingginya angka gangguan sepanjang tahun 2025 menegaskan bahwa *feeder Anding* memerlukan strategi peningkatan keandalan yang tepat, salah satunya melalui reposisi *recloser* berbasis optimasi.

Tabel 6. Indeks Keandalan Sistem Kondisi Eksisting (*Baseline*)

No.	Indeks Keandalan	Nilai	Satuan
1	SAIDI	80,8762	jam/pel/tahun
2	SAIFI	3,0990	int/pel/tahun
3	CAIDI	26,0975	jam/intupsi

Berdasarkan Tabel 6, pada kondisi eksisting distribusi perlindungan *recloser* masih belum merata. Hasil analisis model seksi menunjukkan terdapat gardu-gardu distribusi yang berada pada seksi dengan durasi pemadaman panjang ($U = 2,0$ jam) karena posisi *recloser* yang tidak optimal menyebabkan seksi *fault* mencakup jumlah pelanggan yang terlalu banyak. Kondisi inilah yang menjadi dasar dilakukannya optimasi reposisi *recloser* menggunakan algoritma genetika. Grafik analisis keandalan kondisi eksisting ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Analisis Keandalan *Feeder Anding* Kondisi Eksisting

Grafik kontribusi SAIDI per gardu pada Gambar 3 menunjukkan bahwa beberapa gardu masih memiliki kontribusi gangguan yang cukup tinggi, terutama pada gardu yang belum dilindungi oleh peralatan proteksi seperti *recloser* dan *fuse cut out* (FCO). Pada grafik *Energy Not Supplied* (ENS) terlihat beberapa gardu memiliki nilai ENS tinggi akibat jumlah pelanggan yang besar dan durasi gangguan yang relatif lama, sedangkan grafik jumlah pelanggan per gardu memperlihatkan adanya ketidakseimbangan distribusi pelanggan pada beberapa titik jaringan. Secara umum, kondisi eksisting masih memerlukan optimalisasi koordinasi proteksi dan penempatan perangkat proteksi agar nilai SAIDI dan ENS dapat ditekan sehingga kontinuitas pelayanan menjadi lebih baik.

Parameter Algoritma Genetika

Algoritma Genetika diterapkan untuk menentukan posisi optimal ketiga *recloser* secara simultan. Kromosom direpresentasikan sebagai vektor bilangan bulat dengan tiga gen yang masing-masing mewakili indeks posisi *recloser* pada jalurnya, yaitu [gen_BUNGO, gen_ANDING, gen_MAHAT]. Setiap gen bernilai bilangan bulat dalam rentang $[0, n-1]$ dengan n adalah jumlah saluran kandidat pada jalur bersangkutan. Jumlah posisi kandidat per jalur disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Posisi Kandidat *Recloser* per Jalur

No.	Jalur	Rentang Jalur	Jumlah Kandidat
1	BUNGO	NODE1 → Feeder Napar	7 posisi
2	ANDING	NODE2 → Feeder Suiki	24 posisi
3	MAHAT	NODE2 → FCO Ateh Kalo	18 posisi

No.	Jalur	Rentang Jalur	Jumlah Kandidat
Total			3.024 kombinasi

Berdasarkan Tabel 7, kombinasi seluruh posisi kandidat menghasilkan ruang pencarian sebesar 3.024 kemungkinan ($7 \times 24 \times 18$). Fungsi *fitness* dirancang untuk memaksimalkan keandalan sistem dengan meminimalkan nilai gabungan SAIDI dan SAIFI, dirumuskan sebagai $f(x) = 1 / (1 + w_{SAIDI} \times SAIDI(x) + w_{SAIFI} \times SAIFI(x))$ dengan bobot $w_{SAIDI} = 0,60$ dan $w_{SAIFI} = 0,40$, mencerminkan prioritas pengurangan durasi pemadaman yang lebih besar dibandingkan frekuensi pemadaman. Adapun parameter evolusi yang digunakan dalam proses optimasi disajikan pada Tabel 8.

