

Optimalisasi Kinerja Proteksi *Recloser* Jaringan Distribusi 20kV Penyulang RDT03 Menggunakan Algoritma *Particle Swarm Optimization*

Heryogka A. Waritza¹, Gunawan², dan Agus Adhi Nugroho³

^{1,2,3}Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung

Jl. Kaligawe Raya Street Km.4. Semarang. Central Java. 50112

e-mail: ahmadheryogka@yahoo.com¹, gunawan@unissula.ac.id², agusadhi@unissula.ac.id³

ABSTRACT

The reliability of an electric power distribution network system is very important to ensure a good quality of service for consumers. The focus of this study is to find the optimal protection coordination design, topology and operating scheme for RDT03 refiners in the Tambak Aji Industrial Estate. To show the level of reliability and continuity of the electric power distribution network, the SAIFI index (System Average Interruption Frequency Index) and the SAIDI index (System Average Interruption Duration Index) are used. The existing recloser located in section 25 resulted in a SAIFI value of 0.8933 and a SAIDI of 2.407. Using the PSO (Particle Swarm Optimization) optimization method, the results were obtained that the Best Fitness for the most optimal recloser placement was in section 29 with a SAIFI value of 0.32575 and a SAIDI value of 1.0558. This change in recloser placement resulted in a decrease in SAIFI by 36% or by 0.5675 times / year / customer and a decrease in the value of SAIDI by 43.61% or by 1.3649 hours / year / customer. Thus, there is an increase in network reliability if the recloser at the RDT03 feeder is relocated to the location of section 29.

Keywords: Reliability, Recloser, SAIFI, SAIDI, Particle Swarm Optimization

ABSTRAK

Keandalan suatu sistem jaringan distribusi tenaga listrik merupakan hal yang sangat penting untuk menjamin mutu pelayanan yang baik bagi konsumen. Fokus dari penelitian ini adalah untuk mencari desain koordinasi proteksi, topologi dan skema operasi yang optimal untuk penyulang RDT03 di Kawasan Industri Tambak Aji. Untuk menunjukkan tingkat keandalan dan kontinuitas jaringan distribusi tenaga listrik digunakan indeks SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) dan indeks SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*). Hasil optimalisasi menggunakan PSO (*Particle Swarm Optimization*), didapatkan hasil bahwa *Best Fitness* untuk penempatan *recloser* yang paling optimal adalah pada *section* 29 dengan nilai SAIFI sebesar 0.32575 dan nilai SAIDI sebesar 1.0558. Dengan menggunakan PSO, diperoleh lokasi letak *recloser* yang baru dengan nilai SAIFI yang lebih optimal dengan penurunan sebesar 36% atau sebesar 0,5675 kali/tahun/pelanggan dan penurunan nilai SAIDI sebesar 43,61% atau sebesar 1,3649 jam/tahun/pelanggan. Jika dibandingkan dengan letak *recloser existing*, *recloser existing* terletak pada *section* 25 dengan nilai SAIFI sebesar 0,8933 dan SAIDI sebesar 2,407. Dengan demikian terdapat peningkatan keandalan jaringan jika *recloser* pada penyulang RDT03 direlokasi menuju lokasi *section* 29.

Kata kunci: Keandalan, *Recloser*, SAIFI, SAIDI, *Particle Swarm Optimization*

I. PENDAHULUAN

Tingkat keandalan dari suatu sistem pasokan tenaga listrik merupakan hal yang sangat krusial karena berkaitan dengan kontinuitas penyaluran tenaga listrik ke pelanggan (konsumen). Yang dimaksud dengan keandalan dari suatu sistem pasokan tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem untuk memberikan pasokan tenaga listrik yang cukup dengan kualitas yang baik. Adapun faktor yang sangat mempengaruhi kualitas energi listrik yang digunakan adalah kestabilan tegangan, frekuensi, kontinuitas pelayanan dan faktor daya [1]. Dari beberapa faktor diatas, kontinuitas pelayanan energi listrik merupakan masalah utama yang paling banyak dikeluhkan oleh pelanggan akibat terlalu seringnya terjadi pemadaman listrik dalam waktu yang lama, sehingga berdampak pada baik pelanggan listrik besar maupun kecil. Oleh karenanya, keandalan saluran jaringan distribusi harus dijaga dengan cara menghindari atau meminimalisasi gangguan-gangguan yang menyebabkan pemadaman listrik. Dengan semakin bertambahnya kebutuhan

tenaga listrik, maka keandalan dalam penyediaan dan penyaluran daya pada suatu jaringan distribusi tenaga listrik sangat diperlukan.

Untuk menunjukkan tingkat keandalan dan kontinuitas jaringan distribusi tenaga listrik dapat digunakan indeks SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) dan indeks SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*). SAIFI merupakan parameter yang menunjukkan seberapa sering gangguan yang terjadi di tiap pelanggan dalam waktu setahun, sedangkan SAIDI menunjukkan rata-rata waktu gangguan tiap pelanggan [2]. Sebagai salah satu Badan Usaha Milik Negara, PT. PLN (Persero) yang memiliki visi untuk menjadi perusahaan listrik terkemuka di Asia Tenggara, maka pemenuhan Standar World Class Service (WCS) menjadi hal yang sangat penting. Standar WCS menuntut agar indeks SAIFI maksimal adalah 3 kali/pelanggan/tahun dan SAIDI sebesar 2,5 jam/pelanggan/tahun.

Salah satu kawasan industri produktif di wilayah PLN (Persero) ULP Semarang Barat adalah Kawasan Industri Tambak Aji (KTA) yang disuplai dengan

penyulang RDT03. Jika dilihat dari profil pembebanannya, penyulang RDT03 merupakan salah satu penyulang yang memiliki beban rata-rata cukup tinggi diatas 270A. Hal ini mengindikasikan bahwa Kawasan Industri Tambak Aji merupakan Kawasan yang sangat produktif. Namun hal ini tidak dibarengi dengan kinerja SAIDI SAIFI yang baik. Gangguan Penyulang/PMT masih sangat tinggi jika dibandingkan dengan penyulang lain. Sedangkan secara topologi, Penyulang RDT03 memiliki panjang hantaran yang cukup pendek dan berada dekat dengan Gardu Induk Randugarut.

Salah satu cara untuk meningkatkan keandalan sistem adalah dengan penempatan, penambahan, atau relokasi dari peralatan fuse-recloser atau sectionalizer yang optimal [3]. Pada tahun 2017, di Kawasan Industri Tambak Aji telah dipasang sebuah recloser pada penyulang RDT03 untuk membagi zona penyulang menjadi 3 yaitu zona 1 (PMT), zona 2 (recloser) dan zona 3 (LBS Non-Sectionalizer) untuk memperbaiki indeks SAIFI, SAIDI dan penekanan ENS (Energy Not Served) saat terjadi gangguan pada zona setelah recloser. Namun demikian, penempatan recloser ini tidak didasari pada nilai optimum SAIDI SAIFI, melainkan didasarkan pada optimalisasi proteksi terhadap zona 1 (PMT) dimana recloser ditempatkan sedemikian sehingga zona 1 (PMT) dapat terlindungi dengan maksimal sehingga memperkecil kemungkinan gangguan pada Kawasan tersebut.

Sejak pemasangannya, recloser belum mampu memberikan perbaikan kinerja yang berarti pada SAIDI SAIFI dan pelayanan di Kawasan Industri Tambak Aji. Hal ini terlihat dari hasil evaluasi terhadap indeks kinerja SAIDI SAIFI penyulang di PLN ULP Semarang Barat tidak terlalu banyak mengalami perubahan yang cukup signifikan. Recloser yang telah terpasang ini melekat pada section 25 jika ditentukan dengan menggunakan *single line diagram* dan menghasilkan nilai SAIFI sebesar 0,8933 dan SAIDI sebesar 2,407.

Perbaikan indeks keandalan jaringan dapat dilakukan dengan mengoptimalkan penempatan lokasi recloser pada jaringan distribusi. Penentuan titik lokasi pemasangan recloser harus didasarkan pada lokasi optimum dimana nilai indeks SAIDI dan SAIFI penyulang menjadi paling kecil. Berbagai metode dan pendekatan dapat dilakukan untuk menyelesaikan masalah optimasi indeks SAIDI SAIFI seperti metode Section Technique, Algoritma Genetika, Simplex Method, Fuzzy Logic, Artificial Bee Colony Algorithms dan Particle Swarm Optimization. Keandalan sistem jaringan distribusi tenaga listrik merupakan unjuk kerja suatu sistem tenaga listrik yang mampu beroperasi secara berkelanjutan baik saat terjadi gangguan maupun saat pola operasi normal dengan mutu pelayanan yang baik. Salah satu cara untuk meningkatkan keandalan listrik pada suatu penyulang adalah dengan meminimalisir gangguanyang dapat menyebabkan pemadaman listrik pada suatu penyulang.

