

## PENENTUAN LOKASI OPTIMAL INTERKONEKSI *DISTRIBUTED GENERATION* PADA PENYULANG KBL09 MENGGUNAKAN ALGORITMA *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Satrio Nugroho<sup>1</sup>, Winarso<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Purwokerto  
Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

---

### Informasi Makalah

Dikirim, 18 Juli 2025  
Direvisi, 31 Agustus 2025  
Diterima, 18 Oktober 2025

---

### Kata Kunci:

Rugi-rugi Daya  
Optimasi  
*Distributed Generation*  
*Particle Swarm Optimization*  
*Backward Forward Sweep*

---

### Keyword:

Power Losses  
Optimization  
*Distributed Generation*  
*Particle Swarm Optimization*  
*Backward Forward Sweep*

---

### INTISARI

Sistem distribusi tenaga listrik kerap menghadapi tantangan berupa tingginya rugi daya dan penurunan profil tegangan, yang berdampak negatif terhadap kualitas dan keandalan pasokan energi. Integrasi *Distributed Generation* (DG) berbasis energi terbarukan menjadi salah satu solusi potensial untuk mengatasi permasalahan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal dari interkoneksi DG pada Penyulang KBL09, dengan sasaran utama meminimalkan rugi daya aktif serta meningkatkan profil tegangan sistem. Metode optimasi yang digunakan adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO), sedangkan analisis aliran daya dilakukan melalui pendekatan *Backward Forward Sweep* (BFS). Hasil simulasi menunjukkan bahwa interkoneksi DG memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi sistem distribusi. Rugi daya aktif pada kondisi eksisting sebesar 44,041 kW berhasil ditekan menjadi 10,068 kW pada skenario 1 DG, dengan efisiensi sebesar 77,14%. Penambahan jumlah unit DG hingga enam unit lebih lanjut menurunkan rugi daya menjadi 8,209 kW, menghasilkan efisiensi sebesar 81,36%. Selain itu, profil tegangan sistem juga mengalami peningkatan. Tegangan minimum yang semula sebesar 0,97679 pu meningkat menjadi 0,98680 pu pada skenario 1 DG, dan mencapai 0,98787 pu pada skenario 6 DG.

---

### ABSTRACT

The electric power distribution system often faces challenges such as high power losses and voltage profile degradation, which negatively affect the quality and reliability of energy supply. The integration of renewable energy-based Distributed Generation (DG) presents a promising solution to address these issues. This study aims to determine the optimal location and capacity of DG interconnection on the KBL09 Feeder, with the primary objective of minimizing active power losses and improving the system's voltage profile. The optimization method employed is Particle Swarm Optimization (PSO), while power flow analysis is conducted using the Backward Forward Sweep (BFS) approach. Simulation results indicate that DG interconnection has a significant impact on the efficiency of the distribution system. Active power losses in the existing condition, initially measured at 44.041 kW, are reduced to 10.068 kW in the 1-DG scenario, yielding an efficiency improvement of 77.14%. Further addition of DG units up to six reduces losses to 8.209 kW, achieving an efficiency of 81.36%. In addition, the system's voltage profile also improves, with the minimum voltage increasing from 0.97679 pu to 0.98680 pu in the 1-DG scenario, and reaching 0.98787 pu in the 6-DG scenario.

---

### Korespondensi Penulis:

Satrio Nugroho  
Program Studi Teknik Elektro  
Universitas Muhammadiyah Purwokerto  
Jl. Raya Dukuwaluh Purwokerto, 53182  
Email: satrionugroho580@gmail.com

## 1. INTRODUCTION

Ketersediaan energi listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan merupakan fondasi utama bagi pertumbuhan ekonomi, kemajuan industri, serta kesejahteraan masyarakat modern [1]. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan laju industrialisasi, permintaan energi listrik diperkirakan akan terus mengalami peningkatan yang signifikan, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia. Pada tahun 2023, total penjualan listrik di Indonesia mencapai 288,4 TWh, meningkat sebesar 5,4% dibandingkan tahun sebelumnya yang tercatat sebesar 273,8 TWh [2]. Ketergantungan yang tinggi terhadap sistem distribusi listrik yang terpusat menyebabkan berbagai tantangan operasional, di antaranya tingginya rugi daya, penurunan profil tegangan, serta penurunan efisiensi jaringan secara keseluruhan [3][4].

Rugi daya dalam sistem distribusi merupakan salah satu persoalan krusial yang secara langsung berdampak terhadap efisiensi energi dan biaya operasional penyedia listrik. Secara umum, rugi daya dibagi menjadi rugi daya teknis yang disebabkan oleh impedansi komponen jaringan seperti konduktor, transformator, dan perangkat lainnya [5], serta rugi daya non-teknis yang disebabkan oleh pencurian listrik, kesalahan pengukuran, dan ketidaktepatan administrasi [6]. Berdasarkan Statistik PLN 2023, total susut jaringan listrik di Indonesia turun menjadi 8,57% pada tahun 2023, yang terdiri atas rugi transmisi sebesar 2,01% dan rugi distribusi 6,71% [7]. Meskipun mengalami perbaikan dari angka 8,72% pada 2022 [8], nilai rugi distribusi ini masih relatif tinggi dan mendorong perlunya strategi mitigasi seperti optimisasi infrastruktur dan penggunaan teknologi cerdas [9].

