

# Optimasi Penempatan dan Penentuan Kapasitas *Distributed Generator* Menggunakan *Cuckoo Search Algorithm* untuk Mengurangi Rugi Daya

## Optimization of Placement and Sizing of Distributed Generators Using the Cuckoo Search Algorithm to Reduce Power Loss

Yoakim Simamora<sup>1</sup>, Muhammadiyah Aulia Rahman S<sup>1</sup>, Mega Silfia Dewy<sup>1</sup>, Agnes Irene Silitonga<sup>2</sup>, Lisa Melvi Ginting<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan; email [yoakimsimamora@unimed.ac.id](mailto:yoakimsimamora@unimed.ac.id)

<sup>2</sup>Jurusan Manajemen, Fakultas Ekonomi, Universitas Negeri Medan

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan

[Dikirimkan: 15 juli 2025, Direvisi: 29 November 2025, Diterima: 30 November 2025 ]

Corresponding Author: Yoakim Simamora

**INTISARI** — Permasalahan rugi daya dalam sistem distribusi listrik masih menjadi tantangan utama yang berdampak pada efisiensi dan keandalan penyediaan energi. Salah satu pendekatan untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menempatkan *Distributed Generator* (DG) secara optimal dalam jaringan distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi penempatan dan penentuan kapasitas DG dengan menggunakan *Cuckoo Search Algorithm* (CSA), serta membandingkannya dengan beberapa algoritma lain, yaitu BSOA (Black Squirrel Optimization Algorithm), SCA (Sine Cosine Algorithm), TLBO-GWO (Teaching Learning Based Optimization - Grey Wolf Optimizer), dan GWO. Studi dilakukan pada system uji IEEE 33 bus dalam dua skenario dengan kondisi awal sistem distribusi mengalami rugi daya sebesar 202,7 kW. Pada studi kasus 1, CSA menghasilkan rugi daya terendah sebesar 105,31 kW dengan tingkat reduksi 48,05%, sementara BSOA dan TLBO-GWO hanya mampu mengurangi rugi daya hingga 116,67 kW (42,44%) dan 128,46 kW (36,62%). Pada studi kasus 2, CSA kembali menunjukkan kinerja unggul dengan reduksi rugi daya mencapai 56,66%, lebih tinggi dibandingkan SCA (56,33%), BSOA (55,97%), dan GWO (55,82%). Penempatan DG pada lokasi dan kapasitas yang optimal berhasil meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CSA memiliki kemampuan eksplorasi dan konvergensi yang baik dalam menemukan solusi optimal penempatan dan sizing DG. Dengan penerapan CSA, potensi pengurangan rugi daya menjadi lebih besar, sekaligus meningkatkan profil tegangan dan kestabilan sistem distribusi. Temuan ini menunjukkan bahwa CSA merupakan metode yang efektif dan kompetitif dalam optimasi distribusi daya berbasis DG.

**KATA KUNCI** — *Distributed Generator*, *Cuckoo Search Algorithm*, Rugi Daya, Aliran Daya.

**ABSTRACT** — *Power losses in electrical distribution systems remain a major challenge that significantly impacts energy efficiency and system reliability. One promising approach to address this issue is the optimal placement and sizing of Distributed Generators (DGs) within the distribution network. This study aims to optimize DG placement and capacity using the Cuckoo Search Algorithm (CSA) and to compare its performance with several other algorithms, namely the Black Squirrel Optimization Algorithm (BSOA), Sine Cosine Algorithm (SCA), Teaching Learning Based Optimization - Grey Wolf Optimizer (TLBO-GWO), and GWO. The study was conducted on the IEEE 33-bus test system under two scenarios, with the initial condition of the distribution system exhibiting a power loss of 202.7 kW. In First Case Study, CSA achieved the lowest power loss of 105.31 kW, corresponding to a 48.05% reduction. In contrast, BSOA and TLBO-GWO reduced losses to 116.67 kW (42.44%) and 128.46 kW (36.62%) respectively. In Second Case Study, CSA again demonstrated superior performance with a loss reduction of 56.66%, outperforming SCA (56.33%), BSOA (55.97%), and GWO (55.82%). The optimal DG placement and sizing significantly improved overall system efficiency. The results indicate that CSA possesses strong exploration and convergence capabilities in identifying optimal DG configurations. Its application enables greater reduction in power losses while also enhancing voltage profiles and system stability. These findings suggest that CSA is an effective and competitive method for power distribution optimization involving distributed generation.*

**KEYWORD** — *Distributed Generator, Cuckoo Search Algorithm, Losses, Load Flow.*

### I. PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan komponen krusial dalam sistem tenaga yang bertugas menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke pengguna akhir. Seiring dengan meningkatnya permintaan energi dan pertumbuhan beban listrik, efisiensi dan keandalan sistem distribusi menjadi semakin krusial. Salah satu tantangan utama dalam sistem distribusi adalah terjadinya rugi daya yang signifikan, terutama pada jaringan yang panjang dan kompleks. Untuk mengatasi hal ini, teknologi *Distributed Generator* (DG) mulai banyak diterapkan sebagai solusi pembangkitan terdesentralisasi yang dapat ditempatkan lebih dekat ke beban. Namun, penempatan dan penentuan kapasitas DG yang tidak tepat justru dapat menimbulkan permasalahan baru seperti ketidakseimbangan

tegangan atau arus balik daya. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan optimasi yang tepat untuk memastikan integrasi DG dapat memberikan manfaat maksimal bagi sistem distribusi listrik.

Prakash membahas penempatan dan pengukuran optimal Distributed Generation (DG) dalam sistem distribusi menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO). Tujuannya adalah mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan. Metodologi diuji pada sistem distribusi radial IEEE 33-bus dan 69-bus untuk dua tipe DG: Type-1 (hanya menyuplai daya aktif) dan Type-2 (menyuplai daya aktif dan reaktif). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penempatan banyak DG secara simultan menghasilkan pengurangan rugi-rugi daya yang signifikan. Type-2 DG lebih efektif dibandingkan Type-1 dalam mengurangi rugi-rugi daya. Pendekatan PSO terbukti efisien dan mampu meningkatkan kualitas tegangan terutama pada bus terjauh [1].