Semakin tinggi kebutuhan energi listrik akan membuat penyedia layanan listrik berusaha meningkatkan sistem keandalan sistem tenaga listrik, pelayanan dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang maksimal. Beberapa penelitian terkait dengan keandalan sistem jaringan tenaga listrik diantaranya dilakukan oleh Senen dkk [4]. Hasil penelitian mereka terkait keandalan sistem distribusi tenaga listrik menggunakan metode SAIDI dan SAIFI didasarkan atas durasi atau lamanya pemadaman dan berapa kali jumlah pemadaman dalam kurun waktu tertentu. Hasil perhitungan indeks keandalan secara keseluruhan menggunakan Aplikasi Matlab R2008a didapatkan nilai SAIDI sebesar 0,00005 jam per pelanggan per tahun dan telah sesuai dengan standar PLN yaitu 21 jam/tahun. Untuk nilai SAIFI yang dihitung berada diangka 0,0081 kali per pelanggan per tahun juga telah sesuai dengan standar PLN yaitu 3,2 kali/tahun. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kegagalan yang sering terjadi diakibatkan oleh kegagalan non-teknis dan juga secara teknis seperti gangguan pohon, gangguan hewan dan juga gangguan system, sehingga sering terjadi terputusnya kabel saluran, baik itu JTR, kabel sekunder/primer maupun kabel SR, dan juga kerusakan Trafo.

Penelitian yang sedikit berbeda dilakukan oleh Fahrulrozi dkk, yang menganalisis tentang peningkatan peralatan keandalan sistem tenaga listrik dalam hal ini *fuse-recloser* dengan melakukan injeksi *hybrid* pembangkit listrik tersebar yaitu *Wind Energy Power* (WEP) dan *Solar Energy Power* (SEP). Metode yang digunakan untuk meningkatkan indeks keandalan jaringan sistem distribusi adalah metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan metode *Section Technique* (ST). Hasil kajiannya menunjukkan bahwa metode PSO telah berhasil menemukan relokasi optimal *fuse-recloser* sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi yang dapat menurunkan nilai indeks keandalan SAIFI dan SAIDI sebesar 0,014 % dibandingkan dengan menggunakan metode *section technique* [5]. Putra dkk melakukan penelitian guna merancang penempatan *recloser* yang tepat menggunakan metode *Quantum Genetic Algorithm* (QGA) yang merupakan algoritma evolusioner berdasarkan konsep quantum bit (*qubit*). Tujuan dari metode ini adalah meminimumkan nilai SAIDI dan SAIFI sehingga didapatkan indeks keandalan yang lebih kecil dan memenuhi standar sehingga diperoleh lokasi *recloser* optimum. Dengan menggunakan metode QGA, hasilnya juga sudah memenuhi standar *World Class Company* dan *World Class Service* dengan SAIFI 3 (kali/Pelanggan/tahun) dan SAIDI 1,66 (jam/Pelanggan/tahun). Dengan pemasangan *recloser* pada suatu jaringan sistem tenaga listrik maka, jika terjadi suatu gangguan akan dapat ditanggulangi dalam waktu yang singkat dan dapat memisahkan daerah atau

jaringan yang sedang mengalami gangguan secara cepat, sehingga dapat memperkecil area terjadinya gangguan [6].

Sementara Amirudin melakukan studi perbandingan jumlah energi yang tidak tersalurkan akibat gangguan sistem pada penyulang yang memiliki auto-recloser dengan penyulang yang tidak memiliki auto-recloser. Hasilnya adalah total daya yang tidak tersalur diakibatkan oleh gangguan pada feeder yang memakai auto recloser yaitu 58 kali gangguan dengan jumlah waktu pemutusan atau pemadaman 0,94 jam. rata-rata beban feeder yang tidak menggunakan auto recloser adalah 63 Ampere, sedangkan jumlah daya yang tidak tersalur karena akibat gangguan pada feeder yang menggunakan tidak menggunakan auto recloser yaitu 146 kali gangguan dengan jumlah waktu pemadaman 2,45 jam. Total durasi atau lama waktu pemadaman diakibatkan oleh gangguan pada feeder tanpa auto recloser jauh lebih banyak dibanding dengan feeder yang dilengkapi dengan auto recloser, sedang jumlah gangguan yang terjadi justru lebih banyak pada feeder yang menggunakan auto recloser [7]. Dengan metode deskriptif analitik, Khairul dkk membandingkan nilai indeks keandalan SAIDI (System Average Interruption Duration Index) dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) dengan SPLN 682:1986. Tingkat keandalan sistem jaringan distribusi 20 kV dihitung dengan menggunakan SAIDI dan SAIFI serta mengkonversikan ENS (*Energy Not Supplied*) atau energi yang tak tersalurkan ke Rupiah untuk mengetahui besar kerugian yang ditimbulkan akibat gangguan dan pemeliharaan [8].

Dari hasil studi literatur menunjukkan bahwa usaha dalam meningkatkan kinerja sistem proteksi jaringan dapat dilakukan dengan banyak pendekatan dan bergantung pada kondisi geografis, topologi jaringan, besar beban dan panjang jaringan distribusi. Beberapa peneliti berfokus pada perbandingan jumlah durasi gangguan dan energi yang terbuang pada penyulang yang memiliki auto-recloser dan yang tidak memiliki auto-recloser, sedangkan peneliti yang lain berfokus pada penempatan lokasi recloser yang optimal pada jaringan tenaga listrik di penyulang. Pada penelitian ini, peneliti akan berfokus pada studi optimalisasi penempatan *recloser* jaringan dan parameter *setting recloser* serta perubahan topologi jaringan distribusi pada penyulang RDT03 untuk mencari desain koordinasi proteksi, topologi dan skema operasi yang optimal untuk penyulang RDT03 di Kawasan Industri Tambak Aji.

II. LANDASAN TEORI

A. Tegangan Operasi Jaringan Distribusi

Berdasarkan besarnya tegangan listrik, jaringan distribusi tenaga listrik dapat dibedakan menjadi 2 (dua) sistem, yaitu: sistem jaringan distribusi primer dan sistem jaringan distribusi sekunder.

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) terletak diantara gardu induk dengan gardu pembagi, yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 6 kV, 11 kV, dan 20kV (sesuai standar PLN). Sedangkan sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR), merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur energi listrik dari gardu pembagi (gardu distribusi) ke pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 V pada sistem lama, dan 220/380 V pada sistem baru untuk perumahan, serta 440/550 V untuk keperluan industri.

B. Sistem Distribusi di Jawa Tengah

Sistem distribusi di Propinsi Jawa Tengah dan Yogyakarta memiliki sistem yang sedikit berbeda dengan sistem yang ada diseluruh Indonesia. Sistem Distribusi di Jawa Tengah menggunakan sistem tegangan 20kV fasa tiga 4 kawat dengan pentanahan netral secara langsung. Pola sistem distribusi ini diidentifikasi sebagai berikut:

- Tegangan Nominal: 20 kV Fasa – Fasa, 11,6 kV Fasa - Tanah
- Sistem Pentanahan: Netral ditanahkan sepanjang jaringan dan kawat netral dipakai bersama untuk saluran tegangan menengah dan saluran tegangan rendah dibawahnya. Impedansi pentanahan yang rendah dibawah 5 Ohm.
- Konstruksi Jaringan: Terdiri dari saluran udara terutama dan saluran kabel sedang saluran udara terdiri dari: saluran utama dan saluran cabang.
- Saluran Utama: kawat berukuran 240 dan 150 mm² fasa tiga – 4 kawat
- Saluran Cabang: kawat berukuran 150 dan 70 mm² fasa tiga – 4 kawat dan kawat AAC 70 dan 35 Fasa satu 2 kawat (Fasa netral) Cat : Penghantar dapat dipilih yang setara
- Penggunaan transformator distribusi 1 fasa 2 kutub dengan sistem Fasa – Netral.
- Penggunaan setting proteksi jaringan yang lebih sensitive dengan relay OCR dan GFR active.
- Adanya ketidakseimbangan beban pada penyulang dan PMT
- Sistem pelayanan: radial dengan kemungkinan saluran utama antara jaringan yang berdekatan dapat saling berhubungan dalam keadaan darurat
- Pelayanan Beban: Fasa tiga: 4 kawat 20 kV, Fasa tunggal : 2 kawat 11,6 kV

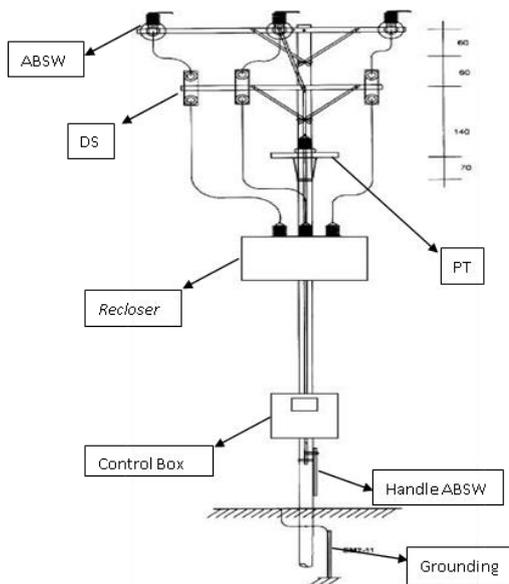
C. Sistem Proteksi Distribusi Tenaga Listrik

Pada umumnya sistem proteksi mempunyai pengertian suatu sistem yang dapat mengamankan peralatan terhadap gangguan, lalu melokalisir bagian-bagian yang terganggu sekecil mungkin, dan membatasi dampak

maupun pengaruhnya terhadap sistem. Dengan mengisolir bagian yang terganggu dengan yang tidak terganggu maka stabilitas sistem penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan. Jaringan distribusi yang baik adalah jaringan yang memiliki peralatan yang cukup lengkap, salah satu yang paling penting adalah peralatan proteksi. Untuk Jaringan distribusi sistem saluran udara, peralatan proteksi dipasangkan diatas tiang-tiang listrik. Peralatan-peralatan proteksi tersebut antara lain: penutup balik otomatis (PBO) atau Recloser, Sectionalizer, LBS, Fusesaver, NT Fuse dll.