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, PT. PLN (Persero) dalam dokumen RUPTL 2021–2030 menekankan pentingnya peningkatan keandalan dan efisiensi jaringan melalui strategi penurunan rugi daya dan integrasi pembangkit energi terbarukan berskala kecil dalam bentuk *Distributed Generation* (DG) [10]. DG yang biasanya berupa pembangkit listrik tenaga surya, angin, biomassa, dan minihidro, menawarkan keunggulan dalam mengurangi rugi daya dengan menempatkan sumber energi lebih dekat ke titik beban, mengurangi panjang jalur transmisi, serta meningkatkan tegangan lokal [11].

Integrasi DG terbukti meningkatkan efisiensi sistem distribusi dan memperkuat ketahanan energi lokal [12]. Namun demikian, keberhasilan integrasi DG sangat tergantung pada pemilihan lokasi dan kapasitas yang optimal. Penempatan yang tidak tepat justru dapat menimbulkan aliran daya balik, ketidakseimbangan beban, dan peningkatan rugi daya [13]. Oleh karena itu, diperlukan metode optimisasi yang efisien dan adaptif dalam navigasi kompleksitas parameter teknis dan geografis sistem distribusi.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam optimisasi sistem tenaga adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO merupakan algoritma populasi yang terinspirasi oleh perilaku sosial kawanan burung, yang mampu mengeksplorasi ruang pencarian solusi secara efisien dan konvergen [14]. Dalam konteks penentuan lokasi dan kapasitas DG, PSO terbukti unggul dalam mengatasi permasalahan nonlinier dan multiobjektif dibanding metode konvensional [15]. Beberapa studi mutakhir juga menunjukkan keberhasilan PSO dalam mengurangi total rugi daya, memperbaiki profil tegangan, dan meningkatkan indeks keandalan sistem distribusi [16].

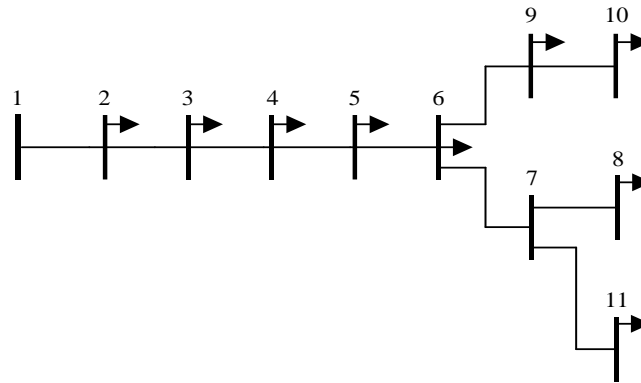
Studi ini berfokus pada optimisasi penempatan dan kapasitas DG pada penyulang KBL09 milik PT. PLN ULP Purwokerto Kota, yang memiliki potensi pengembangan PLTM berbasis aliran Sungai Logawa. Dengan menerapkan PSO, diharapkan diperoleh konfigurasi DG yang optimal dalam konteks topologi jaringan riil, sehingga dapat meminimalkan rugi daya dan mendukung target transisi energi nasional menuju *net zero emission* tahun 2060 [10][17].

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang dikombinasikan dengan metode aliran daya *Backward Forward Sweep* (BFS) untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal *Distributed Generation* (DG) pada sistem distribusi radial, dengan studi kasus Penyulang KBL09. Tujuan utama dari optimisasi ini adalah meminimalkan rugi daya aktif serta meningkatkan profil tegangan pada setiap bus jaringan distribusi Penyulang KBL09, dengan mempertimbangkan batasan teknis operasional sistem.

### 2.1. Model Jaringan

Studi ini menggunakan data jaringan Penyulang KBL09 yang merupakan bagian dari sistem distribusi Jaringan Tegangan Menengah (JTM) di wilayah Purwokerto Kota, yang disuplai oleh Trafo IV Gardu Induk Kalibakal. Sistem ini memiliki daya dasar sebesar 60 MVA dan tegangan dasar 20 kV. Topologi jaringan digambarkan melalui *single line diagram* pada Gambar 1 dan dimodelkan untuk dianalisis secara numerik.



Gambar 1. Single Line Diagram Penyulang KBL09

Jaringan memiliki panjang total 16,9 km dan menggunakan penghantar AAAC 3×240 mm<sup>2</sup> dengan kapasitas arus maksimum 585 A. Nilai impedansi penghantar sebesar 0,1344 + j0,3158 Ω/km [12]. Informasi rinci mengenai panjang saluran, impedansi, dan pembebanan tiap bus disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Beban dan Saluran Cabang Penyulang KBL09

Cabang	Dari Bus	Ke Bus	Panjang (km)	Resistansi (Ω)	Reaktansi (Ω)	Beban di Bus Tujuan (kW)	Beban di Bus Tujuan (kVAR)
1	1	2	1,7	0,2285	0,5369	72,95	35,33
2	2	3	2,7	0,3629	0,8527	93,53	45,30
3	3	4	1,1	0,1478	0,3474	436,48	211,40
4	4	5	2,4	0,3226	0,7579	914,42	442,87
5	5	6	0,45	0,0605	0,1421	187,06	90,60
6	6	7	0,9	0,1210	0,2842	0,00	0,00
7	7	8	1,7	0,2285	0,5369	540,30	261,68
8	6	9	0,85	0,1142	0,2684	290,88	140,88
9	9	10	3,6	0,4838	1,1369	623,54	301,99
10	7	11	1,5	0,2016	0,4737	540,30	261,68

## 2.2. Formulasi Optimasi

### 2.2.1. Fungsi Objektif

Fungsi objektif dalam penelitian ini adalah untuk meminimalkan total rugi daya aktif pada sistem distribusi. Secara matematis, fungsi tujuan dapat dinyatakan dalam persamaan (1).

$$\text{Min } P_{Loss} = \sum_{k=1}^{N_{sc}} I_k^2 \cdot R_k \quad (1)$$

dimana  $P_{Loss}$  adalah total rugi daya aktif pada sistem,  $I_k$  adalah arus pada cabang ke- $k$ ,  $R_k$  adalah Resistansi pada cabang ke- $k$ , dan  $N_{sc}$  adalah jumlah total cabang dalam jaringan. Fungsi tujuan ini diimplementasikan dengan mempertimbangkan optimalisasi lokasi penempatan DG, untuk memastikan bahwa kehilangan daya aktif diminimalkan secara signifikan.

