



JURNAL INFOTEL
VOL. 17, NO. 2, MEI 2025, HAL. 377–393.



ARTIKEL PENELITIAN

Optimasi Pemadaman Beban Menggunakan Algoritma Hybrid Grey Wolf - Whale untuk Meningkatkan Jaringan Distribusi Terisolasi

Sujono^{1,*}, Akhmad Musafa²

^{1,2}Departemen Teknik Elektro, Universitas Budi Luhur, 12260, Indonesia

*Alamat email korespondensi: sujono@budiluhur.ac.id

Diterima: 10 Maret 2025; Direvisi: 6 Mei 2025; Diterima: 17 Mei 2025.

Abstrak: Integrasi pembangkit listrik terdistribusi memungkinkan jaringan distribusi beroperasi dalam mode on-grid atau off-grid. Dalam mode off-grid, pasokan listrik dari jaringan utama terputus, dan pembangkit listrik terdistribusi menjadi sumber utama listrik untuk memenuhi permintaan daya beban. Ketidakhadiran pasokan listrik dari jaringan utama mengurangi kemampuan jaringan untuk memenuhi permintaan daya beban. Permintaan daya beban lebih besar daripada kapasitas pembangkit listrik terdistribusi, menyebabkan defisit daya di jaringan. Artikel ini mempelajari strategi untuk memulihkan keseimbangan daya melalui pemangkasan beban optimal, dengan mempertimbangkan adanya beban prioritas yang memerlukan permintaan daya untuk dipertahankan dan dipenuhi. Tujuan optimasi adalah memaksimalkan beban yang tersisa dengan komposisi optimal sehingga kerugian daya minimal. Optimasi pemangkasan beban menggunakan algoritma hibrida Grey Wolf Algorithm dan Whale Optimization Algorithm (GW-WOA). Kinerja GW-WOA diuji melalui optimasi pemangkasan beban pada sistem distribusi radial IEEE 118-bus yang terintegrasi dengan 12 unit pembangkit listrik terdistribusi (DG). Variasi faktor beban jaringan terdiri dari 80%, 100%, dan 140% dari beban dasar. Terkait semua faktor beban, algoritma hibrida GW-WOA unggul dibandingkan algoritma GWO dan WOA standar. Algoritma hibrida GW-WOA dapat konvergen lebih cepat untuk memperoleh solusi optimal global guna mewujudkan keseimbangan daya, mengatasi defisit daya, memaksimalkan beban sisa, dan meminimalkan kerugian daya di jaringan. Algoritma hibrida GW-WOA telah meningkatkan kinerja optimasi pemangkasan beban pada jaringan distribusi terisolasi dengan hasil optimal global dan iterasi yang lebih singkat.

Kata kunci: serigala abu-abu, algoritma hibrida, jaringan terisolasi, pemadaman beban, optimasi paus

1 Pengantar

Pembangkit listrik terdistribusi (DG) adalah sistem pembangkit yang dipasang secara tersebar di jaringan distribusi untuk memperpendek jarak pengiriman listrik ke beban dan mengurangi kerugian daya [1]. DG umumnya memanfaatkan energi terbarukan ramah lingkungan seperti angin dan matahari [2]. Integrasi DG dapat meningkatkan regulasi tegangan bus dan memungkinkan jaringan distribusi beroperasi dalam mode on-grid atau off-grid [3]. Mode off-grid terjadi ketika jaringan distribusi terputus dan terisolasi dari jaringan utama. Ketika terisolasi, DG menjadi sumber utama untuk memenuhi permintaan daya semua beban jaringan. Kehadiran DG memungkinkan jaringan distribusi terus memasok listrik ke beban, terutama beban prioritas. Kapasitas DG yang jauh di bawah daya beban menyebabkan ketidakseimbangan daya, yang akan menurunkan stabilitas tegangan dan frekuensi jaringan. Kondisi terburuk yang dapat terjadi adalah pemadaman listrik dan penghentian pasokan listrik ke seluruh beban di jaringan [4] [5].