D. Recloser

Recloser adalah suatu komponen kelistrikan yang ada pada jaringan tegangan menengah yang secara fisik memiliki fungsi sebagai pemutus beban. Recloser hanya bekerja ketika suatu jaringan terjadi gangguan, kinerja recloser hampir sama dengan circuit breaker, hanya saja pada recloser dapat diseting untuk bekerja membuka dan menutup kembali beberapa kali secara otomatis.



Gambar 1. Recloser

1. Fungsi Recloser

PBO dipasang pada SUTM yang sering mengalami gangguan hubung singkat fasa ke tanah yang bersifat temporer, berfungsi untuk:

- Menormalkan kembali SUTM atau memperkecil pemadaman tetap akibat gangguan temporer.
- Pengaman seksi dalam SUTM agar dapat membatasi / melokalisir daerah yang terganggu.

2. Cara Kerja Recloser

Secara umum, Recloser mempunyai cara kerja sebagai berikut:

- Operasi cepat (*fast tripping*): untuk antisipasi gangguan temporer.
- Operasi lambat (*delayed tripping*): untuk koordinasi dengan pengamanan di hilir.

- Bila gangguan telah hilang pada operasi cepat maka PBO akan reset kembali ke status awal. Bila muncul gangguan setelah waktu reset, PBO mulai menghitung dari awal.
- Repetitive*: reset otomatis setelah recloser success.
- Non repetitive*: memerlukan reset manual (bila terjadi gangguan permanen dan bila gangguan sudah dibebaskan).

E. Indeks Keandalan Jaringan Distribusi

Indeks keandalan adalah suatu parameter keandalan dinyatakan dalam suatu besaran probabilitas, yang terdiri dari indeks titik beban dan indeks sistem. Perusahaan Listrik Negara sering menggunakan dua indeks, yakni SAIFI dan SAIDI dalam mengukur kinerja keandalan sistem tenaga listrik. Indeks keandalan yang dievaluasi biasanya menggunakan konsep klasik untuk menghitung nilai dari laju kegagalan rata-rata (λ), waktu pemadaman rata-rata (r), dan ketidaktersediaan tahunan rata-rata (U).

a. Laju Kegagalan (λ) dan Ketidaktersediaan (U)

Laju kegagalan (λ) merupakan nilai atau jumlah dari gangguan dalam suatu interval waktu tertentu. Di dalam menghitung laju kegagalan dari sebuah grup unit, biasanya menggunakan waktu total operasi dari unit daripada waktu kronologinya. Satuan laju kegagalan adalah kegagalan/ tahun. Persamaan laju kegagalan adalah sebagai berikut [8]:

$$\lambda = \frac{d}{T} \quad (1)$$

Keterangan:

d = banyaknya kegagalan yang terjadi selama selang waktu tahun;

T = jumlah selang waktu pengamatan (tahun). Nilai laju kegagalan akan berubah sesuai dengan umur dari sistem atau peralatan listrik selama beroperasi.

Ketidaktersediaan (U) merupakan durasi atau waktu lamanya gangguan dimana sistem tidak dapat menyuplai daya ke pelanggan. Satuan dari ketidaktersediaan (*Unavailability*) adalah jam/tahun. Persamaan dari ketidaktersediaan adalah sebagai berikut [8]:

$$U = \frac{\lambda}{r} \quad (2)$$

Untuk menghitung besarnya nilai keandalan biasanya digunakan indeks perkiraan angka keluar (outage) dan waktu perbaikan (repair time) dari masing-masing komponen sesuai dengan SPLN 59:1985. Perkiraan angka keluar (outage) dan waktu perbaikan (repair time) komponen sistem distribusi (trafo distribusi, pemutus tenaga, saklar pemisah) dinyatakan dalam tabel 1 untuk data kegagalan saluran udara tegangan menengah.

Tabel 1. Laju Kegagalan (λ), dan Waktu Keluar Komponen (r)

No	Komponen	λ (Kegagalan/Tahun)	R (Jam/Tahun)
1	SUTM	0,2	3
2	Transformator	0,005	10
3	FCO (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

Probabilitas dimana semua komponen akan berperan secara serempak atau bersamaan agar sistem tersebut dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Persamaan yang dipakai untuk menghitung laju kegagalan sistem seri adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_{sys} &= \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \\ U_{sys} &= \lambda_1 \cdot r_1 + \lambda_2 \cdot r_2 + \lambda_3 \cdot r_3 \\ r_{sys} &= \frac{U_{sys}}{\lambda_{sys}} = \lambda_1 \cdot r_1 + \lambda_2 \cdot r_2 + \lambda_3 \cdot r_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Keterangan:

λ = laju kegagalan (*failure rate*)

U = ketidaktersediaan (*unavailability*)

r = waktu perbaikan.

Keandalan sistem paralel, suatu sistem yang disusun secara paralel akan mengalami pemadaman (mati) apabila semua komponen di dalam sistem mengalami kerusakan sebaliknya, jika hanya satu komponen saja yang rusak maka tidak akan menyebabkan sistem mati (padam). Persamaan yang dipakai untuk menghitung laju kegagalan sistem paralel adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_{sys} &= \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 (r_1 + r_2 + r_3) \\ U_{sys} &= \lambda_{sys} \cdot r_{sys} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \\ r_{sys} &= \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 + r_2 + r_3} \end{aligned} \quad (4)$$

b. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)

Untuk menentukan keandalan suatu sistem distribusi, ditunjukkan dengan indeks keandalan. Indeks SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan besarnya kegagalan atau pemadaman yang mengakibatkan pelanggan tidak mendapatkan suplai layanan listrik. Nilai indeks SAIFI dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (5)$$

c. SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

System Average Interruption Duration Index (SAIDI) dapat didefinisikan sebagai nilai rata-rata dari lamanya kegagalan untuk setiap konsumen selama satu tahun. Perhitungan dengan metode Section Technique dimulai

dengan menghitung SAIDI per load point menggunakan persamaan berikut:

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (6)$$

Keterangan:

$\sum \lambda_i \cdot N_i$ adalah jumlah perkalian antara failure rate dengan jumlah pelanggan komponen i

$\sum U_i \cdot N_i$ adalah jumlah perkalian antara durasi kegagalan dengan jumlah pelanggan komponen i.

N_i adalah jumlah beban pada titik beban i (pelanggan)

λ_i adalah laju kegagalan

U_i adalah ketidaktersediaan

d. Pemodelan Jaringan Radial

Setiap komponen yang ada pada sistem memiliki laju kegagalan dan keandalan. Keandalan dari sistem seri adalah probabilitas dimana semua komponen akan berperan secara serempak atau bersamaan agar sistem tersebut dapat beroperasi dengan baik. Parameter λ dan U digunakan untuk menghitung nilai keandalan pada setiap peralatan yang terdapat pada jaringan distribusi.