### 2.2.2. Batasan Sistem

Dalam proses optimasi untuk mencapai fungsi tujuan, terdapat beberapa batasan sistem yang harus dipenuhi agar solusi yang dihasilkan tetap layak secara teknis dan sesuai dengan kondisi operasional sistem distribusi. Batasan tersebut meliputi:

#### a. Batasan Tegangan

$$0,90 \text{ pu} \leq V_i \leq 1,05 \text{ pu} \quad (2)$$

Tegangan pada bus  $i$  harus berada dalam batas minimum dan maksimum yang telah ditentukan, yaitu tidak kurang dari 10% dan tidak lebih dari 5% dari tegangan nominal [18].

#### b. Batasan Arus

$$I_i < I_{max} \quad (3)$$

Arus pada saluran cabang tidak boleh melebihi kuat hantar arus, yaitu 585 A [19].

#### c. Batasan Kapasitas DG

$$10 \text{ kW} \leq P_{DG} \leq 10 \text{ MW} \quad (4)$$

Minimum kapasitas DG tiap bus adalah 10 kW sedangkan maksimum kapasitasnya adalah 10 MW.

d. Batasan Lokasi DG

$$2 \leq bus_{DG} \leq 11 \quad (5)$$

DG hanya dapat ditempatkan pada bus tertentu di jaringan distribusi. Dalam penelitian ini, lokasi DG dibatasi hanya pada bus selain bus 1 (*slack bus*), yakni pada bus 2 hingga bus 11. Setiap unit DG harus ditempatkan pada bus yang unik, sehingga tidak ada DG yang terpasang pada bus yang sama.

### 2.3. Analisis Aliran Daya

#### 2.3.1. Representasi Topologi Jaringan

Topologi jaringan distribusi radial direpresentasikan menggunakan *branch-bus incidence matrix*  $C \in R^{B \times N}$  berukuran  $B \times N$ , di mana  $B$  adalah jumlah cabang dan  $N$  adalah jumlah bus. Elemen matriks  $C_{b,i}$  didefinisikan pada persamaan (6).

$$C_{b,i} = \begin{cases} -1, & \text{bus } i \text{ adalah pengirim pada cabang } b \\ +1, & \text{bus } i \text{ adalah penerima pada cabang } b \\ 0, & \text{jika tidak terhubung dengan cabang } b \end{cases} \quad (6)$$

Bus dikategorikan sebagai *end node* jika kolom pada matriks koneksi hanya memiliki satu nilai +1 tanpa nilai -1 [20]. Secara matematis, *end node* ditentukan melalui persamaan (7).

$$\sum_{b=1}^B C_{b,i} = 1 \quad (7)$$

dimana,  $\sum_{b=1}^B C_{b,i} = 1$  merupakan penjumlahan seluruh elemen kolom ke- $i$  dalam matriks koneksi, yaitu jumlah koneksi yang dimiliki oleh bus  $i$ . Jika hasil penjumlahan sama dengan 1, maka bus tersebut merupakan *end node* yang hanya menerima satu sambungan masuk dan tidak mengirim daya lebih lanjut.

#### 2.3.2. Backward Forward Sweep

Pada tahap ini, tegangan pada semua bus diasumsikan sama dengan tegangan pada bus sumber. Jika terdapat lebih dari satu sumber, arus injeksi dari sumber lain dianggap nol. Arus beban  $I_i$  pada bus  $i$  dihitung menggunakan persamaan (8).

$$I_i = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^*, \quad (i = 2, \dots, N) \quad (8)$$

Keterangan:

- $I_i$  : Arus beban pada bus  $i$
- $P_{L_i}$  : Daya aktif pada bus  $i$
- $Q_{L_i}$  : Daya reaktif pada bus  $i$
- $V_i$  : Tegangan pada bus  $i$
- \*
 : Konjugasi kompleks

Setelah arus beban diketahui, arus cabang  $I_{ij}$  antara bus  $i$  dan  $j$  dihitung menggunakan persamaan (9).

$$I_{ij} = I_j + \sum_{m \in A_j} I_{jm}, \quad (j = N, \dots, 2) \quad (9)$$

Keterangan:

- $I_{ij}$  : Arus yang mengalir pada cabang antara bus  $i$  dan bus  $j$
- $I_j$  : Arus pada bus  $j$
- $A_j$  : Himpunan indeks bus-bus yang terhubung dengan bus  $j$
- $I_{jm}$  : Arus pada cabang antara bus  $j$  dan bus  $m$
- $N$  : Jumlah bus, perhitungan dari bus terjauh bergerak hingga mencapai bus 2

Setelah seluruh arus cabang diperoleh dari proses *backward sweep*, tegangan pada setiap bus dihitung melalui persamaan (10) [21].

$$V_j = V_i - I_{ij} \cdot (R_{ij} + X_{ij}) \quad (10)$$

Keterangan:

- $V_j$  : Tegangan pada bus  $j$
- $V_i$  : Tegangan pada bus  $i$
- $R_{ij}$  : Resistansi cabang antara bus  $i$  dan bus  $j$
- $X_{ij}$  : Reaktansi cabang antara bus  $i$  dan bus  $j$
- $I_{ij}$  : Arus yang mengalir dari bus  $i$  menuju bus  $j$

Kriteria konvergensi dievaluasi dengan membandingkan perubahan maksimum tegangan bus antar iterasi. Proses iteratif dihentikan jika perubahan maksimum berada di bawah ambang batas toleransi, yaitu  $\varepsilon = 10^{-4}$ , sebagaimana dituliskan dalam persamaan (11) berikut.

$$\max |V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| < \varepsilon \quad (11)$$

### 2.3.3. Perhitungan Rugi-rugi Daya

Setelah sistem mencapai konvergensi, dilakukan evaluasi rugi-rugi daya pada setiap cabang. Rugi-rugi daya aktif pada cabang  $k$  dihitung menggunakan persamaan (12) berikut.

$$P_{loss}(k) = |I_k|^2 \cdot R_k \quad (12)$$

Keterangan:

$|I_j|^2$  : Besar arus pada cabang ke- $k$

$R_j$  : Resistansi pada cabang ke- $k$

$X_j$  : Reaktansi pada cabang ke- $k$

Total rugi daya aktif dan reaktif pada seluruh jaringan kemudian dihitung sebagai penjumlahan dari semua rugi daya per cabang menggunakan persamaan (13).

$$P_{loss\ total} = \sum_{k=1}^B P_{loss}(k) \quad (13)$$

Keterangan:

$B$  : Jumlah total cabang

$P_{loss}(k)$  : Rugi-rugi daya aktif pada cabang ke- $k$

$Q_{loss}(k)$  : Rugi-rugi daya reaktif pada cabang ke- $k$

### 2.3.4. Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah algoritma metaheuristik berbasis populasi yang diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, yang terinspirasi oleh perilaku sosial seperti kawanan burung atau gerombolan ikan [14]. PSO memanfaatkan populasi partikel, yang disebut kawanan, untuk menjelajahi ruang pencarian berukuran n-dimensi. Setiap partikel dalam kawanan memiliki dua atribut utama, yaitu posisi ( $S$ ) dan kecepatan ( $v$ ). Posisi partikel  $S_i$  menunjukkan lokasi partikel dalam ruang pencarian, sedangkan kecepatan  $v_i$  menggambarkan arah serta langkah perpindahan partikel. Secara matematis, posisi dan kecepatan partikel dalam ruang n-dimensi dapat dinyatakan pada persamaan (14) sebagai berikut.

$$S_i = (S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}), \quad v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (14)$$

Pada setiap iterasi, kecepatan dan posisi partikel diperbarui berdasarkan dua informasi utama, yaitu posisi terbaik individu ( $P_{best}$ ) dan posisi terbaik global ( $G_{best}$ ). Pembaruan kecepatan dan posisi dinyatakan dalam persamaan (15) dan (16).

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(P_{best} - S_i^k) + c_2r_2(G_{best} - S_i^k) \quad (15)$$

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (16)$$

Keterangan:

$V_i^{k+1}$  : Kecepatan partikel  $i$  pada iterasi  $k + 1$

$S_i^{k+1}$  : Posisi partikel  $i$  pada iterasi  $k + 1$

$V_i^k$  : Kecepatan partikel  $i$  pada iterasi sebelumnya

$S_i^k$  : Posisi partikel  $i$  pada iterasi sebelumnya

$w$  : Bobot inersia

$c_1$  dan  $c_2$  : Koefisien pembobot individu dan sosial

$r_1$  dan  $r_2$  : Bilangan acak antara 0 dan 1

Bobot inersia ( $w$ ) sangat berpengaruh terhadap performa PSO. Nilai  $w$  berfungsi sebagai faktor keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi [22]. Nilai  $w$  biasanya dikurangi secara linier selama iterasi untuk mempercepat konvergensi, yang dinyatakan dalam persamaan (17).

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \times \left( \frac{iter}{iter_{max}} \right) \quad (17)$$

dimana  $w_{max}$  adalah nilai maksimum bobot inersia,  $w_{min}$  adalah nilai minimum bobot inersia,  $iter_{max}$  adalah jumlah maksimum iterasi, dan  $iter$  merupakan iterasi saat ini.

Ukuran populasi ditentukan secara adaptif berdasarkan kompleksitas ruang pencarian. Untuk skenario 1-5 DG, digunakan ukuran populasi sebesar 50 partikel. Sedangkan untuk skenario dengan 6 DG, populasi diperbesar menjadi 150 untuk mengatasi kompleksitas kombinatorial yang meningkat. Adapun parameter-parameter PSO yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum dalam Tabel 2.