Selim mengusulkan algoritma Jellyfish Search yang ditingkatkan (LJS) untuk penempatan optimal pembangkit listrik tersebar DG multi-tipe pada sistem distribusi daya. Metode ini mengintegrasikan pendekatan mutasi berbasis pemimpin guna menghindari jebakan solusi lokal dan meningkatkan kualitas pencarian. LJS diterapkan pada sistem IEEE 33-bus, 69-bus, dan 94-bus untuk membandingkan kinerja dengan algoritma optimisasi lainnya. Tujuan optimisasi mencakup minimisasi rugi daya aktif, deviasi tegangan, serta maksimisasi indeks stabilitas tegangan. Hasil menunjukkan bahwa LJS menghasilkan pengurangan rugi daya hingga lebih dari 94% pada sistem IEEE 33-bus dan 98% pada sistem 69-bus. Dengan demikian, pendekatan LJS terbukti efektif dan unggul dalam alokasi DG multi-tipe dibandingkan metode konvensional lainnya [2].

Pesaran mengusulkan metode hibrida Genetic Algorithm dan Particle Swarm Optimization (HGAPSO) untuk penempatan dan penentuan kapasitas DG secara simultan dalam jaringan distribusi tenaga listrik. Metode ini dirancang untuk mengoptimalkan rugi daya aktif, rugi daya reaktif, serta deviasi tegangan, dengan menggunakan pendekatan multiobjektif berbasis pembobotan. Studi kasus dilakukan pada jaringan IEEE 33-bus dan 69-bus, dan hasilnya menunjukkan bahwa algoritma HGAPSO memiliki performa lebih baik dibandingkan metode konvensional seperti GA dan PSO. Selain itu, algoritma ini juga menunjukkan konvergensi yang lebih cepat dan stabilitas hasil yang lebih tinggi. Pendekatan ini mampu mengidentifikasi lokasi, jumlah, dan kapasitas DG secara bersamaan, menghasilkan solusi yang lebih realistis dan aplikatif. Dengan demikian, metode HGAPSO terbukti efektif untuk perencanaan optimal DG dalam sistem distribusi daya modern [3].

Mohana ini mengusulkan algoritma hibrida baru yang disebut HWCAPSO, yang menggabungkan Water Cycle Algorithm (WCA) dan Particle Swarm Optimization (PSO) untuk optimasi penempatan DG dan Soft Open Points (SOP) secara simultan dalam jaringan distribusi radial. HWCAPSO dirancang dalam kerangka hierarkis untuk mengatasi tantangan Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) yang kompleks, dengan menggabungkan kemampuan eksplorasi global WCA dan eksploitasi lokal PSO. Studi kasus pada sistem uji IEEE 33-bus dan 69-bus menunjukkan bahwa algoritma ini mampu mengurangi rugi daya aktif secara signifikan, masing-masing hingga 92,4% dan 92,7%. Selain itu, algoritma ini juga memperbaiki profil tegangan dan mempertahankan struktur radialitas jaringan secara konsisten. Validasi statistik terhadap 30 kali uji independen dengan interval kepercayaan 95% mengonfirmasi keandalan dan stabilitas hasil optimasi. Dengan kemampuan mengatasi masalah multiobjektif dan ketidakpastian operasional, HWCAPSO menjadi pendekatan yang efektif untuk perencanaan dan pengoperasian jaringan distribusi modern [4].

DG telah menjadi solusi strategis dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan sistem distribusi daya. Perencanaan optimal penempatan dan sizing DG sangat krusial karena berbagai tujuan teknis, ekonomis, dan lingkungan sering kali saling bertentangan. Studi ini meninjau secara komprehensif pendekatan multi-objektif untuk penempatan dan sizing DG dengan mempertimbangkan berbagai jenis sumber daya, model distribusi, dan algoritma optimasi. Hasil review menunjukkan bahwa algoritma metaheuristik seperti PSO, NSGA-II, dan MOPSO mendominasi dalam literatur karena kemampuannya menangani kompleksitas non-linear dan banyak variabel. Selain itu, integrasi DG yang tidak tepat dapat menyebabkan aliran daya dua arah yang memicu ketidakstabilan tegangan, peningkatan harmonisa, dan gangguan pada sistem proteksi. Oleh karena itu, model optimasi yang robust sangat dibutuhkan untuk mengatasi tantangan teknis dan memaksimalkan manfaat dari integrasi DG dalam jaringan distribusi radial [5].

Kamel mengusulkan pendekatan hibrida yang menggabungkan teknik analitik dan algoritma optimasi metaheuristik Salp Swarm Algorithm (SSA) untuk penempatan dan penentuan ukuran optimal DG terbaru dalam sistem distribusi radial. Metode ini mempertimbangkan berbagai jenis beban statis konstanta daya, arus, dan impedansi—untuk mengakomodasi variasi permintaan riil di jaringan distribusi. SSA digunakan untuk memilih lokasi DG terbaik, sementara metode analitik digunakan untuk menghitung ukuran kapasitas optimal DG jenis I, II, dan III. Hasil simulasi pada sistem IEEE 33-bus dan 69-bus menunjukkan bahwa metode ini secara signifikan mampu menurunkan rugi daya aktif dan memperbaiki profil tegangan, terutama pada skenario dengan tiga unit DG tipe III. Validasi dilakukan melalui 100 kali pengujian independen, yang menunjukkan stabilitas konvergensi dan performa algoritma yang unggul dibandingkan metode konvensional lainnya. Secara keseluruhan, pendekatan ini terbukti efektif dalam merancang integrasi DG yang optimal dan adaptif terhadap dinamika beban dalam jaringan distribusi [6].

Amiri mengusulkan pendekatan analitik baru untuk penentuan lokasi dan kapasitas optimal DG pada sistem distribusi radial dengan mempertimbangkan indeks gabungan (Combined Index/CI). CI dikembangkan dari gabungan indeks stabilitas tegangan (NVSI) dan indeks pengurangan rugi daya aktif (APLRI) untuk meningkatkan stabilitas tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya. Pemilihan lokasi DG dilakukan berdasarkan nilai tertinggi dari CI, sedangkan penentuan ukuran DG menggunakan algoritma pencarian berdasarkan batasan rugi daya minimum dan rentang tegangan yang diizinkan. Studi kasus pada sistem IEEE 12-bus dan 33-bus menunjukkan peningkatan signifikan dalam profil tegangan serta pengurangan rugi daya dan biaya energi tahunan hingga 78,32% dan 64,37%. Efektivitas metode ini juga divalidasi dengan membandingkan hasilnya terhadap pendekatan lain seperti VSI, IV, dan CPLS. Selain itu, penelitian ini menyoroti pentingnya pemilihan faktor daya optimal DG untuk efisiensi maksimum dan penghematan biaya jaringan distribusi [7].