1. *Failure Rate load point* (λ_{LP}) merupakan nilai penjumlahan λ tiap peralatan tenaga listrik yang ada pada jaringan distribusi seperti trafo distribusi, circuit breaker, maupun sectionalizer yang mempengaruhi titik beban yang sedang dihitung, sehingga didapatkan persamaannya sebagai berikut:

$$\lambda_{sys} = \sum_i \lambda_i \quad (7)$$

2. *Unavailability load point* (ULP) merupakan nilai perkalian antara λ dengan r masing-masing peralatan yang mempengaruhi titik beban yang dihitung, sehingga didapatkan persamaannya sebagai berikut:

$$U_{sys} = \sum_i \lambda_i r_i \quad (8)$$

Dimana:

$\lambda_i = \lambda$ untuk peralatan i

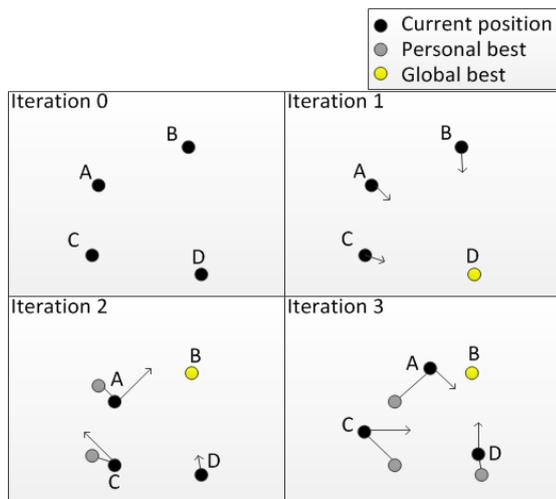
$r_i = r$ untuk peralatan i

F. Optimasi

Nilai optimal adalah nilai yang didapat melalui suatu proses dan dianggap menjadi solusi jawaban yang paling baik dari semua solusi yang ada. Untuk dapat mencapai nilai optimal baik minimal atau maksimal tersebut, secara sistematis dilakukan pemilihan nilai variabel integer atau riil yang akan memberikan solusi optimal. Terdapat banyak jenis algoritma metaheuristic stochastic yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi mencari nilai minimum dan maksimum dari suatu dataset dan permasalahan diantaranya menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

a. Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO adalah suatu algoritma metaheuristik stochastic optimization yang dikemukakan oleh Russell C. Eberhart dan James Kennedy di tahun 1995 yang terinspirasi oleh perilaku sosial dari pergerakan perilaku sebuah kawanan serangga, seperti semut, rayap, lebah atau burung (Zahro dan Wahyuni, 2020:7). Algoritma PSO dibuat meniru perilaku sosial organisme ini. Model ini disimulasikan dalam ruang dengan dimensi tertentu dengan sejumlah iterasi sehingga di setiap iterasi, posisi partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju (minimasi atau maksimasi fungsi). Ini dilakukan hingga maksimum iterasi dicapai atau bisa juga digunakan kriteria penghentian yang lain. Skema dari PSO dapat digambarkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. Skema PSO

Dasar dari algoritma PSO terdiri dari segerombolan partikel 'n' dan posisi setiap partikel merepresentasikan solusi yang mungkin dari fungsi fitness dalam ruang pencarian D-dimensi. Partikel ini mengubah kondisinya di bawah pengaruh tiga faktor yaitu Inersia, Personal Best dan Global Best. Sedangkan kecepatan update di PSO terdiri dari tiga bagian meliputi momentum, yaitu kecenderungan partikel untuk bergerak ke arah yang sama dengannya bergerak pada iterasi sebelumnya. Ini menggabungkan efek dari kecepatan sebelumnya pada kecepatan arus partikel. Yang kedua adalah Bagian kognitif yang mewakili tarikan kecepatan partikel menuju yang terbaik pribadinya (P terbaik) dan disebut sebagai ingatan, pengetahuan diri atau ingatan. Yang ketiga adalah bagian sosial, yang mewakili tarikan kecepatan partikel menuju swarm best (Gbest) dan disebut sebagai kerjasama, pengetahuan sosial atau berbagi informasi.

b. Implementasi Particle Swarm Optimization (PSO)

Tujuan dari penggunaan algoritma *particle swarm optimization* pada penelitian ini adalah untuk menentukan lokasi penempatan recloser jaringan yang paling optimal terhadap nilai SAIDI dan SAIFI. Hal ini dapat dilakukan dengan mencari nilai fitness terbaik serta

mencari nilai SAIFI dan SAIDI yang paling rendah. Implementasi PSO ini menggunakan bantuan software MATLAB. Berikut merupakan proses langkah kerja dari particle swarm optimization:

1. Menentukan ukuran *swarm* (populasi), nilai awal, dan kecepatan partikel secara random.
2. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan pada setiap partikel
3. Menentukan nilai Pbest (posisi terbaik dari partikel) dan Gbest (posisi terbaik global dari keseluruhan kumpulan partikel)
4. Menghitung kecepatan baru pada iterasi selanjutnya dengan menggunakan persamaan:

$$V_{ik+1} = \theta k V_{ik} + c1r1(pbest_{ik} - X_{ik}) + c2r2(gbest_{ik} - X_{ik}) \quad (9)$$

Keterangan:

V_{ik} adalah kecepatan partikel i pada iterasi ke k
 θk adalah bobot inersia (inertia weight)

$r1, r2$ adalah bilangan random berdistribusi uniform antara 0-1

$c1, c2$ adalah bilangan konstan positif

X_{ik} adalah posisi partikel i pada iterasi k .

5. Menentukan posisi partikel baru pada iterasi selanjutnya dengan persamaan:

$$x_{id k + 1} = x_{idk} + v_{idk} + 1 \quad (10)$$

6. Mengupdate nilai Pbest dan Gbest
7. Melakukan pengecekan apakah solusi sudah optimal atau belum. Jika sudah mendapatkan hasil yang optimal, maka proses algoritma akan berhenti, tetapi jika hasil yang didapat belum optimal maka proses akan diulangi kembali ke langkah nomor 4.

III. HASIL PENELITIAN

A. Perhitungan Indeks Keandalan Penyulang RDT03

Jika melihat *Single Line Diagram* (SLD) topologi penyulang RDT03, terdapat sebanyak 16 Load Point (LP) pada jalur utama atau node utama:

Tabel 2. Load Point Penyulang RDT03

LP	No Tiang	Daya Trafo	FASA	Merk Trafo	Alamat
1	RDT03-017	200	3	Sintra	Tambak Aji Raya
2	RDT03-027	160	3	Trafindo	Tambak Aji Raya
3	RDT03-031	160	3	BambangD	Tambak Aji V
4	RDT03-032	50	3	Trafindo	Tambak Aji V
5	RDT03-041	50	3	Trafindo	Tambak Aji VI
6	RDT03-053	100	3	BambangD	Tambak Aji VI
7	RDT03-054	100	3	Sintra	Tambak Aji VI
8	RDT03-058	100	3	BambangDjaja	Tambak Aji II
9	RDT03-060	100	3	Sintra	Tambak Aji II
10	RDT03-061	160	3	Unindo	Tambak Aji II
11	RDT03-069	100	3	BambangDjaja	Tambak Aji I
12	RDT03-076	50	3	Sintra	Tambak Aji I
13	RDT03-079	160	3	Sintra	Tambak Aji I
14	RDT03-084	100	3	Trafindo	Tambak Aji II
15	RDT03-085	160	3	Trafindo	Tambak Aji II
16	RDT03-089	160	3	Sneider	Tambak Aji II

Selanjutnya, dengan menggunakan tabel laju kegagalan dan waktu perbaikan dalam SPLN No. 59

Tahun 1985, laju kegagalan (λ) dan ketidaksediaan komponen (U) untuk load point (LP) pada node utama ini dapat dihitung. Berikut hasil perhitungan nilai laju kegagalan (λ) dan ketidaksediaan komponen (U):

Tabel 3. Laju Kegagalan (λ) dan Ketidaksediaan Komponen (U)

No	LP	PMT		SUTM		Trafo		LBS		No. Tiang	#Pelanggan	Total		
		λ	r	λ	r	λ	r	λ	r			λ	U($\lambda \times r$)	
1	1	0	10	0,2	3	0,85	0	0	0	10	RDT03-002	0	0,18	0,58
2	2	0	0	0,2	3	0,5	0,01	10	0	0	RDT03-017	1	0,28	0,86
3	3	0	0	0,2	3	0,4	0,01	10	0	0	RDT03-027	1	0,37	1,15
4	4	0	0	0,2	3	0,05	0,01	10	0	0	RDT03-031	1	0,38	1,23
5	5	0	0	0,2	3	0,45	0,01	10	0	0	RDT03-032	2	0,48	1,55
6	6	0	0	0,2	3	0,6	0,01	10	0	0	RDT03-041	1	0,6	1,96
7	7	0	0	0,2	3	0,05	0,01	10	0	0	RDT03-053	1	0,62	2,04
8	8	0	0	0,2	3	0,2	0,01	10	0	0	RDT03-054	2	0,66	2,21
9	9	0	0	0,2	3	0,1	0,01	10	0	0	RDT03-058	1	0,69	2,32
10	10	0	0	0,2	3	0,05	0,01	10	0	0	RDT03-060	1	0,7	2,4
11	11	0	0	0,2	3	0,4	0,01	10	0	10	RDT03-061	1	0,79	2,75
12	12	0	0	0,2	3	0,35	0,01	10	0	10	RDT03-069	2	0,87	3,04
13	13	0	0	0,2	3	0,15	0,01	10	0	0	RDT03-076	14	0,9	3,09
14	14	0	0	0,2	3	0,25	0,01	10	0	0	RDT03-079	1	0,96	3,29
15	15	0	0	0,2	3	0,05	0,01	10	0	0	RDT03-084	1	0,97	3,37
16	16	0	0	0,2	3	0,2	0,01	10	0	0	RDT03-085	2	1,02	3,54
17	17	0	0	0,2	3	0,1	0,01	10	0	10	RDT03-089	1	1,05	3,77