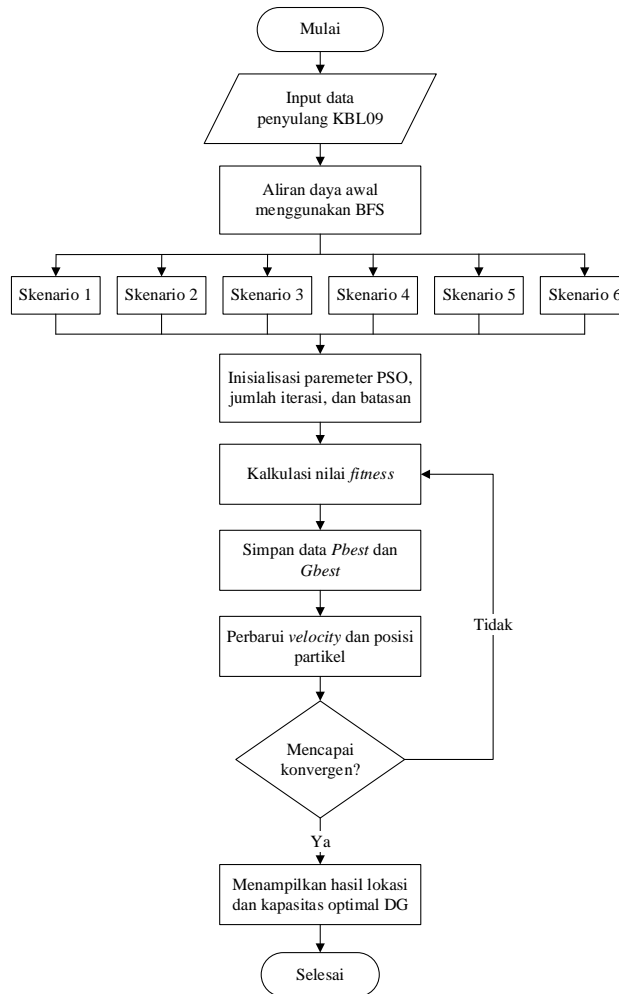
Tabel 2. Parameter PSO

Parameter	Nilai
Jumlah populasi	50 - 150
Jumlah iterasi maksimal	400
Bobot inersia minimum ( $w_{min}$ )	0,3
Bobot inersia maksimum ( $w_{max}$ )	0,9
Koefisien individu ( $c_1$ )	0,9
Koefisien sosial ( $c_2$ )	0,3
Toleransi konvergen	$10^{-4}$

#### 2.4. Kerangka Optimasi

Diagram alir pada Gambar 3. mengilustrasikan proses optimasi lokasi dan kapasitas *Distributed Generation* (DG) pada Penyulang KBL09. Proses ini dilakukan melalui kombinasi algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan metode *Backward Forward Sweep* (BFS) untuk perhitungan aliran daya, yang terdiri dari tahapan-tahapan berikut:

- Langkah 1:** Tahap awal mencakup pengumpulan dan pemrosesan data teknis penyulang KBL09. Data yang dimasukkan meliputi struktur topologi jaringan, impedansi tiap saluran, data beban pada masing-masing bus, serta batasan tegangan dan arus. Data ini menjadi dasar dalam simulasi aliran daya serta pembentukan ruang solusi bagi algoritma optimasi.
- Langkah 2:** Aliran daya awal dihitung menggunakan metode *Backward Forward Sweep* tanpa kehadiran DG, untuk memperoleh kondisi *baseline* sistem distribusi. Hasil dari tahap ini memberikan informasi awal mengenai distribusi tegangan pada tiap bus dan rugi daya aktif total yang terjadi di sistem eksisting.
- Langkah 3:** Enam skenario berbeda dikembangkan untuk mengevaluasi dampak variasi jumlah dan lokasi DG. Setiap skenario dirancang untuk menguji konfigurasi tertentu, misalnya dengan 1 hingga 6 unit DG yang ditempatkan pada lokasi kandidat tertentu dalam sistem distribusi. Skenario ini membentuk dasar uji kinerja algoritma dalam berbagai kondisi sistem.
- Langkah 4:** Parameter algoritma PSO diinisialisasi, termasuk jumlah partikel dalam populasi, jumlah iterasi maksimum, konstanta percepatan, serta nilai batasan atas dan bawah untuk kapasitas DG dan lokasi penempatan. Representasi partikel dikodekan sebagai vektor yang menyimpan kombinasi lokasi dan kapasitas DG.
- Langkah 5:** Setiap partikel dalam populasi diukur kualitasnya melalui fungsi objektif yang menghitung total rugi daya aktif berdasarkan hasil aliran daya menggunakan metode BFS. Semakin kecil nilai rugi daya yang dihasilkan, semakin baik nilai *fitness* partikel tersebut. Fungsi objektif ini menjadi pemandu pergerakan *swarm* menuju solusi optimal.
- Langkah 6:** Hasil evaluasi *fitness* digunakan untuk memperbarui solusi terbaik individu (*Pbest*) dan solusi terbaik global (*Gbest*). Nilai *Pbest* disimpan oleh masing-masing partikel untuk perbandingan di iterasi berikutnya, sementara *Gbest* digunakan sebagai referensi utama dalam pembaruan seluruh populasi.
- Langkah 7:** Kecepatan dan posisi masing-masing partikel diperbarui menggunakan rumus standar PSO, dengan mempertimbangkan nilai *pbest*, *gbest*, dan parameter acak yang mencerminkan kecenderungan eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi. Proses ini memungkinkan *swarm* untuk bergerak menuju konfigurasi solusi yang lebih optimal secara iteratif.
- Langkah 8:** Setiap iterasi diakhiri dengan pengecekan terhadap kondisi konvergensi. Algoritma dinyatakan konvergen jika telah mencapai jumlah iterasi maksimum atau jika perubahan nilai *fitness* dari *gbest* dalam beberapa iterasi terakhir berada di bawah ambang batas nilai toleransi, yang menandakan kestabilan solusi.
- Langkah 9:** Setelah konvergensi tercapai, solusi akhir yang terdiri dari lokasi bus dan kapasitas optimal dari DG ditampilkan sebagai hasil utama.