Rekonfigurasi jaringan merupakan salah satu alternatif untuk mengatasi jaringan distribusi terisolasi [6]. Operasi saklar penghubung sektoral mengubah konfigurasi dan aliran daya dalam jaringan, memungkinkan beban setiap jalur diubah [7]. Rekonfigurasi juga dapat dilakukan dengan membagi jaringan besar menjadi beberapa jaringan kecil (pico-grid) sesuai dengan lokasi instalasi DG dalam jaringan [8]. Setiap pico-grid memanfaatkan DG sebagai sumber untuk memenuhi permintaan daya beban [9]. Untuk meningkatkan ketahanan jaringan terisolasi, rekonfigurasi jaringan terisolasi harus diikuti dengan penjadwalan pembangkit listrik terdistribusi [10]. Namun, dalam beberapa kasus, isolasi jaringan distribusi menyebabkan perbedaan daya yang besar antara pembangkitan DG dan beban. Rekonfigurasi jaringan tidak dapat mengatasi defisit daya di jaringan [11]. Pemadaman beban parsial harus dilakukan untuk mengatasi masalah defisit daya dan mewujudkan keseimbangan daya di jaringan [12]. Saat melakukan pemadaman beban, beban prioritas harus dipertahankan di jaringan agar permintaan dayanya terpenuhi. Komposisi beban yang tersisa mempengaruhi aliran daya dan kerugian daya di setiap jalur [13]. Optimasi sangat krusial dalam pemadaman beban.

Optimasi pemadaman beban telah menjadi topik penelitian yang menarik. Pendekatan analitis untuk merencanakan batas cakupan beban optimal secara dinamis pada sistem terisolasi dengan mempertimbangkan ketersediaan kapasitas pembangkit dipresentasikan dalam [14]. Perencanaan pemadaman beban untuk menyeimbangkan daya pada jaringan terisolasi menggunakan algoritma Firefly-PSO (FAPSO) dibahas dalam [13], algoritma Backtracking Search (BSA) diteliti dalam [15], dan algoritma hibrida PSO-GWO dipresentasikan dalam [16]. Artikel [17] memaparkan analisis jaringan untuk perencanaan pemadaman beban guna mencegah kolaps tegangan.

Algoritma GWO dan WOA telah banyak diterapkan dalam masalah optimasi. Keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan. WOA memiliki model matematis yang lebih sederhana daripada GWO. GWO memiliki kemampuan pencarian lokal yang lebih baik, sementara WOA memiliki kemampuan pencarian global yang lebih baik. Hibridisasi algoritma membuka peluang untuk mendapatkan algoritma yang konvergen lebih cepat dan dapat memberikan solusi optimal global [18].

Makalah ini mengkaji algoritma hibrida Grey Wolf dan Whale Optimization Algorithm (GW-WOA) yang diterapkan pada pemangkasan beban. Kedua algoritma digabungkan secara paralel untuk mendapatkan populasi terbaik pada setiap iterasi. Populasi terbaik digunakan untuk perhitungan pada iterasi berikutnya sehingga konvergensi lebih cepat dalam memperoleh solusi optimal global. Tujuan optimasi ini adalah memaksimalkan beban sisa dengan mempertimbangkan beban prioritas dalam jaringan. Makalah ini memiliki kontribusi sebagai berikut:

1. Peningkatan kinerja algoritma dengan menggabungkan Algoritma Optimasi Serigala Abu-abu dan Paus secara paralel.

2. Meningkatkan keandalan jaringan distribusi terisolasi dalam memastikan pasokan listrik ke beban, terutama beban prioritas.
3. Pemutusan beban untuk mencapai keseimbangan daya sehingga pemenuhan daya beban tetap terjaga, terutama untuk beban prioritas.
4. Mendapatkan komposisi optimal beban yang tersisa untuk mengurangi kerugian daya jaringan.

2 Metode Penelitian

Pemangkasan beban dapat mewujudkan keseimbangan daya antara kapasitas pembangkit dan permintaan daya beban di jaringan. Pemangkasan beban harus dilakukan secara tepat untuk memperoleh komposisi optimal beban sisa dan meminimalkan kerugian daya di jaringan.