a. Laju Kegagalan dan Unavailability Lateral Feeder RDT03

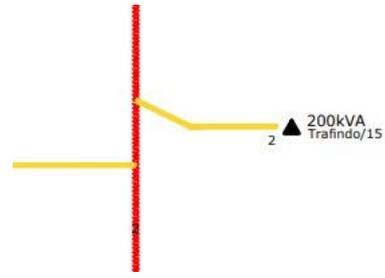
Setelah menghitung laju kegagalan dan waktu perbaikan node pada feeder utama, selanjutnya menghitung laju kegagalan dan waktu perbaikan dari node pada section lateral atau cabang. Pada umumnya node cabang terdiri dari komponen yang tersambung secara seri, parallel bahkan gabungan antara seri-parallel. Merujuk pada *Single Line Diagram* (SLD) Penyulang RDT03, dapat diamati bahwa jumlah node lateral ada sebanyak 27 cabang. Sebelum dapat menghitung nilai SAIDI dan SAIFI gabungan antara node utama dan node lateral, maka nilai laju kegagalan (λ) dan ketidaksediaan komponen (U) harus dihitung terlebih dahulu menggunakan metode *section technique*:

Tabel 4. Jumlah Node Lateral di RDT03

KODE Gardu	NO TIANG	DAYA TRAF0	FASA	MERK TRAF0	TAHUN	ALAMAT
GDL01	RDT03-014/T002	200	3	TRAFINDO	2015	JL. TAMBAK AJI RAYA
GDL02	RDT03-022/B001	100	3	TRAFINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG II
GDL03	RDT03-022/B002	160	3	TRAFINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG II
GDL04	RDT03-025/T001	160	3	SINTRA	2015	JL. TAMBAK AJI RAYA
GDL05	RDT03-025/T001/U001	100	3	TRAFINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI RAYA
GDL06	RDT03-025/T002	100	3	TRAFINDO	2015	JL. TAMBAK AJI TIMUR I
GDL07	RDT03-025/T003/S001	100	3	SINTRA	N/A	JL. TAMBAK AJI TIMUR I
GDL08	RDT03-025/T008	200	3	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI TIMUR I
GDL09	RDT03-028/T002	100	3	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI RAYA
GDL10	RDT03-030/S005/T001	200	3	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI RAYA
GDL11	RDT03-030/S006/B001	50	1	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI RAYA
GDL12	RDT03-030/T004/S005	100	3	TRAFINDO	2015	JL. TAMBAK AJI TIMUR
GDL13	RDT03-034/S002	100	3	TRAFINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI
GDL14	RDT03-038/U001	200	3	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG V
GDL15	RDT03-041/S001	160	3	TRAFINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG V
GDL16	RDT03-041/S001A	100	3	TRAFINDO	2017	JL. TAMBAK AJI GANG V
GDL17	RDT03-049/B003	50	3	UNINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG V
GDL18	RDT03-069/U001	50	1	SINTRA	N/A	JL. TAMBAK AJI II
GDL19	RDT03-061/S001	200	3	TRAFINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI II
GDL20	RDT03-074/S001	100	3	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI I
GDL21	RDT03-075/U004	200	3	SINTRA	N/A	JL. TAMBAK AJI I
GDL22	RDT03-078/U001	100	3	SINTRA	N/A	JL. TAMBAK AJI I
GDL23	RDT03-081/B003/S001	25	1	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG II
GDL24	RDT03-081/S006	50	3	SINTRA	N/A	JL. TAMBAK AJI I
GDL25	RDT03-081/S009	25	1	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI I
GDL26	RDT03-084/S002	25	1	BAMBANG DIAJA	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG II
GDL27	RDT03-086/S001	160	3	UNINDO	N/A	JL. TAMBAK AJI GANG II

b. Indeks Keandalan Lateral Section 18

Cabang lateral atau node lateral pertama yang dihitung indeks keandalannya adalah cabang 1 atau section 18. Cabang 1 memiliki Panjang segmen sebesar 100m atau 0.1kms dari feeder atau node utama dengan trafo 3 fasa 200kVA dengan No. Tiang RDT03-014/T002.



Gambar 3. Node Serial dengan Satu Trafo

Setiap trafo distribusi memiliki *Fuse Cut Out* (FCO) sebagai pengaman trafo yang menjadi standar di Jawa Tengah. Dengan demikian maka indeks keandalannya adalah:

Tabel 5. Indeks Keandalan

ALAT	FAILURE RATE	P.U	r	U
GDL01	0,005	1	10	0,05
FCO01(GDL01)	0,003	1	0,25	0,00075
L1(FCO01 - GDL01)	0,2	0,1	3	0,06

Pada tabel 5 diatas, komponen pertama yang diidentifikasi adalah trafo distribusi dengan kode GDL01 (Gardu Distribusi Lateral) dengan nilai failure rate berdasarkan SPLN No. 59 Tahun 1985 adalah 0,005. Untuk kuantitas komponen, pada penelitian ini menggunakan satuan P.U untuk memudahkan perhitungan. Trafo distribusi adalah komponen yang tidak memiliki dimensi Panjang, sehingga P.U nya adalah 1. Kemudian, komponen berikutnya yang ada adalah FCO01 dengan nilai failure rate sebesar 0,003. Selanjutnya adalah komponen JTM yang menghubungkan main feeder dengan cabang lateral dengan Panjang JTM sebesar 100m atau 0.1kms. dengan demikian, nilai P.U nya adalah 0.1.

Nilai laju kegagalan (λ) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\lambda_{GDL01} = 0,005 \times 1 = 0,005$$

Untuk unavailability (U) dapat dihitung sebagai berikut

$$U_{GDL01} = 0,005 \times 10 = 0,05$$

Tabel 6. Nilai Laju Kegagalan dan Unavailability

ALAT	FAILURE RATE	P.U	λ	r	U
GDL01	0,005	1	0,005	10	0,05
FCO01(GDL01)	0,003	1	0,003	0,25	0,00075
L1(FCO01 - GDL01)	0,2	0,1	0,02	3	0,06

Kemudian dilakukan perhitungan terhadap komponen lainnya seperti FCO01 dan L1 dengan menggunakan cara yang sama dengan perhitungan GDL01. Seperti pada gambar 3 diatas, node 1 merupakan node serial yang hanya memiliki satu trafo distribusi sehingga jumlah nilai laju kegagalan dan *unavailability* komponennya, dapat dihitung sebagai berikut:

$$\lambda_{LP18} = 0,005 + 0,003 + 0,02 = 0,028$$

$$U_{LP18} = 0,05 + 0,00075 + 0,06 = 0,11075$$

Untuk menghitung jumlah nilai laju kegagalan dan unavailability dari section cabang terhadap section/node utama maka dilakukan penjumlahan terhadap hasil perhitungan laju keandalan dan unavailability antara LP18 dan LP1 karena tapping LP18 berada pada section LP1. Penjumlahan keduanya adalah sebagai berikut

$$\lambda_A = 0,028 + 0,117$$

$$= 0,205$$

$$U_A = 0,11075 + 0,58$$

$$= 0,69075$$

Kemudian dapat dilakukan perhitungan SAIFI dan SAIDI sebagai berikut

$$SAIFI_{SEC18} = \frac{0,028 \times 2}{83}$$

$$= 0,004939$$

$$SAIDI_{SEC18} = \frac{0,69075 \times 2}{83}$$

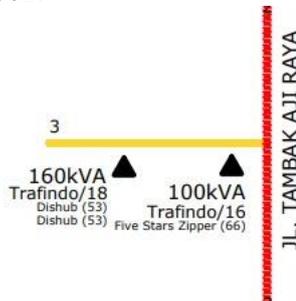
$$= 0,01664$$

Tabel 7. Indeks SAIFI dan SAIDI

KODE	PERHITUNGAN	λ	U	r	N	SAIFI	SAIDI
LP18(GDL01)	L1.GDL01.FCO01	0,028	0,11075	3,955357143	2		
A	LP18(GDL01).LP1	0,205	0,69075	3,369512195	2	0,004939759	0,016644578

c. Indeks Keandalan Lateral Section 19

Cabang lateral atau node lateral kedua yang dihitung indeks keandalannya adalah cabang 2 atau section 19. Cabang 2 memiliki panjang segmen sebesar 150m atau 0.15kms dari feeder atau node utama dan terpasang dua buah trafo 3 fasa 100kVA dengan No. Tiang RDT03-022/B001 dan trafo 3 fasa 160kVA dengan No. Tiang RDT03-022/B002.



