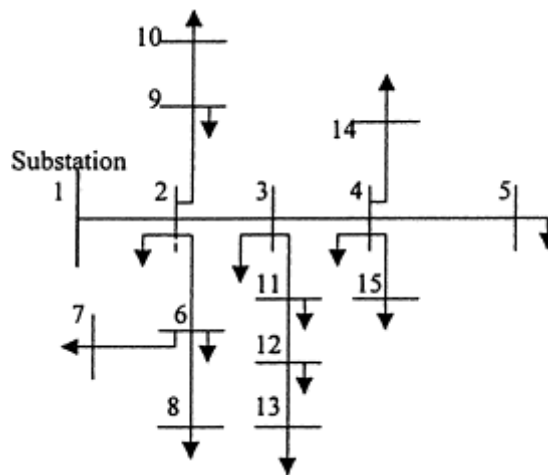


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Jaringan Distribusi Radial

Sistem jaringan distribusi radial merupakan sistem jaringan yang menyalurkan daya listrik dari satu titik sumber ke titik-titik beban yang bercabang-cabang. Sistem ini dinamakan radial karena saluran ditarik secara radial dari sumber (Simanjuntak et al., 2020).

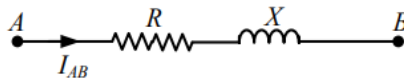


Gambar 2. 1 Ilustrasi jaringan listrik radial (Simanjuntak et al., 2020)

Sistem distribusi radial mempunyai cabang utama yang di dalamnya terdiri dari cabang-cabang kecil (lateral). Pada jaringan distribusi radial, saluran yang lebih dekat dengan sumber utama atau gardu induk akan memiliki nilai arus yang lebih besar dibandingkan dengan saluran ujung. Hal tersebut dikarenakan terjadi rugi-rugi daya sepanjang saluran. Perubahan nilai arus dari pangkal ke ujung mempengaruhi terhadap ukuran penghantar yang digunakan, sehingga jaringan radial memiliki kelemahan dalam kualitas penyaluran daya listrik.

2.2 Rugi-rugi Daya

Dalam proses penyaluran tenaga listrik kepada para pelanggan terjadi rugi-rugi teknis (*losses*) yaitu rugi daya. Rugi-rugi daya disebabkan oleh sifat daya hantar material atau peralatan listrik itu sendiri yang sangat tergantung dari kualitas bahan material atau peralatan listrik tersebut. Dalam suatu jaringan, rugi-rugi daya akan sangat tergantung dengan konfigurasi jaringannya (Pilat et al., 2022).



Gambar 2. 2 Penghantar jaringan distribusi dengan impedansi R dan X (Cekdin et al., 2020)

Berdasarkan Gambar 2.2, rugi-rugi daya aktif disebabkan oleh arus (I_{AB}) dan resistansi (R), sedangkan rugi-rugi daya reaktif disebabkan oleh arus (I_{AB}) dan reaktansi (X).

Perhitungan rugi-rugi daya secara matematis dapat dicari menggunakan rumus berikut:

a. Rugi daya aktif

$$P_{loss} = I^2 \times R \quad (2.1)$$

Dimana:

P_{loss} = Rugi daya aktif (kW)

I = Arus (A)

R = Tahanan/resistansi saluran (Ω)

b. Rugi daya reaktif

$$Q_{loss} = I^2 \times X \quad (2.2)$$

Dimana:

Q_{loss} = Rugi daya reaktif ($kVar$)

I = Arus (A)

X = Reaktansi saluran (Ω)

Pemilihan jenis penghantar akan memengaruhi terhadap kontinuitas penyaluran daya. Semakin besar nilai resistansi pada penghantar, maka nilai rugi-rugi daya akan semakin besar pula (Luvi Saputra, 2019). Selain itu, besarnya resistansi penghantar juga dipengaruhi oleh panjangnya saluran. Pada Tabel 2.1 berdasarkan SPLN 64:1985, jenis penghantar AAAC merupakan yang sering digunakan pada sistem jaringan distribusi.