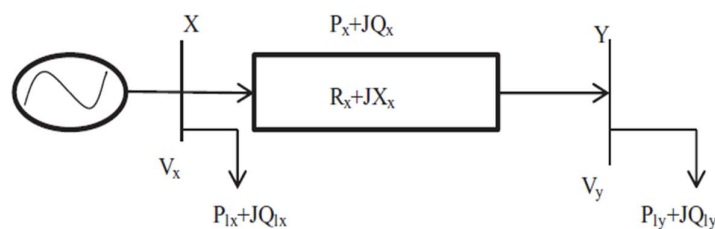
Penelitian ini membahas optimasi penempatan DG pada sistem distribusi tenaga listrik menggunakan metode CSA. Studi ini dilakukan pada sistem distribusi IEEE 33-bus dengan mempertimbangkan tiga skenario studi kasus. Studi kasus pertama merepresentasikan kondisi awal sistem distribusi tanpa integrasi DG sebagai baseline evaluasi. Studi kasus kedua melibatkan penempatan satu unit DG secara optimal, sedangkan studi kasus ketiga melibatkan penempatan dua unit DG dalam sistem. Hasil optimasi yang diperoleh dari implementasi CSA kemudian dibandingkan dengan hasil dari beberapa algoritma metaheuristik lain yang telah digunakan dalam berbagai literatur, yaitu SCA, BSOA, TLBO-GWO, serta GWO murni.

## II. METODE

Bagian ini membahas perumusan fungsi objektif yang digunakan dalam proses optimasi penempatan DG, yang difokuskan pada minimisasi rugi daya aktif dalam sistem distribusi. Fungsi objektif tersebut dikembangkan dengan mempertimbangkan beberapa constraint teknis, seperti batas tegangan pada setiap bus dan batas kapasitas maksimum DG, untuk memastikan hasil optimasi yang layak dan realistis secara operasional. Algoritma Cuckoo Search Algorithm (CSA) digunakan sebagai pendekatan utama dalam menentukan lokasi dan kapasitas DG yang optimal berdasarkan prinsip perilaku parasit burung cuckoo dalam proses pencarian solusi. CSA dipilih karena kemampuannya dalam eksplorasi ruang solusi yang luas serta tingkat konvergensi yang efisien. Selain itu, disertakan formulasi matematis untuk menghitung total rugi daya jaringan sebagai parameter utama dalam menilai kualitas dan efisiensi kinerja sistem distribusi setelah integrasi DG.

### A. PERSAMAAN FUNGSI OBJEKTIF

Metode Forward Backward Sweep [1] [8] digunakan untuk menghitung rugi-rugi daya dan tegangan pada setiap bus dalam sistem distribusi. Metode ini bekerja secara iteratif dengan dua tahap utama, yaitu tahap forward untuk menghitung arus cabang dan tahap backward untuk menghitung tegangan pada masing-masing bus. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya menangani jaringan distribusi radial secara efisien dengan konvergensi yang cepat. Diagram satu garis dari jaringan sampel yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Distribusi Dua Bus

Tegangan pada node 'y' dihitung berdasarkan persamaan (1) [9]

$$V_y = V_x - I_x \cdot (R_x + jX_x) \quad (1)$$

Arus yang mengalir pada saluran dihitung berdasarkan persamaan (2)

$$I_x = \frac{P_{1x} + jQ_{1x}}{V_x} \quad (2)$$

Rugi daya aktif dan reaktif dihitung berdasarkan persamaan (3) dan (4)

$$P_{loss\ x,y} = \frac{P_x^2 + Q_x^2}{V_x} \cdot R_x \quad (3)$$

$$P_{loss\ x,y} = \frac{P_x^2 + Q_x^2}{V_x} \cdot X_x \quad (4)$$

Total rugi daya aktif dan reaktif dari sistem dapat diperoleh dengan menjumlahkan semua rugi daya pada saluran, dan dinyatakan seperti pada Persamaan (5) [10] [11].

$$P_{totalloss} = \sum P_{loss\ x,y} \quad (5)$$

Fungsi objektif dari penelitian adalah mengurangi daya aktif pada jaringan distribusi yang dihitung berdasarkan persamaan (6)

$$F = \min P_{loss} = \sum_{x=1}^{nb} I_x^2 R_x \quad (6)$$

Batasan yang diterapkan dalam menentukan kapasitas dan lokasi DG dinyatakan dalam persamaan (7) dan (8) [12], [13]

$$0 \leq P_{DG} \leq \sum P_{load} \quad (7)$$

$$0 \leq Q_{DG} \leq \sum Q_{load} \quad (8)$$

## B. PENERAPAN ALGORITMA CUCKOO SEARCH DALAM PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS DG

Algoritma Cuckoo Search (CSA) merupakan salah satu metode optimasi metaheuristik yang dikembangkan oleh Yang dan Deb pada tahun 2009. Algoritma ini terinspirasi dari perilaku reproduksi unik burung cuckoo, yang meletakkan telurnya di sarang burung lain. Dalam konteks optimasi, setiap solusi diasosiasikan sebagai telur yang diletakkan dalam sarang tertentu. CSA memanfaatkan prinsip survival of the fittest, di mana solusi terbaik akan tetap bertahan dan berkembang, sementara solusi yang buruk akan digantikan [14]. Salah satu kekuatan utama dari CSA terletak pada penggunaan Levy flight, yaitu mekanisme pencarian global berbasis distribusi acak dengan langkah-langkah besar. Levy flight memungkinkan pencarian solusi yang lebih efisien di ruang solusi yang kompleks dan berdimensi tinggi. Formulasi umum dari pencarian solusi baru menggunakan Levy flight dinyatakan pada persamaan (9).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \cdot \text{Levy}(\lambda) \quad (9)$$

di mana  $x_i^t$  adalah posisi saat ini dari solusi ke- $i$ ,  $\alpha$  adalah skala langkah positif, dan Levy ( $\lambda$ ) merupakan distribusi Levy. Distribusi Levy ini menghasilkan lompatan-lompatan acak yang memfasilitasi eksplorasi global. Proses seleksi dalam CSA dilakukan dengan membandingkan solusi baru dengan solusi lama, dan memilih yang memiliki nilai fitness lebih baik. Kemudian, sebagian sarang akan diganti berdasarkan probabilitas  $p_a$ , untuk meningkatkan keragaman populasi dan menghindari stagnasi. Persamaan untuk penggantian sarang dinyatakan pada persamaan (10).

$$x_i = \begin{cases} x_{\text{new}}, & \text{jika } \text{rand} < p_a \\ x_i, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (10)$$

Gambar 1 menjelaskan diagram alir penelitian yang dilakukan. Penelitian ini dimulai dengan tahap input data sistem, di mana data teknis dari sistem distribusi dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam perangkat lunak analisis. Data ini mencakup informasi topologi jaringan, impedansi saluran, lokasi dan karakteristik beban, serta parameter operasional lainnya. Tahapan ini sangat krusial untuk membentuk representasi model jaringan distribusi yang akurat sebagai dasar simulasi.

Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya awal (base case) menggunakan metode backward forward. Simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan level tegangan, distribusi arus, serta besarnya rugi-rugi daya dalam kondisi sistem sebelum integrasi pembangkit terdistribusi (Distributed Generation/DG). Hasil dari analisis base case ini digunakan sebagai acuan untuk evaluasi perbaikan sistem pada tahap akhir optimasi.

Tahap berikutnya adalah inisialisasi parameter CSA. Parameter yang diinisialisasi antara lain jumlah sarang, parameter probabilitas penemuan telur asing ( $p_a$ ), jumlah iterasi maksimum, batas atas dan batas bawah pencarian, dan parameter levy flight. Setelah parameter algoritma ditentukan, proses dilanjutkan dengan pembangkitan populasi awal, yang terdiri dari sejumlah solusi acak terkait lokasi dan kapasitas DG. Setiap individu dalam populasi merepresentasikan satu solusi potensial yang akan dievaluasi berdasarkan fungsi objektif. Evaluasi solusi dilakukan dengan menghitung nilai fungsi objektif, yang dalam konteks ini dapat berupa minimisasi total rugi daya aktif sistem atau peningkatan profil tegangan. Fungsi objektif dapat dirumuskan secara matematis untuk mengakomodasi satu atau lebih tujuan optimasi, dan dapat dilengkapi dengan faktor penalti jika solusi melanggar batasan teknis.

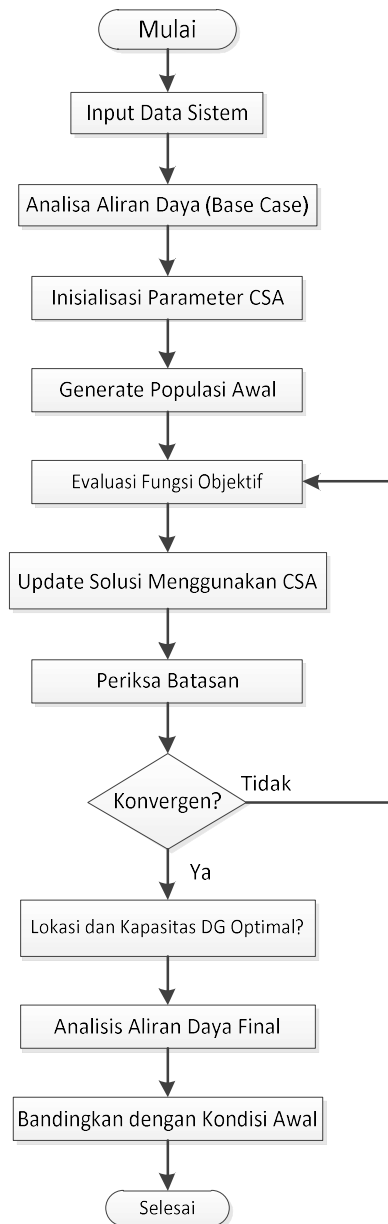
Setelah solusi diperbarui, dilakukan pemeriksaan batasan terhadap parameter sistem seperti batas tegangan (0.95–1.05 pu), kapasitas maksimum DG, dan pembatasan arus saluran. Solusi yang melanggar batasan akan dikenakan penalti atau dikoreksi untuk menjaga kelayakan sistem.

Setelah itu, dilakukan pemeriksaan konvergensi, yang merupakan kondisi penghentian iterasi. Kriteria konvergensi dapat berupa tercapainya jumlah iterasi maksimum, atau perubahan nilai fungsi objektif yang sangat kecil antar iterasi. Jika kondisi konvergensi belum terpenuhi, maka algoritma kembali ke tahap evaluasi fungsi objektif dan memperbarui populasi solusi. Proses iteratif ini terus berlangsung hingga tercapai solusi yang stabil dan optimal.

Jika proses telah konvergen, maka hasil optimasi berupa lokasi dan kapasitas DG optimal dicatat sebagai output utama dari CSA. Selanjutnya, sistem dilakukan analisis aliran daya akhir dengan memasukkan konfigurasi DG hasil optimasi ke dalam model jaringan. Analisis ini bertujuan untuk menilai pengaruh integrasi DG terhadap kinerja sistem.

Hasil analisis akhir kemudian dikomparasi dengan kondisi awal (base case) untuk mengevaluasi seberapa besar peningkatan performa jaringan tercapai. Parameter evaluasi dapat mencakup pengurangan total rugi-rugi daya, peningkatan level tegangan, serta perbaikan faktor daya dan distribusi beban. Perbandingan ini memberikan bukti kuantitatif atas efektivitas metode CSA dalam mengoptimasi penempatan DG.

Dengan pendekatan tersebut, metode CSA terbukti mampu mengeksplorasi ruang solusi yang kompleks secara efisien, serta menghasilkan solusi yang memenuhi batasan operasional sistem. Seluruh tahapan ini dirancang untuk memastikan bahwa proses integrasi DG tidak hanya optimal secara matematis, tetapi juga layak secara teknis dan ekonomis. Oleh karena itu, flowchart yang digunakan dalam penelitian ini mencerminkan langkah-langkah sistematis yang diperlukan untuk mengimplementasikan optimasi berbasis metaheuristik dalam sistem tenaga listrik.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### III. HASIL DAN ANALISIS