2.1 Optimizer Serigala Abu-abu (GWO)

GWO adalah algoritma yang mengadopsi mekanisme serigala dalam berburu mangsa. α , β , dan δ adalah serigala dengan prioritas tertinggi, sedangkan ω adalah serigala dengan prioritas terendah yang mendapatkan kesempatan terakhir untuk memakan mangsa yang ditangkap [19]. Serigala memasang jebakan dengan mengelilingi mangsa. Persamaan

(1) dan (2) menyatakan jarak serigala ke mangsa D_{GWO} dan pembaruan posisi serigala $X_{\text{GWO}}(t+1)$ yang akan dilakukan.

$$D_{\text{GWO}} = |C \cdot X_p(t) - X_{\text{GWO}}(t)| \quad (1)$$

$$X_{\text{GWO}}(t+1) = X_p(t) - A \cdot D_{\text{GWO}} \quad (2)$$

X_p adalah posisi mangsa yang menjadi target, X_{GWO} adalah posisi serigala saat ini, dan t adalah iterasi saat ini. A dan C diperoleh dari Persamaan (3) dan (4).

$$A = 2 \cdot \alpha \cdot r_1 - \alpha \quad (3)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (4)$$

r_1 dan r_2 adalah bilangan acak antara 0 dan 1. Nilai α diperoleh menggunakan Persamaan (5).

$$\alpha = 2 - 1 - \frac{(t)}{t_{\max}} \quad (5)$$

t_{\max} adalah jumlah iterasi maksimum.

Fase berikutnya adalah perburuan yang dipandu α . Posisi serigala yang diprioritaskan adalah X_α , X_β , dan X_δ yang paling dekat dengan mangsa. Serigala lainnya harus memperbarui posisi mereka menuju ketiga serigala tersebut. Jarak serigala $X_{(\text{GWO})}$ ke ketiga serigala prioritas ($D_{(\alpha)}$, $D_{(\beta)}$, dan $D_{(\delta)}$) dinyatakan dalam Persamaan (6), (7), dan (8).

$$D_\alpha = |C \cdot X_\alpha(t) - X_{(\text{GWO})}| \quad (6)$$

$$D_\beta = |C \cdot X_\beta(t) - X_{(\text{GWO})}| \quad (7)$$

$$D_\delta = |C \cdot X_\delta(t) - X_{(\text{GWO})}| \quad (8)$$

Pergerakan serigala X_{GWO} menuju X_α , X_β , dan X_δ ditentukan menggunakan Persamaan (9), (10), dan (11).

$$X_{\text{GWO}-\alpha} = X_\alpha - A \cdot D_\alpha \quad (9)$$

$$X_{\text{GWO}-\beta} = X_\beta - A \cdot D_\beta \quad (10)$$

$$X_{\text{GWO}-\delta} = X_\delta - A \cdot D_\delta \quad (11)$$

Perbarui posisi serigala X_{GWO} pada iterasi $(t + 1)$ sesuai dengan Persamaan (12).

$$X_{\text{GWO}}((t+1)) = \frac{X_{\text{GWO}-\alpha} + X_{\text{GWO}-\beta} + X_{\text{GWO}-\delta}}{3} \quad (12)$$

Proses ini diulang hingga semua serigala berada di posisi mangsa.

2.2 Algoritma Optimasi Paus (WOA)

WOA adalah algoritma yang mengadopsi teknik yang digunakan paus untuk menjebak dan menyergap mangsa. Paus menyelam sambil membuat jebakan dari gelembung udara dan kemudian menyergap mangsa yang terjebak [20]. Persamaan (13) menyatakan jarak paus X_{WOA} ke posisi mangsa X^* .

Pembaruan posisi paus X_{WOA} terhadap mangsanya dinyatakan dalam Persamaan (14).

$$D_{\text{WOA}} = |C \cdot X^*(t) - X_{\text{WOA}}(t)| \quad (13)$$

$$X_{\text{WOA}}(t + 1) = X^*(t) - A \cdot D_{\text{WOA}} \quad (14)$$

t menandakan iterasi saat ini. Perhitungan A dan C menggunakan rumus yang sama seperti dalam algoritma GWO menggunakan Persamaan (3), (4), dan (5).

Paus berputar mengelilingi mangsanya, mengikuti jalur spiral yang menyempit dengan probabilitas 50%, yang secara matematis diwakili oleh Persamaan (15).

$$X_{\text{WOA}}(t+1) = \begin{cases} X_{\text{WOA}}(t) - A \cdot D_{(\text{WOA})}, & \text{jika } p < 0,5 \\ D_{\text{WOA}} \cdot e^{bL} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t), & \text{jika } p \geq 0,5 \end{cases} \quad (15)$$

p adalah nilai acak antara 0 dan 1, b adalah konstanta berbentuk spiral, dan L adalah nilai acak antara -1 dan 1.