Tabel 2. 1 Jenis Kabel AAAC Jaringan Distribusi

Penampang Nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urat (mm)	GMR (mm)	Impedansi (Rnom)	
				R (ohm)	X (ohm)
16	2,2563	7	1,6380	2,0161	0,4036
25	2,8203	7	2,0475	1,2903	0,3895
35	3,3371	7	2,4227	0,9217	0,3790
50	3,9886	7	2,8957	0,6452	0,3678
70	4,7193	7	3,4262	0,4608	0,3572
95	5,4979	19	4,1674	0,3396	0,3449
120	6,1791	19	4,6837	0,2688	0,3376
150	6,9084	19	5,2365	0,2162	0,3305
185	7,6722	19	5,8155	0,1744	0,3239
240	8,7386	19	6,6238	0,1344	0,3158

Besarnya nilai resistansi penghantar karena pengaruh panjang saluran dirumuskan sebagai berikut:

$$R_i = R_{nom} \times l_i \quad (2.3)$$

Dimana:

R_i = Resistansi saluran ke-i (Ω)

R_{nom} = Resistansi nominal penghantar per KM (Ω)

l_i = Panjang saluran ke-i (KM)

Rugi daya dalam persen merupakan perbandingan nilai rugi daya yang didapatkan dari daya hilang dalam saluran dengan total daya yang dikonsumsi, dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Rugi\ Daya\ (\%) = \frac{Rugi\ Daya\ Total}{Daya\ Total\ yang\ Disalurkan} \times 100\% \quad (2.4)$$

Dalam proses optimasi pengurangan kerugian daya dengan upaya rekonfigurasi jaringan, persentase kerugian daya terhadap kondisi eksisting dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\frac{\text{Pengurangan Rugi Daya (\%)}}{\text{Rugi Daya (\%)}} = \frac{\text{Rugi Daya Eksisting} - \text{Rugi Daya Baru}}{\text{Rugi Daya Eksisting}} \times 100\% \quad (2.5)$$

2.3 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah penurunan tegangan listrik pada suatu titik di sepanjang saluran transmisi atau distribusi dibandingkan dengan tegangan sumbernya. Pada jaringan distribusi perhitungan jatuh tegangan dihitung dari selisih tegangan pangkal pengirim dan tegangan ujung penerima. Jatuh tegangan berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban, tetapi berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar (Sobikin, 2022). Jika jatuh tegangan melebihi batas toleransi dan tidak segera dilakukan perbaikan, maka dapat menyebabkan pelayanan terhadap beban terganggu dan beban tidak dapat bekerja secara optimal sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik yang akhirnya merugikan pelanggan listrik (Suprianto, 2018). PT PLN telah menetapkan batas toleransi jatuh tegangan dalam SPLN 1 :1995 adalah sebesar 10% dan kenaikan tegangan sebesar 5% dari tegangan nominal dan rugi-rugi daya sekecil mungkin (PT. Perusahaan Listrik Negara & (Persero), 1995). Pada jaringan tegangan menengah (JTM), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 10% dari tegangan nominal 20 kV atau maksimal 18 kV.

Beberapa faktor yang memengaruhi besar jatuh tegangan yang terjadi pada suatu jaringan listrik adalah:

1. Panjang saluran jaringan yang terlalu jauh (jarak transformator dengan gardu induk terlalu jauh).
2. Rendahnya jaringan yang didapat dari gardu induk.
3. Sambungan/penjamparan penghantar yang kurang baik.
4. Jenis penghantar yang digunakan.
5. Arus yang disalurkan terlalu besar.

2.4 Metode Penyelesaian Aliran Daya

Metode penyelesaian aliran daya (*load flow*) adalah suatu metode yang digunakan untuk menghitung parameter-parameter sistem tenaga listrik, seperti arus, tegangan, daya, dan rugi-rugi daya. Metode aliran daya *Backward and Forward Sweep* (BFS) merupakan metode yang lebih efisien dibandingkan metode lainnya (Santoso et al., 2018). Metode ini menggunakan persamaan *Kirchoff's Voltage Law* (KVL) dan *Kirchoff's Current Law* (KCL) yang dibentuk pada saluran.