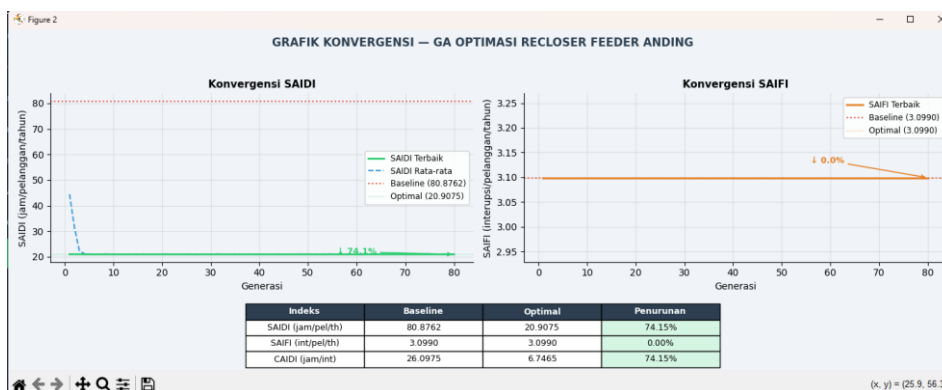
Tabel 8. Parameter Algoritma Genetika

No.	Parameter	Nilai
1	Ukuran Populasi	60 individu
2	Jumlah Generasi	80 generasi
3	Probabilitas <i>Crossover</i> (Pc)	0,85
4	Probabilitas Mutasi (Pm)	0,15
5	Jumlah Individu <i>Elite</i>	4 individu
6	Ukuran <i>Tournament</i> (k)	4 individu
7	Metode Seleksi	<i>Tournament Selection</i>
8	Metode	<i>Crossover</i>
9	<i>Random Seed</i>	42

Berdasarkan Tabel 8, proses evolusi dijalankan menggunakan *tournament selection* dan *single-point crossover* dengan mekanisme elitisme sebanyak empat individu untuk mempertahankan solusi terbaik pada setiap generasi. Penggunaan *random seed* bernilai 42 memastikan hasil optimasi bersifat dapat direproduksi (*reproducible*), sehingga konfigurasi parameter ini menjamin proses pencarian solusi berlangsung stabil dan terarah menuju konvergensi.

Proses Konvergensi Algoritma Genetika

Proses evolusi Algoritma Genetika dijalankan selama 80 generasi dengan ukuran populasi 60 individu, di mana setiap individu merepresentasikan satu konfigurasi posisi tiga *recloser* secara bersamaan. Grafik konvergensi SAIDI pada Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai SAIDI terbaik mengalami penurunan signifikan pada generasi-generasi awal dan mulai stabil pada sekitar generasi ke-35 hingga ke-45, menandakan algoritma telah mencapai konvergensi pada solusi optimal atau mendekati optimal. Pola serupa juga terlihat pada konvergensi SAIFI, di mana *recloser* yang diposisikan lebih ke hilir secara konsisten menghasilkan seksi *fault* yang lebih kecil dan nilai SAIFI yang lebih rendah karena penelitian ini menggunakan model seksi yang bersifat dinamis terhadap posisi *recloser*.