Paus X_{WOA} juga bergerak menuju paus lain yang dipilih secara acak (X_{rand}). Persamaan (16) menyatakan perhitungan jarak (D_{rand}) dari X_{WOA} ke X_{rand} , sementara Persamaan (17) digunakan untuk menghitung pergerakan X_{WOA} menuju X_{rand} .

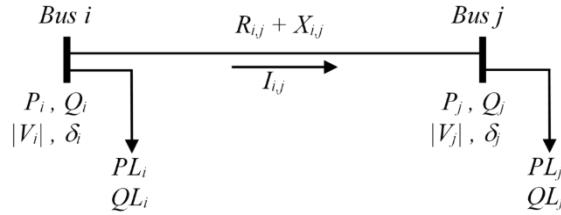
$$D_{\text{rand}} = |C \cdot X_{\text{rand}} - X_{(\text{WOA})}| \quad (16)$$

$$X_{\text{WOA}}(t + 1) = X_{\text{rand}} - A \cdot D_{\text{rand}} \quad (17)$$

3 Formulasi Masalah

3.1 Kerugian Daya pada Garis

Gambar 1 menunjukkan jaringan antara bus i dan j yang dihubungkan oleh impedansi jalur $R_{i,j} + X_{i,j} \cdot I_{i,j}$ arus jalur. Daya di bus i adalah $P_{(i)}$ dan $Q_{(i)}$, sedangkan di bus j adalah $P_{(j)}$ dan $Q_{(j)}$. Beban di bus i adalah $PL_{(i)}$ dan $QL_{(i)}$, sedangkan di bus j adalah $PL_{(j)}$ dan $QL_{(j)}$.



Gambar 1: Jaringan dua bus.

Kerugian daya pada jalur dapat diekspresikan dalam Persamaan (18) dan (19) di bawah ini [21]:

$$P_{loss-i,j} = R_{i,j} \cdot |I_{i,j}|^2 \quad (18)$$

$$Q_{loss-i,j} = X_{i,j} \cdot |I_{i,j}|^2 \quad (19)$$

Pada jaringan dengan NL jalur, kerugian daya total merupakan akumulasi kerugian daya setiap jalur, yang secara matematis dinyatakan dalam Persamaan (20) dan (21).

$$P_{loss-total} = \sum_{k=1}^{NL} R_k \cdot |I_k|^2 \quad (20)$$

$$Q_{loss-total} = \sum_{k=1}^{NL} X_k \cdot |I_k|^2 \quad (21)$$

k menunjukkan nomor garis, R_k adalah resistansi garis k , X_k adalah reaktansi garis k , dan I_k adalah arus pada garis k .

3.2 Tujuan Optimasi

Beban yang tetap terhubung ke jaringan (P_{rem}) sama dengan beban total sebelum pemutusan beban ($P_{load-total}$) dikurangi beban yang diputus dari jaringan (P_{shed}) dan dapat diekspresikan secara matematis dengan Persamaan (22).