Prinsip utama dalam metode BFS adalah dengan menghitung nilai arus yang mengalir pada masing-masing saluran akibat beban pada masing-masing titik beban (Risnandar, 2017). Berdasarkan fungsinya, metode BFS dirumuskan sebagai berikut.

a) *Bacward Sweep*

Pada iterasi pertama, tegangan dari semua titik diasumsikan sama dengan tegangan pada sumber utama. Apabila terdapat lebih dari satu sumber utama pada jaringan, arus injeksi kompensasi pada sumber tersebut bernilai nol pada iterasi

pertama. Tegangan pada masing-masing titik dan arus injeksi kompensasi dihitung pada iterasi sebelumnya. Arus beban dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$I_i = \left[\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right] \quad (2.6)$$

Dimana:

- I_i = Arus beban pada titik i
- P_i = Kebutuhan daya aktif pada titik i
- Q_i = Kebutuhan daya reaktif pada titik i
- V_i = Tegangan pada titik i

b) *Forward Sweep*

Forward Sweep dimulai dari titik sumber utama dimana nilai tegangan, impedansi, dan arus yang mengalir pada masing-masing saluran diketahui, semua tegangan titik diperbarui dengan syarat apabila terdapat sumber lainnya diabaikan.

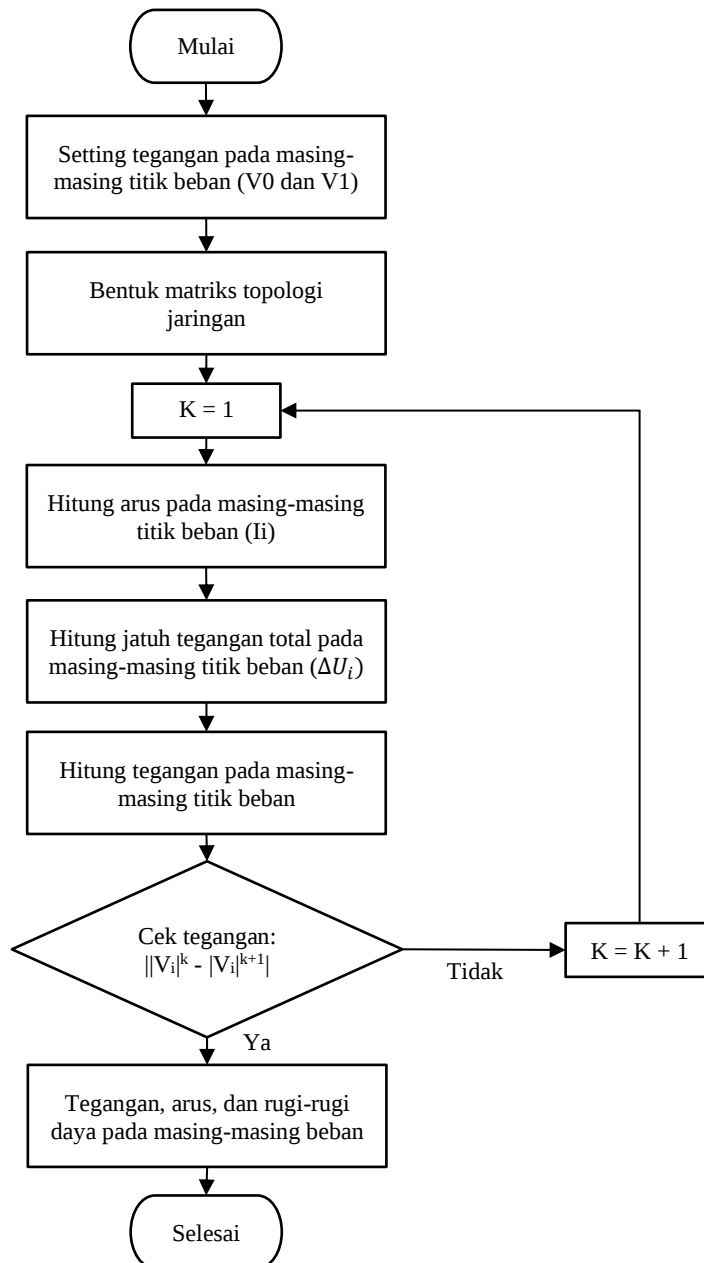
Tegangan pada titik i dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$V_i = V_0 - \Delta U_i \quad (2.7)$$

Dimana:

- V_i = Tegangan pada titik i
- V_0 = Tegangan referensi pada gardu induk
- ΔU_i = Jatuh tegangan total pada masing-masing titik beban

Secara umum, diagram alir pada metode aliran daya BFS adalah sebagai berikut:



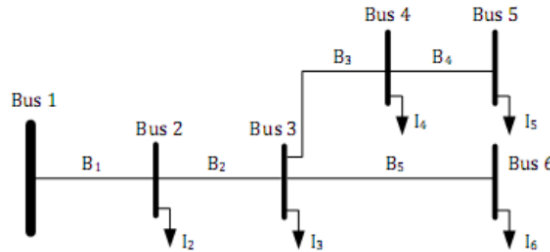
Gambar 2. 3 Diagram alir metode Backward and Forward Sweep (Risnandar, 2017).

Metode aliran daya *Backward and Forward Sweep* (BFS) pada jaringan radial adalah sebagai berikut:

1) Membuat Matriks K

Matriks K merupakan sebuah matriks dari pembentukan matriks impedansi dengan melakukan analisis tiap saluran (Asri et al., 2020). Arah saluran

direpresentasikan dalam matriks yang menunjukkan arah arus injeksi dari satu bus ke bus lain (*bus sending to bus receiving*).



Gambar 2. 4 Ilustrasi branch B dan arus I pada jaringan distribusi radial (Asri et al., 2020).

Berdasarkan Gambar 2.4, injeksi arus pada tiap cabang mempunyai persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_3 &= I_4 + I_5 \\
 B_4 &= I_5 \\
 B_5 &= I_6
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Apabila suatu saluran cabang berada pada jalur tertentu dimana arahnya berlawanan dengan bus referensi (bus utama), maka bernilai -1. Hubungan antara arus injeksi dan arus cabang dapat dinyatakan sebagai matriks K berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

2) Membuat Matriks *Bus Injection to Branch Current* (BIBC)

Matriks BIBC menyatakan hubungan antara arus injeksi bus dan arus cabang. Matriks ini hanya berisi nilai 0 dan 1, sehingga dapat dinyatakan sebagai matriks berikut:

$$[BIBC] = - [Matriks K] \tag{2.10}$$

sehingga,

$$[BIBC] = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

sehingga terbentuk matriks B (*branch*) sebagai berikut:

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.12)$$

3) Membuat Matriks *Branch Current to Bus Voltage* (BCBV)

Matriks BCBV menyatakan hubungan antara arus cabang dengan tegangan bus. Parameter saluran dan tegangan dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= B_1 Z_{12} \\ V_1 - V_3 &= B_1 Z_{12} + B_2 Z_{23} \\ V_1 - V_4 &= B_1 Z_{12} + B_2 Z_{23} + B_3 Z_{34} \\ V_1 - V_5 &= B_1 Z_{12} + B_2 Z_{23} + B_3 Z_{34} + B_4 Z_{45} \\ V_1 - V_6 &= B_1 Z_{12} + B_2 Z_{23} + B_5 Z_{56} \end{aligned} \quad (2.13)$$

dalam bentuk matriks, persamaan (2.11) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

persamaan (2.12) dapat disederhanakan menjadi matriks ΔV yang menyatakan jatuh tegangan dari bus sumber ke bus beban di dalam sistem sebagai berikut:

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.15)$$

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.16)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.17)$$

dengan matriks *Distribution Load Flow* (DLF) dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} & Z_{12} + Z_{23} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} + Z_{45} & Z_{12} + Z_{23} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} + Z_{23} + Z_{36} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.5 Rekonfigurasi Jaringan Distribusi

Rekonfigurasi jaringan distribusi merupakan sebuah upaya untuk merubah konfigurasi jaringan distribusi dengan membuka atau menutup saklar tertentu untuk memperbaiki kinerja jaringan, seperti menurunkan rugi-rugi daya dan menaikkan nilai tegangan. Rekonfigurasi pada sistem distribusi radial merupakan proses merubah nilai arus maupun impedansi saluran atau memindahkan suplay suatu titik beban trafo distribusi dari suatu saluran ke saluran yang lain. Rekonfigurasi ini dapat merubah parameter dari saluran distribusi, seperti impedansi dan arus saluran (Karnadi et al., 2020). Perubahan kedua parameter akan mengubah nilai rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran.