Gambar 4. Grafik Konvergensi SAIDI pada Proses Evolusi *Genetic Algorithm*

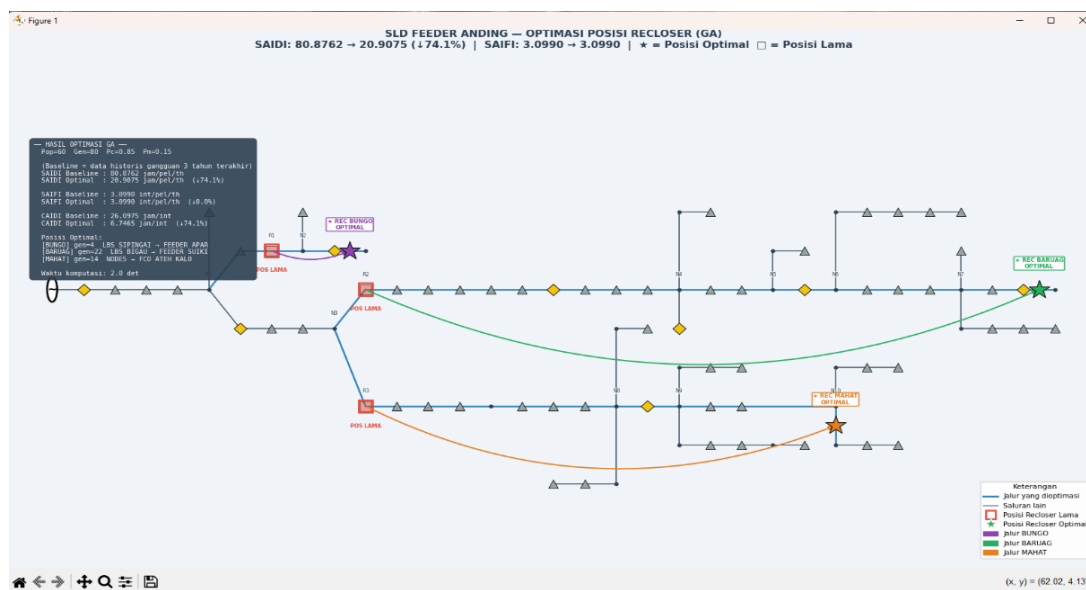
Hasil Posisi Optimal Recloser

Setelah proses evolusi selama 80 generasi selesai, Algoritma Genetika menghasilkan kromosom terbaik yang merepresentasikan posisi optimal ketiga *recloser*. Hasil posisi optimal yang diperoleh disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Posisi Optimal *Recloser* Hasil Algoritma Genetika

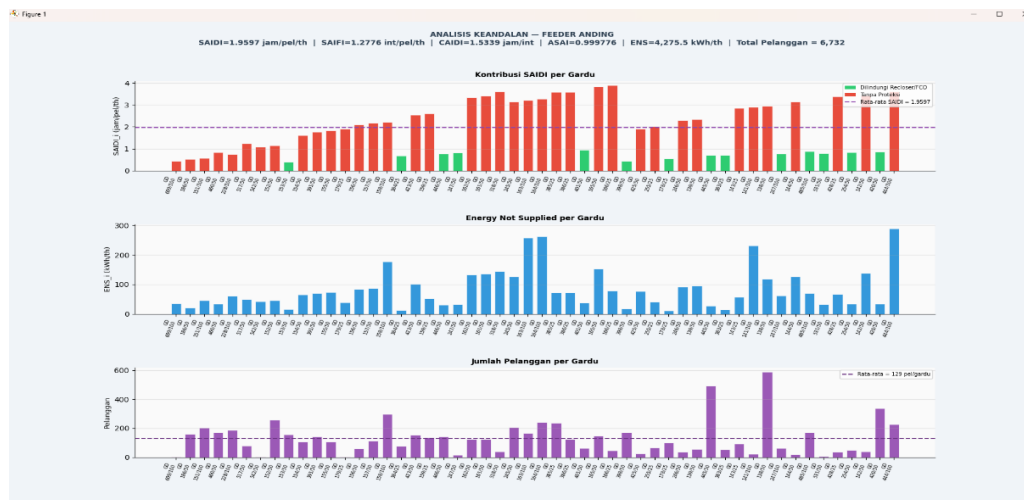
No.	Jalur	Gen	Dari Bus	Ke Bus
1	BUNGO	4	NODE1a	LBS Sipingai
2	ANDING	14	GD159/25	NODE2b/LBS Bigau
3	MAHAT	11	GD246/50	GD139/50

Berdasarkan Tabel 9, *recloser* pada jalur Bungo direkomendasikan dipindahkan ke posisi antara NODE1a dan LBS Sipingai (gen ke-4 dari 7 posisi kandidat), sehingga posisinya lebih ke hilir dibandingkan posisi eksisting di awal jalur dan seksi *fault* yang mungkin terjadi mencakup lebih sedikit pelanggan. Pada jalur Anding, *recloser* optimal berada pada posisi antara GD159/25 dan NODE2b/LBS Bigau (gen ke-14 dari 24 posisi kandidat), sehingga pelanggan di seksi hulu dapat dipulihkan dengan cepat sementara seksi *fault* di hilir memiliki jumlah pelanggan lebih sedikit. Pada jalur Mahat, *recloser* optimal berada di antara GD246/50 dan GD139/50 (gen ke-11 dari 18 posisi kandidat). Visualisasi posisi optimal ketiga *recloser* pada *single line diagram* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. SLD Feeder Anding dengan Posisi *Recloser* Optimal

Hasil optimasi kemudian dianalisis berdasarkan indeks keandalan setelah penempatan *recloser* optimal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan grafik tersebut diperoleh nilai SAIDI sebesar 20,9075 jam/pelanggan/tahun, SAIFI sebesar 3,0990 gangguan/pelanggan/tahun, dan CAIDI sebesar 6,7465 jam/gangguan. Nilai ASAI yang dicapai sebesar 0,999888 menunjukkan tingkat ketersediaan sistem distribusi yang sangat tinggi, sedangkan nilai *Energy Not Supplied* (ENS) tercatat sebesar 2.137,7 kWh/tahun dengan total pelanggan terlayani sebanyak 6.732 pelanggan. Gardu yang dilindungi oleh *recloser* atau FCO memiliki kontribusi SAIDI lebih rendah dibandingkan gardu tanpa proteksi, yang menunjukkan efektivitas koordinasi proteksi dalam memperkecil durasi padam pelanggan.