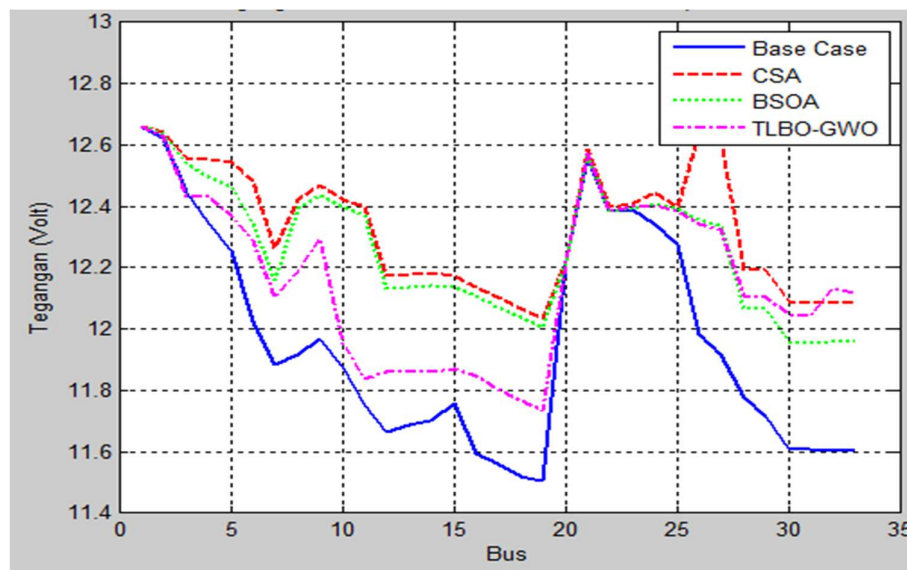
Algoritma CSA diimplementasikan pada sistem distribusi IEEE 33 bus untuk menentukan lokasi dan kapasitas DG yang paling optimal. Tujuan utama dari proses optimasi ini adalah untuk meminimalkan rugi daya pada jaringan distribusi listrik. Kinerja CSA dalam proses optimasi dibandingkan dengan beberapa algoritma metaheuristik lainnya, yaitu SCA, BSOA, GWO, dan TLBO-GWO. Evaluasi perbandingan dilakukan untuk menilai efektivitas masing-masing algoritma dalam menurunkan total rugi daya sistem. Sistem distribusi yang digunakan mengacu pada konfigurasi standar IEEE 33 bus. Data impedansi penghantar antar bus digunakan sebagai input dalam perhitungan aliran daya [15] [16]. Sistem distribusi ini memiliki total beban sebesar 3,715 MW untuk daya aktif dan 2,3 MVAR untuk daya reaktif.

TABEL I  
HASIL SIMULASI PENETUAN LETAK DAN KAPASITAS DG MENGGUNAKAN ALGORITMA CSA

Case	Algoritma	Lokasi	Kapasitas (kW)	Total Kapasitas (kW)	Power Loss (kW)	Reduction (%)
Kondisi Awal	-	-	-	-	202,7	-
Studi Kasus 1	<b>CSA (Metode yang diajukan)</b>	<b>6</b>	<b>2585</b>	<b>2585</b>	<b>105,31</b>	<b>48,05</b>

Case	Algoritma	Lokasi	Kapasitas (kW)	Total Kapasitas (kW)	Power Loss (kW)	Reduction (%)
	BSOA [17]	8	1587,5	1587,5	116,67	42,44
	TLBO – GWO [18]	30	1000	128,46	128,46	36,62
Studi Kasus 2	<b>CSA (Metode yang diajukan)</b>	<b>13 30</b>	<b>825 1025</b>	<b>1850</b>	<b>88,04</b>	<b>56,56</b>
	SCA [19]	13 30	868,283 1136,249	2004,532	88,51	56,33
	BSOA [17]	13 31	880 924	1804	89,24	55,97
	GWO [20]	13 30	903,04 1201,61	2110,65	89,54	55,82

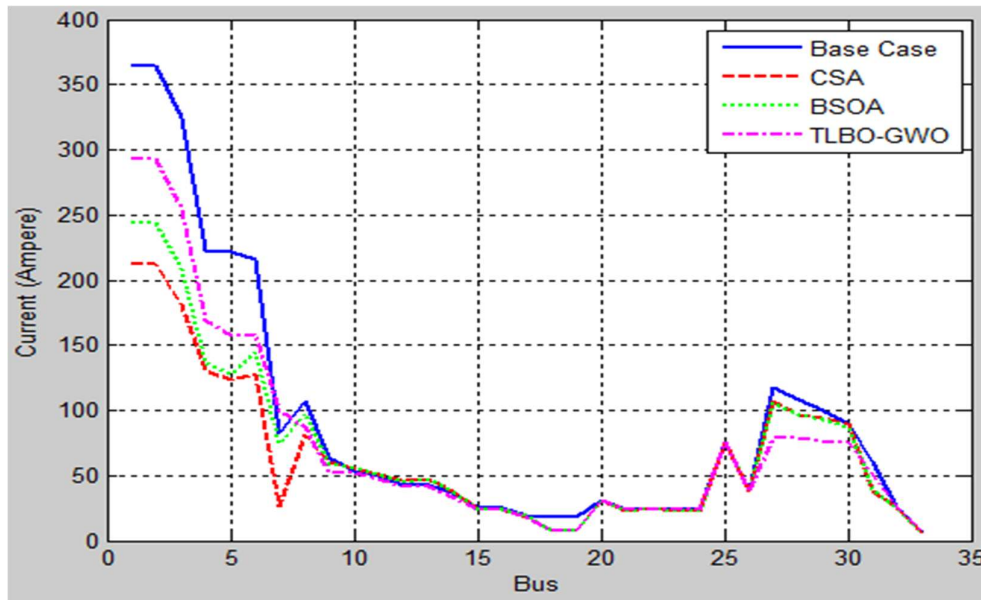
Tabel 1 menjelaskan hasil simulasi penentuan lokasi dan kapasitas DG menunjukkan bahwa algoritma CSA mampu memberikan hasil yang paling efisien dalam mengurangi rugi daya pada sistem distribusi IEEE 33 bus. Pada studi kasus 1 dengan satu unit DG, CSA berhasil menurunkan rugi daya dari kondisi awal sebesar 202,7 kW menjadi 105,31 kW, dengan tingkat reduksi mencapai 48,05%. Hasil ini lebih baik dibandingkan BSOA yang hanya menurunkan rugi daya menjadi 116,67 kW dengan reduksi 42,44%, dan TLBO–GWO sebesar 128,46 kW dengan reduksi 36,62%. Lokasi optimal yang ditentukan CSA untuk studi kasus 1 adalah pada bus 6 dengan kapasitas DG sebesar 2.585 kW. Pada studi kasus 2 yang melibatkan dua unit DG, CSA kembali menunjukkan performa unggul dengan menghasilkan rugi daya sebesar 88,04 kW dan tingkat reduksi tertinggi sebesar 56,56%. Sementara itu, SCA menghasilkan rugi daya sebesar 88,51 kW dengan reduksi 56,33%, dan GWO sebesar 89,54 kW dengan reduksi 55,82%. BSOA dalam studi kasus 2 mencatat rugi daya sebesar 89,24 kW dengan reduksi 55,97%. Lokasi DG yang diusulkan CSA pada studi kasus 2 adalah pada bus 13 dan 30, dengan kapasitas masing-masing sebesar 825 kW dan 1.025 kW. Total kapasitas DG yang digunakan oleh CSA dalam studi kasus 2 sebesar 1.850 kW, lebih kecil dibandingkan kapasitas yang digunakan oleh algoritma lain seperti GWO sebesar 2.110,65 kW. SCA dan GWO menempatkan DG dengan kapasitas yang lebih tinggi, namun tidak menunjukkan perbedaan signifikan dalam hasil reduksi rugi daya. Algoritma BSOA dalam studi kasus 2 menggunakan tiga lokasi, yaitu bus 13, 30, dan 31, dengan total kapasitas 2.004,46 kW. TLBO–GWO pada studi kasus 1 menggunakan dua unit DG dengan kapasitas total 2.000 kW, namun hasil reduksi rugi dayanya lebih rendah dari CSA. Dalam dua skenario uji, CSA mampu memberikan keseimbangan antara efektivitas reduksi rugi daya dan efisiensi kapasitas DG. Penggunaan kapasitas yang lebih kecil dengan hasil reduksi yang lebih besar menunjukkan keunggulan strategi alokasi daya CSA. Penempatan DG pada bus-bus strategis menghasilkan distribusi daya yang lebih efisien. Hal ini mencerminkan keakuratan proses pencarian solusi optimal dari algoritma CSA. Hasil-hasil ini menunjukkan variasi respons masing-masing algoritma terhadap parameter sistem dan kapasitas DG yang dialokasikan.