Gambar 4. Dua Trafo Terpasang Secara Serial

Seperti pada section 18 atau cabang 1, berdasarkan gambar 4, kedua trafo distribusi yang terpasang terkonfigurasi secara serial sehingga perhitungan terhadap laju kegagalan dan unavailability nya mirip seperti pada section sebelumnya.

Tabel 8. Failure Rate dan Repair Rate Section 19

ALAT	FAILURE RATE	P.U	r
GDL02	0,005	1	10
GDL03	0,005	1	10
FCO02(GDL02)	0,003	1	0,25
FCO03(GDL03)	0,003	1	0,25
L2(MAIN - GDL02)	0,2	0,05	3
L3(GDL02- GDL03)	0,2	0,1	3

Pada tabel 8 diatas, komponen yang diidentifikasi adalah trafo distribusi dengan kode GDL02, GDL03, FCO02, FCO03, L2 dan L3 dengan nilai *failure rate* dan *repair time* (r) berdasarkan SPLN No. 59 Tahun 1985. L2 merupakan Panjang segmen jaringan dari pangkal jaringan (MAIN) ke trafo GDL02.

Nilai laju kegagalan (λ) trafo GDL02 section 19 adalah:

$$\lambda_{GDL02} = 0,005 \times 1$$

$$= 0,005$$

Nilai unavailability (U) pada section 19 adalah:

$$U_{GDL02} = 0,005 \times 10$$

$$= 0,05$$

Kemudian dilakukan perhitungan terhadap komponen lainnya seperti GDL02, FCO02, FCO03, L2 dan L3. Seperti pada gambar 15 diatas, cabang 2 merupakan node serial yang memiliki dua trafo distribusi sehingga untuk menghitung jumlah nilai laju kegagalan dan unavailability komponennya adalah sebagai berikut:

$$\lambda_{LP19} = 0,005 + 0,003 + 0,01$$

$$= 0,018$$

$$U_{LP19} = 0,05 + 0,00075 + 0,03$$

$$= 0,08075$$

$$\lambda_{LP20} = 0,005 + 0,003 + 0,02$$

$$= 0,028$$

$$U_{LP20} = 0,05 + 0,00075 + 0,06$$

$$= 0,11075$$

Untuk menghitung jumlah nilai laju kegagalan dan unavailability dari kedua load point LP19 dan LP20 maka dilakukan penjumlahan terhadap hasil perhitungan laju keandalan dan unavailability antara LP19 dan LP20 karena kedua load point terhubung secara seri. Penjumlahan keduanya adalah sebagai berikut:

$$\lambda_A = 0,018 + 0,028$$

$$= 0,046$$

$$U_A = 0,08075 + 0,11075$$

$$= 0,1915$$

Untuk menghitung jumlah nilai laju kegagalan dan unavailability dari hasil kedua load point (A) dengan section utama, dalam hal ini section 2 atau load point 2, maka dilakukan penjumlahan antara A dengan LP2.

$$\lambda_B = 0,046 + 0,282$$

$$= 0,328$$

$$U_B = 0,1915 + 0,86$$

$$= 1,0515$$

Kemudian dapat dilakukan perhitungan SAIFI dan SAIDI sebagai berikut:

$$SAIFI_{SEC19} = \frac{0,328 \times 3}{83}$$

$$= 0,01185$$

$$SAIDI_{SEC19} = \frac{1,0515 \times 3}{83}$$

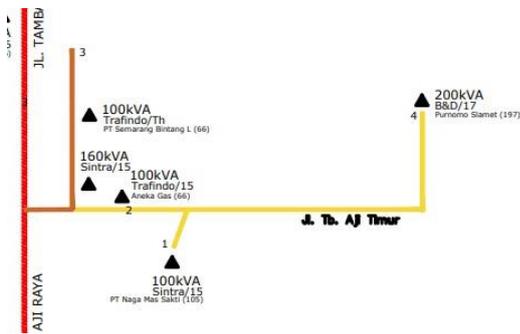
$$= 0,038$$

Tabel 9. Laju Kegagalan dan Unavailability Section 19

KODE	PERHITUNGAN	λ	U	r	N	SAIFI	SAIDI
LP19(GDL02)	L2.GDL02.FCO02	0,018	0,08075	4,486111111	2		
LP20(GDL03)	L3.GDL03.FCO03	0,028	0,11075	3,955357143	1		
A	LP19.LP20	0,046	0,1915	4,163043478			
B	A.LP2	0,328	1,0515	3,205792683	3	0,011855422	0,038006024

c. Indeks Keandalan Lateral Section 20

Cabang lateral atau node lateral ketiga yang dihitung indeks keandalannya adalah cabang 3 atau section 20. Cabang 3 memiliki panjang segmen sebesar 600m atau 0.6kms dari feeder atau node utama dan terpasang 5 buah trafo 3 fasa masing-masing: 100kVA dengan nomor tiang RDT03-025/T001, 100kVA dengan nomor tiang RDT03-025/T001/U001, 100kVA dengan nomor tiang RDT03-025/T002, 100kVA dengan nomor tiang RDT03-025/T003/S001 dan trafo 200kVA dengan nomor tiang RDT03-025/T008.



Gambar 5. Lima Trafo Terpasang secara Seri-Paralel

Seperti pada section 20 atau cabang 3, berdasarkan gambar 8 diatas, kelima trafo distribusi yang terpasang terkonfigurasi secara seri-paralel sehingga perhitungan terhadap laju kegagalan dan unavailabilitasnya berbeda dengan sebelumnya dengan menjumlahkan trafo yang terhubung secara seri terlebih dahulu kemudian baru menjumlahkan secara paralel.

Tabel 10. Laju Kegagalan dan Unavailability Section 20

ALAT	FAILURE RATE	P.U	r
GDL04	0,005	1	10
GDL05	0,005	1	10
GDL06	0,005	1	10
GDL07	0,005	1	10
GDL08	0,005	1	10
FCO04(GDL04)	0,003	1	0,25
FCO05(GDL05)	0,003	1	0,25
FCO06(GDL06)	0,003	1	0,25
FCO07(GDL07)	0,003	1	0,25
FCO08(GDL08)	0,003	1	0,25
L4(MAIN - GDL04)	0,2	0,05	3
L5(GDL04 - GDL05)	0,2	0,15	3
L6(GDL04 - GDL06)	0,2	0,05	3
L7(GDL06 - CAB1)	0,2	0,05	3
L8(CAB1 - GDL07)	0,2	0,05	3
L9(CAB1 - GDL08)	0,2	0,25	3

Pada tabel 10 diatas, komponen yang diidentifikasi adalah trafo distribusi dengan kode GDL04 - GDL08, FCO04 - FCO08, dan L4 - L9 dengan nilai failure rate dan unavailability berdasarkan SPLN No. 59 Tahun 1985. Nilai laju kegagalan (λ) trafo GDL04 pada section 20 adalah:

$$\lambda_{GDL04} = 0,005 \times 1 = 0,005$$

Nilai unavailability (U) pada section 20 adalah:

$$U_{GDL04} = 0,005 \times 10 = 0,05$$

Kemudian setelah itu, dilakukan perhitungan terhadap komponen lainnya seperti GDL05 - GDL08, FCO04, FCO08, dan L4 - L9. Setelah dilakukan perhitungan terhadap seluruh komponen yang ada, maka didapatkan hasil seperti pada tabel 11 dibawah ini:

Tabel 11. Indeks Laju Kegagalan dan Unavailability Section 20

ALAT	FAILURE RATE	P.U	λ	r	U
GDL04	0,005	1	0,005	10	0,05
GDL05	0,005	1	0,005	10	0,05
GDL06	0,005	1	0,005	10	0,05
GDL07	0,005	1	0,005	10	0,05
GDL08	0,005	1	0,005	10	0,05
FCO04(GDL04)	0,003	1	0,003	0,25	0,00075
FCO05(GDL05)	0,003	1	0,003	0,25	0,00075
FCO06(GDL06)	0,003	1	0,003	0,25	0,00075
FCO07(GDL07)	0,003	1	0,003	0,25	0,00075
FCO08(GDL08)	0,003	1	0,003	0,25	0,00075
L4(MAIN - GDL04)	0,2	0,05	0,01	3	0,03
L5(GDL04 - GDL05)	0,2	0,15	0,03	3	0,09
L6(GDL04 - GDL06)	0,2	0,05	0,01	3	0,03
L7(GDL06 - CAB1)	0,2	0,05	0,01	3	0,03
L8(CAB1 - GDL07)	0,2	0,05	0,01	3	0,03
L9(CAB1 - GDL08)	0,2	0,25	0,05	3	0,15