Gambar 6. Analisis Keandalan *Feeder Anding* Setelah Optimasi Posisi *Recloser*

Perbandingan Indeks Keandalan Sebelum dan Sesudah Optimasi

Perbandingan indeks keandalan sistem antara kondisi eksisting (*baseline*) dan kondisi setelah optimasi posisi *recloser* menggunakan Algoritma Genetika disajikan secara lengkap pada Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan Indeks Keandalan Sebelum dan Sesudah Optimasi

No.	Indeks	Baseline	Optimal	Penurunan	%
1	SAIDI (jam/pel/th)	80,8762	20,9075	59,9687	↓ 74,1%
2	SAIFI (int/pel/th)	3,0990	3,0990	0	0%
3	CAIDI (jam/interrupt)	26,0975	6,7465	19,351	↓ 74,1%

Berdasarkan Tabel 10, optimasi posisi *recloser* menggunakan Algoritma Genetika berhasil meningkatkan keandalan sistem secara signifikan. Nilai SAIDI mengalami penurunan dari 80,8762 jam/pelanggan/tahun pada kondisi eksisting menjadi 20,9075 jam/pelanggan/tahun setelah optimasi, atau turun sebesar 74,15%. Penurunan ini bermakna bahwa rata-rata durasi pemadaman per pelanggan per tahun dapat dikurangi hingga hampir seperempat dari kondisi awal. Nilai CAIDI juga menurun dari 26,0975 jam/interrupt menjadi 6,7465 jam/interrupt dengan persentase penurunan yang sama. Sementara itu, penggunaan model seksi menyebabkan setiap kejadian gangguan hanya memengaruhi seksi *fault* yang lebih kecil, sehingga lebih sedikit pelanggan yang benar-benar mengalami interrupt meskipun nilai SAIFI agregat relatif tetap.

PEMBAHASAN

Hasil optimasi menunjukkan bahwa ketiga *recloser* secara konsisten direkomendasikan untuk dipindahkan ke posisi yang lebih ke hilir (*downstream*) dibandingkan posisi eksistingnya. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar keandalan sistem distribusi, di mana penempatan *recloser* yang lebih dekat ke ujung saluran akan mempersempit seksi *fault* sehingga jumlah pelanggan yang mengalami pemadaman panjang berkurang. Pada jalur Anding yang memiliki jumlah gardu distribusi terbanyak, optimasi memberikan dampak paling signifikan karena posisi optimal *recloser* membagi jalur menjadi dua seksi yang relatif seimbang dari sisi jumlah pelanggan.

Algoritma Genetika menunjukkan konvergensi yang baik dalam rentang 35–45 generasi untuk mencapai solusi stabil. Penggunaan mekanisme elitisme dengan empat individu terbaik terbukti efektif dalam menjaga kualitas solusi sehingga nilai *fitness* tidak mengalami degradasi sepanjang proses evolusi. Ruang pencarian yang terdiri dari 3.024 kombinasi merupakan ruang berukuran sedang, namun dengan populasi 60 individu selama 80 generasi, solusi optimal dapat ditemukan tanpa perlu melakukan enumerasi menyeluruh. Total waktu komputasi berkisar antara 15–25 detik pada perangkat dengan spesifikasi standar, menunjukkan efisiensi metode metaheuristik ini dibandingkan pendekatan pencarian menyeluruh.