Gambar 3. Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Penempatan 1 DG

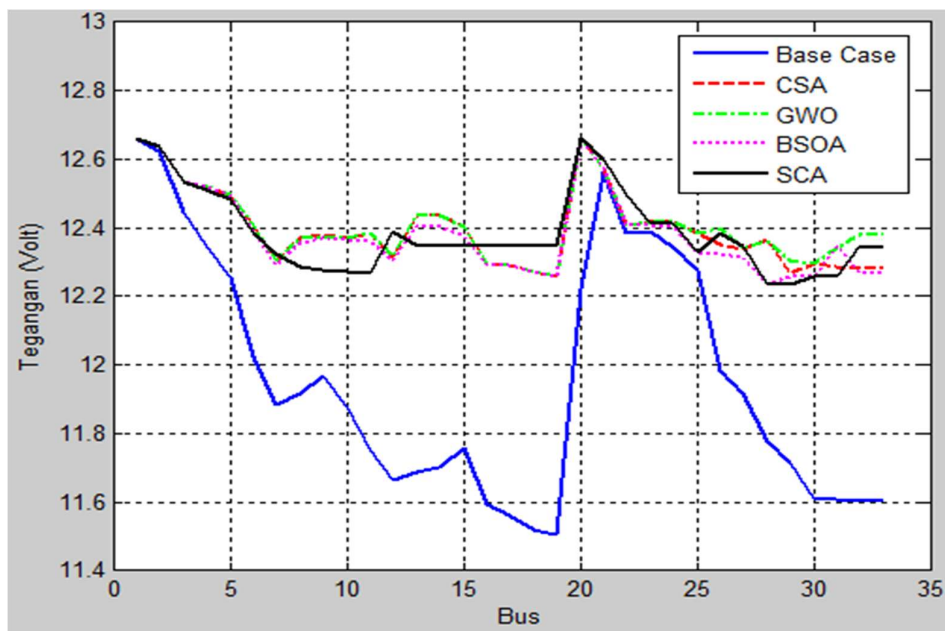
Gambar 3 menunjukkan profil tegangan pada setiap bus dalam sistem distribusi 33-bus sebelum dan sesudah penempatan satu Distributed Generator (DG). Pada kondisi *Base Case* (tanpa DG), tegangan mengalami penurunan drastis terutama setelah bus ke-5, dengan titik terendah berada di sekitar bus 17 hingga bus 20. Tegangan terendah ini menunjukkan lemahnya profil tegangan pada bagian hilir sistem tanpa bantuan DG. Setelah penempatan DG menggunakan algoritma CSA, BSOA, dan TLBO-GWO, terjadi peningkatan tegangan yang signifikan hampir di seluruh bus. Algoritma CSA menunjukkan peningkatan tegangan yang cukup

merata dan stabil di seluruh jaringan. BSOA memiliki pola serupa namun sedikit lebih rendah dibanding CSA, terutama pada bus 25 ke atas. TLBO-GWO menunjukkan peningkatan tegangan paling besar pada bus hulu, namun kurang optimal di bagian hilir. Dengan penempatan DG, variasi tegangan antar bus menjadi lebih kecil, menunjukkan profil sistem yang lebih seimbang. Nilai tegangan minimum pada seluruh bus meningkat dibanding kondisi Base Case, menandakan peningkatan kualitas tegangan. Setiap metode optimasi menghasilkan profil tegangan yang berbeda sesuai strategi penempatan DG yang diterapkan. Penambahan DG juga memperbaiki profil tegangan yang sebelumnya berada di bawah batas aman. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan DG yang tepat sangat penting untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi. Grafik ini menunjukkan bahwa semua metode memberikan perbaikan dibanding kondisi tanpa DG. Namun, efektivitas masing-masing metode bervariasi tergantung pada konfigurasi dan lokasi DG. Analisis ini berguna sebagai dasar untuk memilih strategi penempatan DG yang optimal dalam sistem distribusi tenaga listrik.



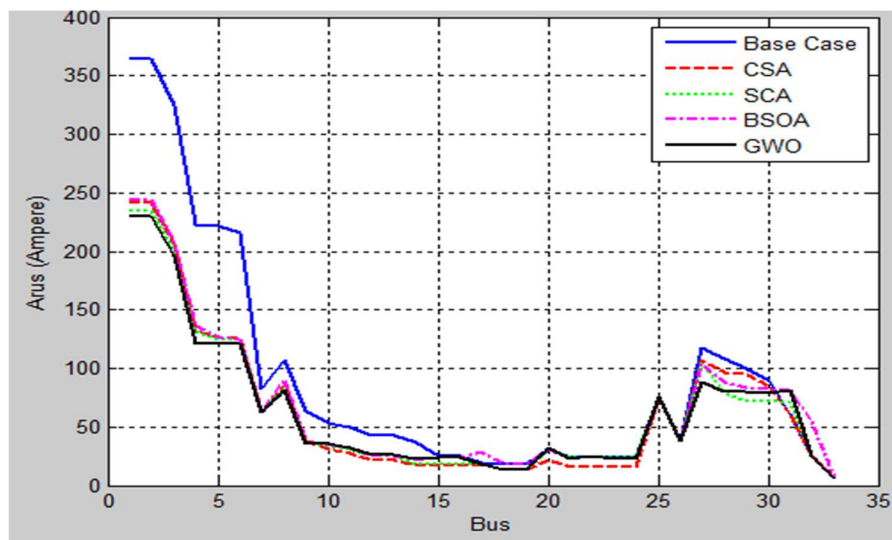
Gambar 4. Perbandingan Arus Sebelum dan Setelah Penempatan 1 DG