Penelitian oleh Muyideen Lawal, dkk. pada tahun 2023, digunakan dua teknik yang paling murah, yaitu konfigurasi ulang jaringan dan penempatan kapasitor, untuk mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan profil tegangan sistem distribusi radial, yang meningkatkan kinerja sistem. Metodologi ini melibatkan perumusan fungsi tujuan yang meminimalkan kehilangan daya nyata secara keseluruhan dalam jaringan distribusi radial dengan tetap memenuhi persyaratan kesetaraan dan ketidaksetaraan, yang ditangani oleh algoritma optimasi dingo untuk setiap teknik. Hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi ulang jaringan mengungguli teknik penempatan kapasitor, dengan total kehilangan daya nyata

berkurang sebesar 36,76%, dibandingkan 34,44%, untuk teknik penempatan kapasitor (Lawal et al., 2023).

Rekonfigurasi sistem jaringan distribusi akan memberikan alternatif perbaikan pada saluran atau penyulang, sehingga dapat menentukan konfigurasi dan panjang saluran jaringan tegangan menengah (JTM) berdasarkan pertimbangan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan.

Tahapan dalam melakukan rekonfigurasi jaringan adalah sebagai berikut.

1. Menghitung aliran daya pada konfigurasi yang akan direkonfigurasi.
2. Rekonfigurasi dilakukan dengan memindahkan beban-beban saluran pada *feeder* yang berdekatan dengan cara mengubah status LBS (*Load Break Switch*) dan mengubah letak posisi dari LBS.
3. Membandingkan kondisi jaringan setelah dilakukan konfigurasi dengan kondisi sebelumnya.
4. Mengalisis setiap konfigurasi yang telah direkonfigurasi dengan menghitung kembali rugi-rugi daya dan jatuh tegangan sehingga didapat konfigurasi jaringan yang lebih optimal.

2.6 Teori Optimasi

Optimasi merupakan suatu usaha untuk menemukan hasil maksimal atau minimal dari suatu permasalahan yang akan dioptimalkan. Dalam kasus pencarian hasil yang optimal dengan jumlah data yang banyak, diperlukan suatu metode optimasi yang mempermudah dalam perhitungan. Perhitungan tersebut dilakukan dengan model metaheuristik yaitu cara mencari hasil dengan *trial and error* dengan

bantuan faktor-faktor pendukung seperti tingkah laku dari suatu koloni sebagai arahan (Handayanto, 2019).

Metaheuristik adalah teknik untuk menemukan solusi optimal dengan jumlah numerik yang sangat rendah. Banyak algoritma metaheuristik yang berhasil digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang sulit. Keunggulan dalam algoritma metaheuristik digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang kompleks dengan memberikan hasil yang terbaik dalam waktu sesingkat mungkin (Kareem et al., 2022). Dalam prosesnya, perhitungan metaheuristik melakukan pembelajaran atau *learning* terhadap kondisi sebelumnya dan melakukan adaptasi dengan mengintegrasikan hasil sebelumnya dengan kemungkinan selanjutnya untuk menguji dan memaksimalkan komputasi sehingga didapatkan hasil yang paling mendekati. Dengan bantuan perhitungan ini, pencarian hasil optimal dapat dilakukan dengan cepat dan efisien.

Beberapa metode optimasi metaheuristik yang biasa digunakan adalah sebagai berikut:

1) *Simulated Annealing (SA)*

Implementasi algoritma SA dimulai dengan solusi awal. Dengan menggunakan strategi distrik, pendekatan baru dikembangkan. Ketika nilai masalah optimasi pendekatan saat ini kurang dari solusi awal, maka model teknis digunakan dan model yang sudah ada diperbarui.

Keunggulan dari algoritma SA ini adalah memiliki elemen probabilistik, rendah waktu komputasi/singkat, dan penerapan yang sederhana. Sedangkan kelemahannya adalah konsistensi solusinya tergantung pada loop internal maksimum validasi sampel.

2) *Genetic Algorythm (GA)*

Algoritma GA dimulai dengan identifikasi resolusi, juga dikenal sebagai solusi original, yang dapat dikembangkan menggunakan berbagai teknik, termasuk rangkaian solusi dikonfigurasi dengan kuantitas dan alternatif nilai acak diproduksi dengan cara yang berbeda dan terpisah.