Gambar 2. Diagram Alir Tahapan Optimasi

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengimplementasikan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal *Distributed Generation* (DG) pada sistem distribusi radial Penyulang KBL09 yang terdiri dari 11 bus. Bus 1 berfungsi sebagai *slack bus*, sedangkan bus 2 hingga bus 11 merupakan kandidat lokasi penempatan DG. Rentang kapasitas DG yang digunakan berkisar antara 10 kW hingga 10 MW. Evaluasi dilakukan pada dua kondisi utama, yaitu kondisi eksisting tanpa DG dan kondisi setelah optimasi.

#### 3.1. Konfigurasi DG Optimal

Hasil optimasi lokasi dan kapasitas DG untuk enam skenario berbeda (1 hingga 6 DG) ditampilkan pada Tabel 3. Setiap skenario dianalisis menggunakan kombinasi algoritma PSO dan metode aliran daya *Backward Forward Sweep* (BFS).

Tabel 3. Konfigurasi Optimal DG pada Penyulang KBL09

Skenario	Lokasi DG (Bus)	Kapasitas DG (MW)
1 DG	6	3,406
2 DG	6 10	2,726 0,679
3 DG	5 8 10	1,901 0,833 0,741
4 DG	5 8 10 11	1,601 0,579 0,710 0,584
5 DG	4 5 8 10 11	0,541 1,226 0,579 0,710 0,584
6 DG	4 5 8 9 10 11	0,541 1,021 0,553 0,346 0,624 0,555

Dari Tabel 3, terlihat bahwa peningkatan jumlah unit DG menyebabkan penurunan kapasitas individu tiap unit. Pada Skenario 1, kapasitas DG terkonsentrasi sebesar 3,406 MW di satu titik (bus 6). Namun, pada Skenario 6, kapasitas terdistribusi secara merata di enam bus, berkisar antara 0,346 MW hingga 1,226 MW. Pola ini menunjukkan kemampuan adaptif PSO dalam mengalihkan konfigurasi dari terkonsentrasi ke konfigurasi desentralisasi yang lebih efisien.

### 3.2. Pengurangan Rugi-rugi Daya

Evaluasi dilakukan terhadap rugi daya aktif sebelum dan sesudah penempatan DG. Rugi daya aktif untuk masing-masing skenario ditampilkan pada Tabel 4 dan divisualisasikan pada Gambar 3.

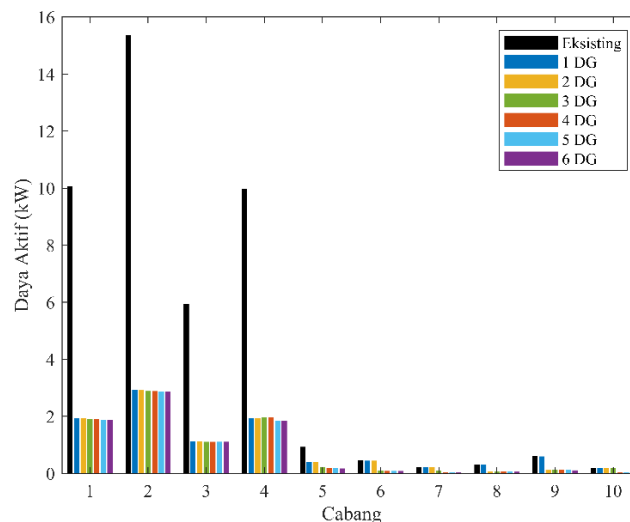
Tabel 4. Perbandingan Rugi Daya Aktif Antar Skenario

Skenario	Rugi daya aktif (kW)	Efisiensi (%)
Eksisting	44,041	0,00
1 DG	10,068	77,14
2 DG	9,345	78,78
3 DG	8,686	80,28
4 DG	8,417	80,89
5 DG	8,247	81,27
6 DG	8,209	81,36

Tabel 4. menunjukkan penurunan signifikan rugi daya aktif seiring dengan bertambahnya jumlah unit DG. Skenario 1 mengurangi rugi daya sebesar 77,14%, sedangkan Skenario 6 mencapai efisiensi sebesar 81,36%. Namun, peningkatan efisiensi menjadi lebih kecil pada skenario 4 ke atas, menunjukkan terjadinya fenomena *diminishing return*. Artinya, penambahan unit DG di atas jumlah tertentu hanya memberikan kontribusi efisiensi marginal, menandakan pendekatan sistem mulai mendekati titik jenuh (*saturation point*).

Tabel 5. Distribusi Rugi Daya Aktif pada Setiap Cabang

Cabang	Rugi Daya Aktif Cabang (kW)						
	Eksisting	1 DG	2 DG	3 DG	4 DG	5 DG	6 DG
1	10,057	1,935	1,932	1,907	1,906	1,876	1,876
2	15,359	2,923	2,918	2,888	2,886	2,861	2,861
3	5,940	1,119	1,117	1,109	1,108	1,110	1,110
4	9,976	1,944	1,940	1,975	1,973	1,856	1,856
5	0,930	0,405	0,404	0,231	0,188	0,188	0,175
6	0,456	0,447	0,447	0,104	0,087	0,087	0,085
7	0,215	0,211	0,211	0,090	0,041	0,041	0,040
8	0,309	0,302	0,074	0,066	0,070	0,070	0,058
9	0,608	0,596	0,117	0,130	0,122	0,122	0,113
10	0,190	0,186	0,186	0,186	0,036	0,036	0,035