Seperti pada gambar 5 diatas, cabang 3 merupakan node yang terhubung secara seri dan paralel. Untuk menentukan nilai laju kegagalan dan unavailability section 20, maka terlebih dahulu dihitung nilai pada load point komponennya:

$$\lambda_{LP21} = 0,005 + 0,003 + 0,01 = 0,018$$

$$U_{LP21} = 0,05 + 0,00075 + 0,03 = 0,08075$$

Kemudian setelah itu, dilakukan perhitungan terhadap komponen lainnya seperti GDL05 - GDL08, FCO04, FCO08, dan L4 - L9 dan didapatkan hasil seperti pada tabel 12 dibawah:

Tabel 12. Hasil Perhitungan GDL05 - GDL08, FCO04, FCO08, dan L4 - L9

KODE	PERHITUNGAN	λ	U	r
LP21(GDL04)	L4.GDL04.FCO04	0,018	0,08075	4,486111111
LP22(GDL05)	L5.GDL05.FCO05	0,038	0,14075	3,703947368
LP23(GDL06)	L6.GDL06.FCO06	0,018	0,08075	4,486111111
LP24(L7)	L7	0,01	0,03	3
LP25(GDL07)	L8.GDL07.FCO07	0,018	0,08075	4,486111111
LP26(GDL08)	L9.GDL08.FCO08	0,058	0,20075	3,461206897

Untuk menghitung jumlah nilai laju kegagalan dan unavailability dari kelima load point pada cabang 3, maka terlebih dahulu menghitung laju kegagalan dan unavailability pada sub cabangnya.

a. Trafo LP25 dan LP26 (LP25//LP26) yang selanjutnya disebut A, terhubung secara paralel, sehingga dapat dihitung sebagai berikut:

$$\lambda_{LP25/LP26} = (0,018 \times 0,058) \times (4,4861 + 3,4612) = 0,0082$$

$$U_{LP25/LP26} = 0,08075 \times 0,20075$$

$$= 0,01621$$

- b. A terhubung secara seri dengan LP23 dan LP24 (A.LP23.LP24) yang selanjutnya disebut dengan B, sehingga perhitungannya:

$$\lambda_{A.LP23.LP24} = 0,0082 + 0,018 + 0,01 = 0,0362$$

$$U_{A.LP23.LP24} = 0,08075 + 0,03 + 0,0162 = 0,0313$$

- c. LP21 terhubung secara seri dengan LP22 (LP21.LP22) yang selanjutnya disebut dengan C, sehingga perhitungannya:

$$\lambda_{LP21.LP22} = 0,018 + 0,038 = 0,056$$

$$U_{LP21.LP22} = 0,08075 + 0,14075 = 0,2215$$

- d. B terhubung secara paralel dengan C (B//C) yang selanjutnya disebut dengan D, sehingga perhitungannya:

$$\lambda_{B/C} = (0,0362 \times 0,056) \times (0,8625 + 3,955) = 0,00979$$

$$U_{LP25/LP26} = 0,0313 \times 0,2215 = 0,00639$$

Untuk menghitung jumlah nilai laju kegagalan dan unavailability dari hasil penjumlahan load point cabang dengan section utama, dalam hal ini node D, maka dilakukan penjumlahan antara D dengan LP2.

$$\lambda_{D.LP2} = 0,00979 + 0,282 = 0,2917$$

$$U_B = 0,00693 + 0,86 = 0,8669$$

Tabel 13. Hasil Perhitungan λ , U dan r

KODE	PERHITUNGAN	λ	U	r
LP21(GDL04)	L4.GDL04.FCO04	0,018	0,08075	4,486111111
LP22(GDL05)	L5.GDL05.FCO05	0,038	0,14075	3,703947368
LP23(GDL06)	L6.GDL06.FCO06	0,018	0,08075	4,486111111
LP24(L7)	L7	0,01	0,03	3
LP25(GDL07)	L8.GDL07.FCO07	0,018	0,08075	4,486111111
LP26(GDL08)	L9.GDL08.FCO08	0,058	0,20075	3,461206897
A	LP25//LP26	0,008297	0,016210563	1,953786007
B	A.LP24.LP23	0,036297	0,031309003	0,862578255
C	LP21.LP22	0,056	0,2215	3,955357143
D	B//C	0,00979309	0,006934944	0,708146702
E	D.LP2	0,29179309	0,866934944	2,971060573

Kemudian dapat dilakukan perhitungan SAIFI dan SAIDI dengan memasukan faktor jumlah pelanggan total dan jumlah pelanggan yang terhubung pada cabang 3 atau section 20:

$$SAIFI_{SEC20} = \frac{0,2917 \times 8}{83} = 0,02812$$

$$SAIDI_{SEC20} = \frac{0,8669 \times 8}{83}$$

$$= 0,08355$$

Untuk cabang 21 sampai dengan cabang 34 dihitung dengan menggunakan metode yang sama untuk rangkaian yang terhubung secara seri dan paralel. Hasil perhitungan untuk masing-masing cabang dapat dilihat pada lampiran. Berikut merupakan summary hasil perhitungan nilai laju kegagalan, unavailability, SAIFI dan SAIDI pada penyulang RDT03 yang terdiri dari 34 section gabungan antara section utama dan section lateral.

Tabel 14. Perhitungan SAIFI dan SAIDI Section 18-34

CABANG	λ	U	N	SAIFI	SAIDI
CAB18	0,205	0,69075	2	0,005	0,01664458
CAB19	0,328	1,0515	3	0,012	0,03800602
CAB20	0,292	0,86693	8	0,028	0,08355999
CAB21	0,395	1,26075	2	0,01	0,03037952
CAB22	0,368	1,15049	14	0,062	0,19405886
CAB23	0,505	1,66075	2	0,012	0,04001807
CAB24	0,495	1,63075	2	0,012	0,03929518
CAB25	0,628	2,0915	5	0,041	0,14662386
CAB26	0,65	2,13075	2	0,016	0,05134337
CAB27	0,72	2,48075	1	0,009	0,02988855
CAB28	0,818	2,86075	1	0,01	0,03446687
CAB29	0,886	3,12075	1	0,011	0,0375994
CAB30	0,916	3,21075	1	0,011	0,03868373
CAB31	0,921	0,08075	1	0,011	0,00097289
CAB32	0,962	3,29479	3	0,035	0,11908869
CAB33	1,001	3,48075	1	0,012	0,04193675
CAB34	1,036	3,62075	1	0,012	0,04362349

- e. **Indeks Keandalan Eksisting Penyulang RDT03**

Lokasi letak recloser eksisting pada penyulang RDT03 terletak pada feeder utama pada Section 25. Sebelum melakukan optimalisasi penempatan recloser untuk menekan angka SAIFI dan SAIDI maka dilakukan perhitungan estimasi nilai indeks keandalan penyulang terlebih dahulu.

Setelah melakukan perhitungan laju kegagalan dan unavailability pada sub-bab 4.1.1 dan 4.1.2 maka data tersebut digunakan untuk menghitung nilai SAIFI dan SAIDI. Hasil perhitungan terhadap laju kegagalan dan unavailability dari node utama atau main feeder digabungkan dengan hasil perhitungan laju kegagalan dan unavailability dari node cabang atau section. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 15 berikut:

Tabel 15. Indeks Keandalan Eksisting Penyulang RDT03

LP SECTION UTAMA	λ	U	N	$\lambda \times \#PLG$	U x #PLG
1	0,205	0,69075	2	0,41	1,3815
2	0,61979309	1,918434944	12	7,43751708	23,0212193
3	0,762526103	2,411241817	17	12,9629438	40,9911109
4	0,382	1,23	1	0,382	1,23
5	1	3,2915	6	6	19,749
6	1,278	4,22225	8	10,224	33,778
7	0,617	2,04	1	0,617	2,04
8	0,662	2,21	2	1,324	4,42
9	0,687	2,32	1	0,687	2,32
10	0,72	2,48075	2	1,44	4,9615
11	0,818	2,86075	2	1,636	5,7215
12	1,802	6,3315	4	7,208	25,326
13	0,921	0,08075	15	13,815	1,21125
14	0,961890623	3,294786976	4	3,84756249	13,1791479
15	1,001	3,48075	2	2,002	6,9615
16	1,036	3,62075	3	3,108	10,86225
17	1,046	3,77	1	1,046	3,77

Setelah menghitung hasil total nilai laju kegagalan x jumlah pelanggan per section dari masing-masing load point dari section 1 hingga section 17, setelah itu data dijumlahkan berdasarkan section dari PMT s/d Recloser sebagai section 1 dan dari Recloser s/d ujung sebagai section 2.

Tabel 16. Indeks Keandalan Syatem Section 1 - 17

SECTION	INDEKS KEANDALAN SISTEM		Jumlah Pelanggan
	$\lambda_{total} \times \#PLG$	Utotal x #PLG	
PMT S/D REC	37,41646083	120,1508302	46
REC S/D UJUNG	36,73056249	80,77314791	37
TOTAL	74,14702332	200,9239781	83

Dengan menggunakan persamaan, maka nilai indeks keandalan SAIFI dapat dihitung:

$$SAIFI = \frac{74,146}{83} = 0,8933$$

$$SAIDI = \frac{200,9239}{83} = 2,4207$$

Dengan demikian, maka nilai indeks keandalan penyulang RDT existing adalah sebesar 0,8933 untu SAIFI dan 2,4207 untuk SAIDI.