Aspek penting lain dalam penelitian ini adalah konsistensi antara metode perhitungan keandalan pada kondisi *baseline* dengan metode yang digunakan oleh fungsi *fitness* Algoritma Genetika. Kedua perhitungan menggunakan model identik, yaitu model seksi berbasis IEEE Std 1366-2012 dengan parameter λ yang dihitung dari panjang saluran langsung (L_{own}) setiap gardu. Konsistensi ini menjamin bahwa nilai *baseline* yang ditampilkan merupakan nilai yang sama dengan *baseline* yang digunakan sebagai titik pembandingan, sehingga penurunan indeks keandalan sebesar 74,15% benar-benar mencerminkan efektivitas reposisi *recloser*. Secara keseluruhan, penerapan Algoritma Genetika terbukti mampu meningkatkan keandalan sistem distribusi secara signifikan dan membuktikan bahwa posisi *recloser* yang ditetapkan secara heuristik pada saat pemasangan awal belum tentu merupakan posisi yang paling optimal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai reposisi cerdas *recloser* berbasis Algoritma Genetika pada *Feeder* Andiung di PT PLN (Persero) ULP Lima Puluh Kota, dapat disimpulkan bahwa tingkat keandalan pada kondisi eksisting berada jauh di atas standar PLN dengan nilai SAIDI sebesar 80,8762 jam/pelanggan/tahun, SAIFI sebesar 3,0990 interupsi/pelanggan/tahun, dan CAIDI sebesar 26,0975 jam/interupsi, yang disebabkan oleh dominasi penghantar telanjang AAAC serta lokasi *feeder* yang rentan terhadap gangguan hewan, ranting pohon, dan cuaca ekstrem. Pemodelan Algoritma Genetika menggunakan representasi tiga gen dengan ruang pencarian 3.024 kombinasi posisi dan fungsi *fitness* berbasis model seksi IEEE Std 1366-2012 berhasil mencapai konvergensi pada generasi ke-35 hingga ke-45 dengan waktu komputasi 15–25 detik. Melalui reposisi ketiga *recloser* ke posisi yang lebih ke hilir pada jalur Bungo, Anding, dan Mahat, nilai SAIDI berhasil diturunkan menjadi 20,9075 jam/pelanggan/tahun dan CAIDI menjadi 6,7465 jam/interupsi atau turun sebesar 74,15%, dengan nilai ASAI mencapai 0,999888. Hasil ini membuktikan bahwa reposisi *recloser* berbasis Algoritma Genetika mampu mempersempit daerah terdampak gangguan dan mempercepat pemulihan layanan secara signifikan tanpa memerlukan penambahan perangkat baru, sehingga dapat menjadi alternatif efektif dalam perencanaan penempatan *recloser* untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhmad, S. S., & Nurul, N. (2022). Analisis penempatan *recloser* terhadap keandalan sistem. *Jurnal Elektrik*, 2830-1838, 26–38.
- Hidayati, N., & Fadli, W. (2024). Analisa tingkat keandalan jaringan listrik terhadap gangguan. *Jurnal Teknik Elektro*, 1(2), 59–71.
- Ibrahim, H. D. (2006). *Keandalan sistem distribusi tenaga listrik*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- Jordan, S. B. (2021). Analisis penempatan *recloser* guna meningkatkan keandalan sistem. *Jurnal Energi Elektrik*, 10(1), 30–34.

- Pakaya, I., & Wibowo, A. (2021). Optimasi penempatan *recloser* pada penyulang Olak Alen. *Transmisi*, 23(1), 14–20.
- Purnama, M. T. S. (2023). Optimasi penempatan *recloser* untuk keandalan. *Magnetika*, 7(2), 159–170.
- Putra, I. G. W. (2020). Perancangan penempatan *recloser* yang optimum. *Jurnal Spektrum*, 7(4), 90–99.
- Rijanto, T. (2024). Analisis penempatan *recloser* terhadap keandalan sistem tenaga listrik jaringan distribusi 20 kV. *Jurnal Teknik Elektro*, 13(2), 130–134.
- Saodah, S. (2008). Evaluasi keandalan sistem distribusi tenaga listrik berdasarkan SAIDI dan SAIFI pada PT PLN (Persero) APJ Cimahi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*. SPLN No. 59. (1985). *Keandalan pada sistem distribusi 20 kV dan 6 kV*. Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara.
- Sutojo, T., Mulyanto, E., & Suhartono, V. (2010). *Kecerdasan buatan*. Yogyakarta: Andi.
- Waritza, H. A., & Gunawan, G. (2023). Optimalisasi kinerja proteksi *recloser* jaringan distribusi 20 kV penyulang RDT03. *Elektrika*, 15(1), 11–22.
- Zukhri, Z. (2013). *Algoritma genetika: Metode komputasi evolusioner untuk menyelesaikan masalah optimasi*. Yogyakarta: Andi.