Gambar 3. Grafik Distribusi Rugi Daya Aktif pada Setiap Cabang

Distribusi rugi daya aktif pada setiap cabang sebagaimana disajikan pada Tabel 5. dan divisualisasikan melalui Gambar 3. menunjukkan bahwa cabang 1 dan 2 merupakan penyumbang rugi daya terbesar pada kondisi eksisting, masing-masing sebesar 10,057 kW dan 15,359 kW, seiring besarnya arus yang ditransmisikan dari slack bus menuju downstream. Setelah integrasi DG, terjadi penurunan signifikan pada rugi daya cabang-cabang tersebut, terutama hingga skenario 3 DG, dengan penurunan rugi daya pada cabang 2 menjadi 2,888 kW (penurunan >80%). Penempatan DG di bus-bus tengah dan ujung seperti bus 6, 10, dan

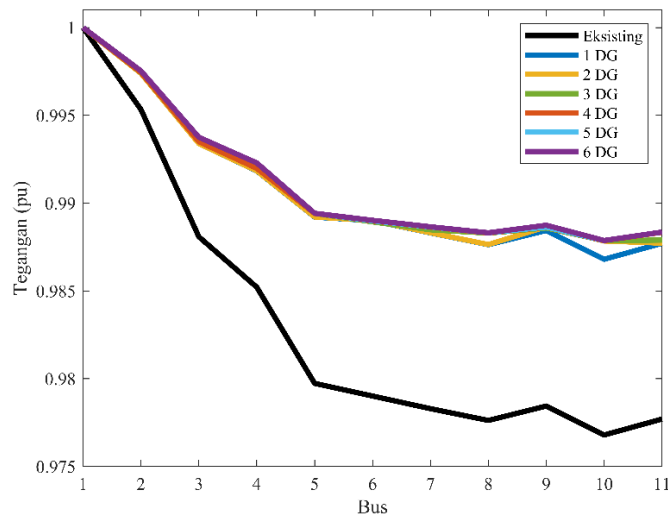
11 juga secara efektif menurunkan rugi daya lokal pada cabang-cabang kecil seperti cabang 6 dan 7, masing-masing dari 0,456 kW dan 0,215 kW menjadi 0,085 kW dan 0,040 kW pada skenario 6 DG. Namun, penambahan unit DG setelah skenario 4 menghasilkan penurunan rugi daya yang semakin marginal, menunjukkan terjadinya fenomena *diminishing return* tidak hanya pada total sistem, tetapi juga pada level per cabang. Penambahan DG lebih dari 4 unit hanya memberi perbaikan marginal pada cabang-cabang kritis, merefleksikan pendekatan titik jenuh optimasi.

**3.3. Peningkatan Profil Tegangan**

Peningkatan profil tegangan sistem setelah penempatan DG dianalisis berdasarkan nilai tegangan (pu) pada masing-masing bus. Profil tegangan seluruh skenario disajikan secara numerik pada Tabel 6 dan divisualisasikan melalui Gambar 4.

Tabel 6. Profil Tegangan pada Tiap Bus untuk Setiap Skenario

Bus	Profil Tegangan (pu)						
	Eksisting	1 DG	2 DG	3 DG	4 DG	5 DG	6 DG
1	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
2	0,99533	0,99739	0,99739	0,99743	0,99744	0,99753	0,99753
3	0,98808	0,99339	0,99339	0,99350	0,99350	0,99375	0,99375
4	0,98521	0,99183	0,99184	0,99198	0,99198	0,99229	0,99229
5	0,97973	0,98920	0,98921	0,98941	0,98941	0,98942	0,98942
6	0,97901	0,98900	0,98901	0,98893	0,98898	0,98899	0,98902
7	0,97829	0,98830	0,98831	0,98848	0,98863	0,98864	0,98865
8	0,97762	0,98763	0,98764	0,98829	0,98830	0,98831	0,98831
9	0,97844	0,98844	0,98865	0,98858	0,98862	0,98863	0,98874
10	0,97679	0,98680	0,98784	0,98786	0,98786	0,98787	0,98787
11	0,97770	0,98771	0,98772	0,98789	0,98834	0,98835	0,98835



Gambar 4. Grafik Profil Tegangan pada Tiap Bus untuk Setiap Skenario

Berdasarkan Gambar 4, sistem tanpa DG mengalami penurunan tegangan yang signifikan dari bus 1 ke bus 11 (0,97770 pu). Interkoneksi satu unit DG menghasilkan perbaikan tegangan minimum di bus 10 dari 0,97679 pu menjadi 0,98680 pu. Penambahan unit DG hingga tiga unit (Skenario 3) memberikan perbaikan tegangan yang lebih merata. Setelah empat unit DG, peningkatan tegangan minimum menjadi sangat kecil, yaitu sekitar 0,00001 pu per skenario, menunjukkan tercapainya titik jenuh (*voltage improvement saturation*), di mana penambahan DG memberikan manfaat yang semakin marginal terhadap profil tegangan.

**4. KESIMPULAN**

Implementasi algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal *Distributed Generation* (DG) pada Penyulang KBL09 11-bus menghasilkan beberapa temuan yang signifikan. Konfigurasi penempatan DG menunjukkan pergeseran dari skema terpusat dengan 1 DG sebesar 3,406 MW di bus 6 ke arah desentralisasi dengan kapasitas antara 0,346 hingga 1,226 MW yang tersebar di 6 bus. Hasil Optimasi DG secara substansial menurunkan rugi daya aktif hingga 81,36%, dari 44,041 kW menjadi 8,209 kW pada skenario 6 DG, namun menunjukkan fenomena *diminishing return* setelah 3 unit DG, dengan