B. Optimalisasi Lokasi Recloser dengan Particle Swarm Optimization

Setelah melakukan perhitungan laju kegagalan, unavailability, SAIDI dan SAIFI dari section utama dan section cabang, maka hasil dari perhitungan ini dimasukkan kedalam algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* dengan menggunakan Bahasa pemrograman MATLAB.

Adapun parameter – parameter yang dimasukkan adalah data Panjang Bus dan data perhitungan SAIFI dan SAIDI dari section cabang.

```
SAIFI = zeros(size(busdata, 1), 1);
SAIDI = zeros(size(busdata, 1), 1);
fitL = zeros(size(busdata, 1), 1);
```

```
busdata = [
1 0 0.85 0
2 200 0.5 1
3 160 0.4 1
4 160 0.05 1
5 50 0.45 2
6 50 0.6 1
7 100 0.05 1
8 100 0.2 2
9 100 0.1 1
10 100 0.05 1
11 160 0.4 1
12 100 0.35 2
13 50 0.15 14
14 160 0.25 1
15 100 0.05 1
16 160 0.2 2
17 160 0.1 1];

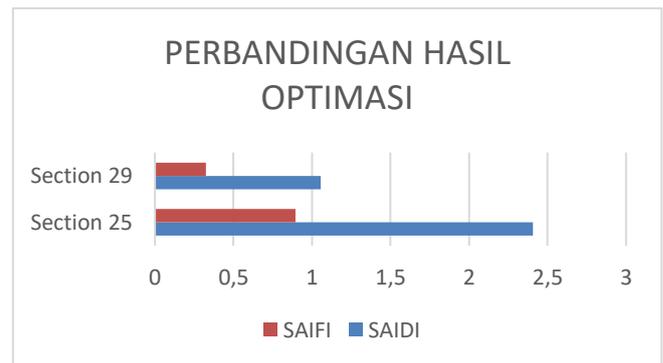
node=[
18 0.004939759 0.016644578
19 0.011855422 0.038006024
20 0.028124635 0.083559995
21 0.009518072 0.030379518
22 0.061992355 0.194058861
23 0.012168675 0.040018072
24 0.011927711 0.039295181
25 0.037831325 0.125993976
26 0.015662651 0.051343373
27 0.008674699 0.029888554
28 0.009855422 0.034466867
29 0.010674699 0.037599398
30 0.011036145 0.038683735
31 0.011096386 0.000972892
32 0.034767131 0.119088686
33 0.012060241 0.041936747
34 0.012481928 0.043623494];
```

C. Analisis hasil optimalisasi

Setelah memasukkan semua parameter seperti inialisasi program, konstanta dan memasukan data bus dan data SAIFI – SAIDI section kedalam program MATLAB, kemudian dilakukan simulasi dan didapatkan hasil sebagai berikut:

```
Saifi total = 0.3284
Saidi total = 1.0651
```

```
Iteration 50, Best Param = 1 1 1 1 1 10 3 1 9 1 1
Best Saifi = 1.0558
Best Saifi = 0.32575
Best Fitness = 29.0758
Best Cost = 0.34393
```



Gambar 6. Perbandingan Hasil Optimasi

Hasil perhitungan optimalisasi menggunakan PSO, maka didapatkan hasil bahwa Best Fitness untuk penempatan recloser yang paling optimal adalah pada section 29 dengan nilai SAIFI sebesar 0.32575 dan nilai SAIDI sebesar 1.0558. Jika dibandingkan dengan letak *recloser existing*, *recloser existing* terletak pada section 25 dengan nilai SAIFI sebesar 0,8933 dan SAIDI sebesar 2,407. Dengan demikian terdapat peningkatan keandalan jaringan jika recloser pada penyulang RDT03 direlokasi menuju lokasi section 29. Dengan demikian, dengan menggunakan PSO, diperoleh lokasi letak recloser yang baru yaitu pada section 29 dan nilai SAIFI yang lebih optimal dengan penurunan sebesar 36% atau sebesar 0,5675 kali/tahun/pelanggan dan penurunan nilai SAIDI sebesar 43,61% atau sebesar 1,3649 jam/tahun/pelanggan.

IV KESIMPULAN

Dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada optimalisasi penempatan recloser, maka dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa penempatan recloser pada penyulang RDT03 di Kawasan Industri Tambak Aji yang paling optimal pada kondisi eksisting adalah pada section atau node 29. Dari optimasi penempatan recloser dengan menggunakan algoritma PSO (*Particle Swarm Optimization*) didapatkan lokasi baru pada section 29 dengan nilai SAIFI sebesar 0.32575 dan nilai SAIDI sebesar 1.0558. Jika dibandingkan dengan letak recloser eksisting, maka nilai SAIFI lebih optimal dengan penurunan sebesar 36% atau sebesar 0,5675 kali/tahun/pelanggan dan penurunan nilai SAIDI sebesar 43,61% atau sebesar 1,3649 jam/tahun/pelanggan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amirudin, M. Hasyim, Optimalisasi Keandalan Sistem Proteksi Feeder dengan Relay Penutup Balik (Auto Recloser) Pada Gardu Induk Tello, Gowa: *Jurnal In-stek* Vol. 5, No. 1, 2020.
- [2] Dinna Fitria, Arif Maulana, Analisis Pembagian Zona Proteksi Pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Meranti GI Bungaran Untuk Meningkatkan Pelayanan Ke Konsumen, Palembang: *Jurnal Ampere*, Volume 5, No 2, 2020
- [3] D. Treballe and B. Valecillos, "Optimal Operation of Paraleled Power Transformers," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, Mar. 2008, doi: 10.24084/repqj06.392.
- [4] Fahrulrozi, Moch.; Suyono, Hadi & Lomi, Abraham (2019). Peningkatan Keandalan Sistem Distribusi dengan Relokasi Penempatan Fuse-Recloser Optimal karena Injeksi Pembangkit Tersebar, *Jurnal EECCIS* Vol. 13, No. 2, Agustus, pp.78-83, p-ISSN : 1978-3345, e-ISSN(Online): 2460-8122, <https://jurnaleec-cis.ub.ac.id/>
- [5] Hidayah, Nurul; Supriyatna dan Muljono, Agung Budi (2014). Analisis Manuver Jaringan Terhadap Keandalan Kontinuitas Penyaluran Tenaga Listrik Penyulang Di Area Ampenan [Analysis of Network Maneuvers Toward Continuity Reliability of Feeders Electric Power Transmission in Ampenan Area], *Dielektrika*, ISSN 2086-9487 109 Vol.3, No.1, pp.109 -115, Agustus.
- [6] Khairul, Fadri & Risfendra (2022), Evaluasi Keandalan Sistem Jaringan Distribusi 20 kV dan Energy Not Supplied (ENS) Pada GH Balai Selasa, *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia* Vol.3, No.1, 2022, pp.158-167, e-ISSN 2723-0589, DOI: <https://doi.org/10.24036/jtein.v3i1.226>
- [7] Marsudi, D. (2006). Operasi Sistem Tenaga Listrik. Yogyakarta: Graha Ilmu
- [8] Putra, I Gede Wiyoga; Arjana, I Gede Dyana dan Setiawan, Widyadi (2020). Perancangan Penempatan Recloser Yang Optimum Menggunakan Metode *Quantum Genetic Algorithm* Di Penyulang Palapa, *Jurnal Spektrum*, Vol. 7, No. 4 Desember, pp.90-99.
- [9] Senen, Adri ; Ratnasari, Titi & Anggani, Dwi (2019), Studi Perhitungan Indeks Keandalan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Graphical User Interface Matlab pada PT PLN (Persero) Rayon Kota Pinang, *Jurnal Ilmiah: Energi dan Kelistrikan*, Vol. 11, No. 2, Juli – Desember, pp.138-148, P-ISSN 1979-0783, E-ISSN 2655-5042, <http://doi.org/10.33322/energi.v11i2.497>.
- [10] Slamet Hani, Gatot Santoso, Penempatan Recloser Sebagai Parameter Keandalan Sistem Proteksi pada Sistem Distribusi, Yogyakarta: Simposium Nasional RAPI XVIII FT UMS, 2019.
- [11] Wayan Sukadana, Nyoman Suartika, Optimalisasi LBS Motorized Key Point Pada Jaringan Distribusi 20 KV untuk Meningkatkan Keandalan Sistem, Bali: *Jurnal Tenik Elektro dan Vokasional*, Vol. 5, No. 1.1, 2019
- [12] Zahro, Hani Zulfia & Wahyuni, Febriani Santi (2020). Optimasi *Particle Swarm* Optimization (PSO) untuk Penentuan Base Tranciever System (BTS), *Jurnal Mne-monic*, Vol 3, No.1, Februari.