Keunggulan dari algoritma GA adalah sangat mudah untuk melakukan *update* data. Selain itu, kemampuan untuk menangani kombinatorial atau diskontinu tujuan dan batasan, dan dapat dilakukan untuk memecahkan masalah yang sulit. Sedangkan kelemahannya adalah akurasi yang rendah sehingga membutuhkan lebih banyak waktu.

3) *Particle Swarm Optimization (PSO)*

Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan salah satu metode dari perhitungan metaheuristik atau strategi yang memandu proses pencarian untuk menemukan solusi yang mendekati optimal dari suatu masalah optimasi (Putra et al., 2019). Metode PSO adalah sebuah algoritma optimasi yang terinspirasi dari perilaku sekawanan binatang, seperti burung atau ikan dalam mencari makanan atau mangsa. Algoritma ini menggambarkan gerakan sekelompok partikel dalam ruang pencarian, dimana setiap partikel mewakili solusi potensial untuk masalah optimasi. Pergerakan setiap partikel dipengaruhi oleh pengalaman pribadinya dan pengalaman sekawanan secara keseluruhan. Setiap solusi disebut sebagai objek dan komunitas disebut segerombolan. Untuk menjamin penemuan potensi tersebut, digunakan pendekatan PSO secara mandiri berdasarkan teknik pembuatan pelamar dan juga digunakan dalam strategi permulaan pencarian lokal dan teknik

pengelompokan dengan menggunakan kerangka pengurangan peta (Kareem et al., 2022).

Algoritma PSO dalam semua kasus memiliki kinerja yang baik. Dalam menyelesaikan masalah rekonfigurasi jaringan, metode PSO digunakan untuk mencari solusi terbaik dari suatu fungsi tujuan. Fungsi tujuan yang digunakan biasanya merupakan fungsi rugi-rugi daya yang ingin diminimalkan dengan cara mengubah status saklar pada jaringan distribusi.

2.7 Penelitian Terkait

Tabel 2.2 menunjukkan hasil penelitian terkait rekonfigurasi jaringan yang telah berhasil meminimalkan kerugian daya saluran menggunakan beberapa metode.

Tabel 2. 2 Penelitian Terkait Rekonfigurasi Jaringan

No	Judul Penelitian	Penulis, Tahun	Pembahasan
1	<i>The Economic of Network Reconfiguration and Shunt Compensation on A 33 kV Distribution Network</i>	(Lawal et al., 2023)	Digunakan dua teknik, yaitu konfigurasi ulang jaringan dan penempatan kapasitor, untuk mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan profil tegangan sistem distribusi radial, yang meningkatkan kinerja sistem. Teknik rekonfigurasi jaringan memberikan hasil yang terbaik dibandingkan dengan pemasangan kapasitor.
2	Perbaikan Rugi Energi dengan Rekonfigurasi jaringan pada Sistem Distribusi Radial	(Asri et al., 2020)	Penggunaan metode <i>simple branch exchange</i> dalam merekonfigurasi jaringan menghasilkan penurunan rugi-rugi energi dari 30,673 kWh menjadi 27,576 kWh.

No	Judul Penelitian	Penulis, Tahun	Pembahasan
3	<i>Optimal Integration of Distribution Network Reconfiguration and Conductor Selection in Power Distribution Systems via MILP</i>	(Gallego Pareja et al., 2023)	Penelitian ini menyajikan pendekatan baru yang menggabungkan konfigurasi ulang jaringan distribusi optimal (ODNR) dengan pemilihan konduktor optimal (OCS) untuk meminimalkan kehilangan daya dan meningkatkan profil tegangan PDS. Kontribusi utamanya terletak pada integrasi ODNR dan OCS kedalam satu masalah MILP, yang memastikan tercapainya solusi optimal secara global. Model yang diusulkan diuji dengan sistem uji <i>benchmark</i> 33-, 69-, dan 85-bus. Hasilnya memungkinkan bahwa efek gabungan ODNR dan OCS memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan jika salah satu pendekatan ini diterapkan secara terpisah atau berurutan.