efisiensi tambahan hanya berkisar antara 0,47% hingga 1,08%, sehingga integrasi lebih dari 4 DG menjadi kurang ekonomis. Profil tegangan jaringan mengalami peningkatan yang signifikan, khususnya pada bus dengan tegangan terendah (bus 10), dengan kenaikan sebesar 1,14%, yaitu dari 0,97679 pu menjadi 0,98787 pu, namun menunjukkan kecenderungan saturasi setelah penambahan 4 DG, dengan kenaikan tegangan marginal hanya sekitar 0,00001 pu per skenario. Temuan ini menunjukkan bahwa PSO merupakan pendekatan yang efektif untuk optimasi DG dalam sistem distribusi radial, meskipun diperlukan pertimbangan lanjut terkait efisiensi marginal dalam pengambilan keputusan instalasi multi-DG.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, "International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022," 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [2] C. Anditya *et al.*, "Handbook of Energy & Economic Statistics in Indonesia 2023," pp. 1–106, 2024, [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/en/publication/handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia-heesi>
- [3] N. A. Musdir, A. Arief, and M. B. Nappu, "Penempatan Distributed Generation Optimal Mempertimbangkan Rekonfigurasi Jaringan," *J. EKSITASI*, vol. 1, no. 2, pp. 29–35, 2022.
- [4] A. Hasibuan, A. Afrizal, M. Jannah, S. Nisworo, F. S. Lukman, and I. M. A. Nrartha, "Optimizing Technical Losses of the PLN Distribution Network with Changes in Operational Patterns in 2023 at PLN ULP Lhokseumawe," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 19, no. 4, pp. 143–151, 2023, doi: 10.17529/jre.v19i4.33838.
- [5] C. E. Moreira Rodrigues *et al.*, "Technical loss calculation in distribution grids using equivalent minimum order networks and an iterative power factor correction procedure," *Energies*, vol. 14, no. 3, 2021, doi: 10.3390/en14030646.
- [6] D. Carr and M. Thomson, "Non-Technical Electricity Losses," *Energies*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062218.
- [7] PT PLN (Persero), "Percepatan Teknologi Digital dan Memperkuat Transformasi Inklusif dan Berkelanjutan - Laporan Tahunan 2023," 2024. [Online]. Available: [https://web.pln.co.id/statics/uploads/2024/10/AR-PLN-2023\\_1610-hi.pdf](https://web.pln.co.id/statics/uploads/2024/10/AR-PLN-2023_1610-hi.pdf)
- [8] PT (PLN) Persero, "Annual Report : Leading The Way To Empower The Nation 2022," 2023.
- [9] M. Priliani and I. N. Jendra, "The Impact of Reduced Non-technical Distribution Losses on GHG Emissions by Implementing Advanced Metering Infrastructure," *J. Energi dan Ketenagalistrikan*, vol. 1, no. 2, pp. 221–232, 2023, doi: 10.33322/juke.v1i2.32.
- [10] PT. PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030," Jakarta, 2021.
- [11] L. I. Dulau, M. Abrudean, and D. Bicã, "Impact of distributed generation upon Reghin - Lăpușna Medium Voltage line," *2014 Int. Symp. Fundam. Electr. Eng. ISFEE 2014*, 2015, doi: 10.1109/ISFEE.2014.7050601.
- [12] G. Kostenko and A. Zaporozhets, "Enhancing of the power system resilience through the application of micro power systems (microgrid) with renewable distributed generation," *Syst. Res. Energy*, vol. 2023, no. 3, pp. 25–38, 2023, doi: 10.15407/srenergy2023.03.025.
- [13] P. Munisekhar, G. Jayakrishna, and N. Visali, "Strategic Integration of DG and ESS by using Hybrid Multi Objective Optimization with Wind Dissemination in Distribution Network," *Int. J. Electr. Electron. Res.*, vol. 10, no. 4, pp. 1199–1205, 2022, doi: 10.37391/ijeer.100469.
- [14] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942–1948 vol.4. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [15] M. R. Alrashidi and M. F. Alhajri, "Optimal planning of multiple distributed generation sources in distribution networks: A new approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 11, pp. 3301–3308, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2011.06.001.
- [16] F. B. Faruque, S. Chowdhury, M. S. Nazim, M. Sowmitra, and A. K. M. A. M. Azad, "Optimized Distributed Generation Planning for Radial Distribution System Using Particle Swarm Optimization Algorithm," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2021-Novem, no. February, 2021, doi: 10.1109/APPEEC50844.2021.9687727.
- [17] A. Bagaskara *et al.*, "Indonesia Energy Transition Outlook 2023: Tracking Progress of Energy Transition in Indonesia: Pursuing Energy Security in the Time of Transition," *Inst. Essent. Serv. Reform*, p. Please cite this report as: IESR (2022). Indonesia, 2023, [Online]. Available: [www.irena.org](http://www.irena.org)
- [18] PT. PLN (Persero), *Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)*. 1987. [Online]. Available: <https://id.scribd.com/doc/108921502/SPLN-72-1987>
- [19] PT. PLN (Persero), *SPLN 64 : Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah*. 1985.
- [20] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco, and R. Napoli, "Convergence of the backward/forward sweep method for the load-flow analysis of radial distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 22, no. 7, pp. 521–530, 2000, doi: 10.1016/s0142-0615(00)00009-0.
- [21] A. D. Rana, J. B. Darji, and M. Pandya, "Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution System," *Int. J. Sci. Res. Dev.*, vol. 2, no. 1, pp. 398–400, 2014.
- [22] Y. Shi and R. Eberhart, "A Modified Particle Swarm Optimizer," *1998 IEEE Int. Conf. Evol. Comput. Proceedings. IEEE World Congr. Comput. Intell. (Cat. No.98TH8360)*, pp. 69–73, 1998, doi: 10.1109/ICEC.1998.699146.