Gambar 4 menunjukkan profil arus pada setiap bus sebelum dan sesudah penempatan satu Distributed Generator (DG) pada sistem IEEE 33-bus. Terlihat bahwa pada kondisi Base Case (tanpa DG), arus yang mengalir sangat tinggi terutama di bus awal, seperti bus 1 hingga bus 5. Setelah penempatan DG dengan metode CSA, BSOA, dan TLBO-GWO, arus di sebagian besar bus mengalami penurunan yang signifikan. Metode CSA dan BSOA menunjukkan pengurangan arus yang cukup stabil di sepanjang jaringan. TLBO-GWO tampak memberikan hasil yang lebih optimal pada bus dengan arus besar, terutama di bagian hulu sistem. Pada area bus ke-25 hingga ke-33, arus cenderung meningkat kembali akibat posisi DG yang belum sepenuhnya mengurangi beban di area tersebut. Penurunan arus ini menandakan berkurangnya kerugian daya dan meningkatnya efisiensi sistem distribusi. Setiap metode optimasi memberikan pola penurunan yang berbeda tergantung posisi dan kapasitas DG yang ditempatkan. Grafik ini menjadi bukti visual pentingnya pemilihan metode optimasi dalam penempatan DG untuk mencapai performa terbaik sistem distribusi tenaga listrik.



Gambar 4. Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Penempatan 2 DG

Gambar 4 menunjukkan profil tegangan pada setiap bus sistem distribusi IEEE 33 bus dalam kondisi dasar (Base Case) dan setelah penempatan DG menggunakan beberapa algoritma optimasi. Berdasarkan nilai kurva berwarna biru, tegangan pada kondisi dasar mengalami penurunan signifikan terutama pada bus 18 hingga bus 33, dengan nilai tegangan terendah mendekati 11,5 Volt. Setelah dilakukan penempatan DG menggunakan algoritma CSA, GWO, BSOA, dan SCA, profil tegangan menunjukkan peningkatan yang signifikan di hampir seluruh bus. CSA (garis merah putus-putus) berhasil menjaga kestabilan tegangan lebih baik, terutama pada bus yang sebelumnya mengalami penurunan drastis. GWO (garis hijau titik-putus) menunjukkan hasil yang cukup serupa dengan CSA, dengan penyimpangan tegangan yang lebih kecil. BSOA dan SCA juga menunjukkan perbaikan tegangan namun dengan fluktuasi yang sedikit lebih besar dibandingkan CSA dan GWO. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi DG yang optimal tidak hanya mengurangi rugi daya tetapi juga memperbaiki profil tegangan sistem distribusi. Secara umum, semua algoritma yang diuji mampu meningkatkan kualitas tegangan dibandingkan kondisi dasar tanpa DG.



Gambar 5. Perbandingan Arus Sebelum dan Setelah Penempatan 2 DG

Gambar 5 menunjukkan profil arus pada setiap bus dalam sistem distribusi IEEE 33 bus sebelum dan sesudah penempatan DG menggunakan berbagai algoritma optimasi. Pada kondisi awal (Base Case) yang ditunjukkan oleh garis biru, arus pada beberapa bus, khususnya di awal jaringan (bus 1-5), mencapai nilai yang sangat tinggi, yaitu lebih dari 350 Ampere. Hal ini menandakan beban yang besar tanpa adanya kontribusi pembangkitan terdistribusi. Setelah penempatan DG menggunakan algoritma CSA, SCA, BSOA, dan GWO, terjadi penurunan arus secara signifikan di hampir seluruh bus. CSA (garis merah putus-putus) menunjukkan profil arus yang paling rendah dan stabil di sepanjang jaringan, mengindikasikan efisiensi aliran daya yang lebih baik. GWO dan BSOA juga memberikan perbaikan signifikan, meskipun terdapat fluktuasi kecil pada beberapa titik. SCA menghasilkan pengurangan arus yang cukup baik, tetapi tidak seoptimal CSA dan GWO. Penurunan arus ini berkontribusi pada penurunan rugi daya dan peningkatan efisiensi sistem distribusi.

Cuckoo Search Algorithm (CSA) unggul dalam mengoptimalkan penempatan dan sizing Distributed Generation (DG) pada sistem distribusi karena menggabungkan mekanisme Lévy flight yang memungkinkan eksplorasi ruang solusi secara global dan efisien dengan strategi seleksi elitisme yang mempertahankan solusi terbaik sepanjang iterasi. Kombinasi ini memberikan keseimbangan dinamis antara eksplorasi dan eksploitasi, memungkinkan CSA menghindari jebakan optimum lokal serta menemukan konfigurasi DG yang secara signifikan meminimalkan rugi daya. Selain itu, CSA memiliki jumlah parameter yang sedikit dan lebih robust terhadap tuning, menjadikannya efektif dalam menangani masalah optimasi nonlinier dan nonkonveks seperti pada sistem IEEE 33-bus. Hal ini tercermin dari hasil penelitian di mana CSA secara konsisten mencapai reduksi rugi daya tertinggi (48,05% dan 56,66%) dibandingkan algoritma pembanding, sekaligus meningkatkan profil tegangan dan efisiensi sistem secara keseluruhan.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengoptimalkan penempatan dan kapasitas Distributed Generator (DG) pada sistem distribusi IEEE 33-bus menggunakan Cuckoo Search Algorithm (CSA), yang menunjukkan kinerja unggul dibandingkan algoritma pembanding seperti BSOA, TLBO-GWO, SCA, dan GWO. Dalam Studi Kasus 1, CSA mampu menurunkan rugi daya dari 202,7 kW menjadi 105,31 kW, mencapai reduksi sebesar 48,05% dengan penempatan DG di bus 6 berkapasitas 2585 kW. Pada Studi Kasus 2, CSA kembali menunjukkan performa terbaik dengan reduksi rugi daya mencapai 56,66% (dari 202,7 kW menjadi 88,04 kW) melalui penempatan DG di bus 13 dengan total kapasitas 1850 kW hasil ini lebih tinggi dibandingkan SCA (56,33%), BSOA (55,97%), dan GWO (55,82%). Temuan ini membuktikan bahwa CSA memiliki kemampuan eksplorasi dan konvergensi yang superior dalam menyelesaikan masalah optimasi nonlinier dan multi kendala pada jaringan distribusi radial. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan sebagai validasi empiris terhadap efektivitas CSA dalam optimalisasi integrasi DG, sekaligus memperkaya literatur perbandingan algoritma metaheuristik untuk aplikasi teknik tenaga. Secara teknis, CSA direkomendasikan sebagai metode handal dalam perencanaan jaringan distribusi modern yang mengintegrasikan sumber energi terdistribusi, karena kemampuannya menghasilkan solusi yang tidak hanya meminimalkan rugi daya, tetapi juga meningkatkan profil tegangan dan keandalan sistem. Sebagai arah pengembangan ke depan, penelitian lanjutan direncanakan untuk memperluas pendekatan ini ke dalam kerangka multiobjektif (misalnya meminimalkan rugi daya sekaligus meminimalkan biaya investasi DG dan memaksimalkan indeks keandalan), mengintegrasikan unsur ketidakpastian seperti variasi beban dan fluktuasi pembangkit terbarukan (PV/wind), serta menguji algoritma pada sistem distribusi yang lebih besar dan kompleks (misalnya IEEE 69 bus atau jaringan nyata).

#### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis dengan ini menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

#### REFERENSI

- [1] D. B. Prakash and C. Lakshminarayana, "Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm," *Procedia Technology*, vol. 25, no. Raerest, pp. 785–792, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.173.
- [2] A. Selim, M. H. Hassan, S. Kamel, and A. G. Hussien, "Allocation of distributed generator in power networks through an enhanced jellyfish search algorithm," *Energy Reports*, vol. 10, no. July, pp. 4761–4780, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.11.032.
- [3] M. Pesaran H.A., M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, and H. Seyedi, "A hybrid genetic particle swarm optimization for distributed generation allocation in power distribution networks," *Energy*, vol. 209, p. 118218, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118218.
- [4] M. Alanazi, "Optimal Integration of Distributed Generators and Soft Open Points in Radial Distribution Networks: A Hybrid WCA-PSO Approach," *Processes*, vol. 13, no. 6, pp. 1–25, 2025, doi: 10.3390/pr13061775.
- [5] A. Kumar, R. Verma, N. K. Choudhary, and N. Singh, "Optimal placement and sizing of distributed generation in power distribution system: a comprehensive review," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 45, no. 3, pp. 7160–7185, 2023, doi: 10.1080/15567036.2023.2216167.
- [6] A. A. Mohamed, S. Kamel, A. Selim, T. Khurshaid, and S. B. Rhee, "Developing a hybrid approach based on analytical and metaheuristic optimization algorithms for the optimization of renewable dg allocation considering various types of loads," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, 2021, doi: 10.3390/su13084447.
- [7] S. Azad, M. M. Amiri, M. N. Heris, A. Mosallanejad, and M. T. Ameli, "A novel analytical approach for optimal placement and sizing of distributed generations in radial electrical energy distribution systems," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 18, 2021, doi: 10.3390/su131810224.
- [8] T. N. Ton, L. H. Pham, P. M. Le, and T. M. Le, "Multi-Objective Optimization of Electric Distribution Systems with integrated distributed Generation using Deep Reinforcement Learning," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 15, no. 2, pp. 22166–22171, Apr. 2025, doi: 10.48084/etasr.10359.
- [9] M. Mahdavi, S. Z. Djokic, F. Jurado, and A. Awaifo, "A New Loss Minimization Model for Coordinated Network Reconfiguration, Capacitor Placement and DG Allocation under Variable Loading Conditions," in *Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194824.
- [10] T. P. Nguyen, T. A. Nguyen, T. V. H. Phan, and D. N. Vo, "A comprehensive analysis for multi-objective distributed generations and capacitor banks placement in radial distribution networks using hybrid neural network algorithm," *Knowl Based Syst*, vol. 231, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.knosys.2021.107387.
- [11] J. P. Mahato, Y. K. Poudel, R. K. Mandal, and M. R. Chapagain, "Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement of Radial Distribution Network Through the Installation of Capacitor and Distributed Generation (DG)," *Archives of Advanced Engineering Science*, pp. 1–9, Feb. 2024, doi: 10.47852/bonviewaas42022031.
- [12] N. Pamuk and U. E. Uzun, "Optimal Allocation of Distributed Generations and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Arithmetic Optimization Algorithm," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14020831.

- [13] T. Yuvaraj et al., "Optimal integration of capacitor and distributed generation in distribution system considering load variation using bat optimization algorithm," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 12, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123548.
- [14] S. Sharma and S. Ghosh, "Optimal planning and placement of capacitor in distribution system based on Particle Swarm and Hybrid Bee-Cuckoo Search under Varying Load Conditions," *Energy Reports*, vol. 13, pp. 5219–5237, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.egy.2025.04.010.
- [15] A. P. Adeagbo, F. K. Ariyo, K. A. Makinde, S. A. Salimon, O. B. Adewuyi, and O. K. Akinde, "Integration of Solar Photovoltaic Distributed Generators in Distribution Networks Based on Site's Condition," *Solar*, vol. 2, no. 1, pp. 52–63, 2022, doi: 10.3390/solar2010004.
- [16] T. Ngoc Ton, V. Anh Truong, T. Thanh Nguyen, T. Phan Vu, and H. Chi Minh City, "www.etasr.com Ton et al.: Optimal Location and Size of Distributed Generators in an Electric Distribution System ...," 2020. [Online]. Available: www.etasr.com
- [17] A. El-Fergany, "Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 1197–1205, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.09.020.
- [18] S. Arabi Nowdeh et al., "Fuzzy multi-objective placement of renewable energy sources in distribution system with objective of loss reduction and reliability improvement using a novel hybrid method," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 77, pp. 761–779, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.02.003.
- [19] A. Shaheen, A. Elsayed, A. Ginidi, R. El-Sehiemy, and E. Elattar, "Reconfiguration of electrical distribution network-based DG and capacitors allocations using artificial ecosystem optimizer: Practical case study," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 8, pp. 6105–6118, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.11.035.
- [20] A.- Rahman, S. El-Sayed, E. M. Saied, and M. M. Salama, "Optimal Number Size and Location of Distributed Generation Units in Radial Distribution Systems Using Grey Wolf Optimizer," *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, vol. 7, no. 9, pp. 2367–2376, 2017.