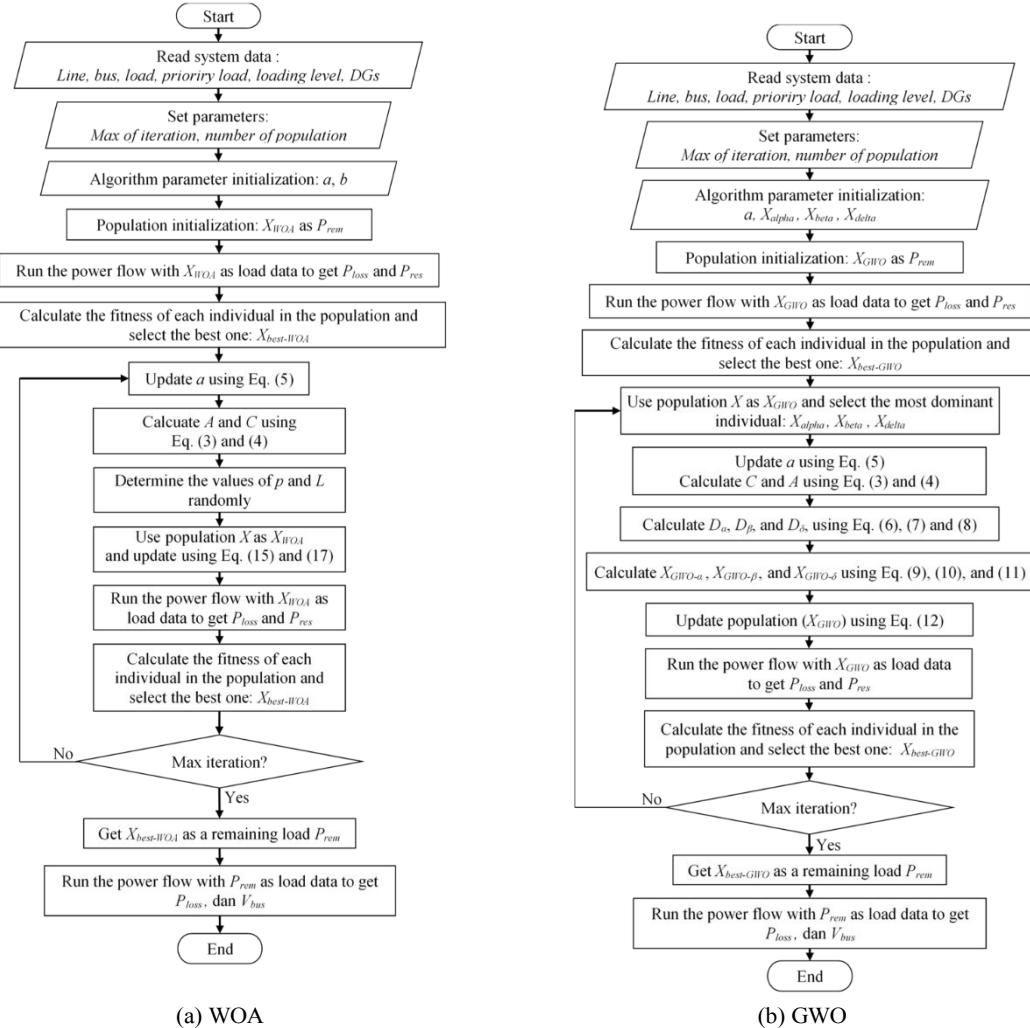
$$P_{rem} = P_{load-total} - P_{shed} \quad (22)$$

Tujuan optimasi adalah memaksimalkan beban yang tersisa (P_{rem}) yang dinyatakan dalam Persamaan (23).

$$f_{obj} = \max(P_{rem}) \quad (23)$$

P_{rem} harus lebih kecil dari nilai maksimum pembangkitan DG agar keseimbangan daya dapat tercapai.

3.3 Batasan



Gambar 2: Diagram alir optimasi pemandaman beban menggunakan.

Optimasi pemandaman beban tunduk pada batasan-batasan berikut:

1. Keseimbangan daya Daya beban sisa dan kerugian daya tidak melebihi daya pembangkitan DG, yang dapat diekspresikan secara matematis dalam Persamaan (24) dan (25).

$$\sum_{\substack{i=1 \\ \text{NDG}}}^{\text{NDG}} \text{PDG}_{i,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ \text{Nb}}}^{\text{Nb}} \text{Prem}_{j,j} + \text{Ploss-after LS} \quad (24)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ \text{NDG}}}^{\text{NDG}} \text{QDG}_{i,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ \text{Nb}}}^{\text{Nb}} \text{Qrem}_{j,j} + \text{Qloss-after LS} \quad (25)$$



$P_{DG,i}$ dan $Q_{DG,i}$ adalah daya pembangkitan $DG-i$. N_{DG} adalah jumlah DG. $P_{(rem)}(j)$ dan $Q_{(rem)}(j)$ adalah daya beban yang tetap terhubung di bus- j . $N(b)$ adalah jumlah bus. $P_{(loss-after)}(LS)$ dan $Q_{(loss-after)}(LS)$ adalah kerugian daya di jaringan.

2. Beban sisa

Semua beban prioritas harus tetap terhubung ke jaringan.

$$P_{prior,i} \leq P_{rem,i} \quad (26)$$

$$Q_{prior,i} \leq Q_{rem,i} \quad (27)$$

$P_{prior,i}$ dan $Q_{prior,i}$ adalah beban prioritas di bus- i . $P_{rem,i}$ dan $Q_{rem,i}$ adalah beban sisa di bus- i .

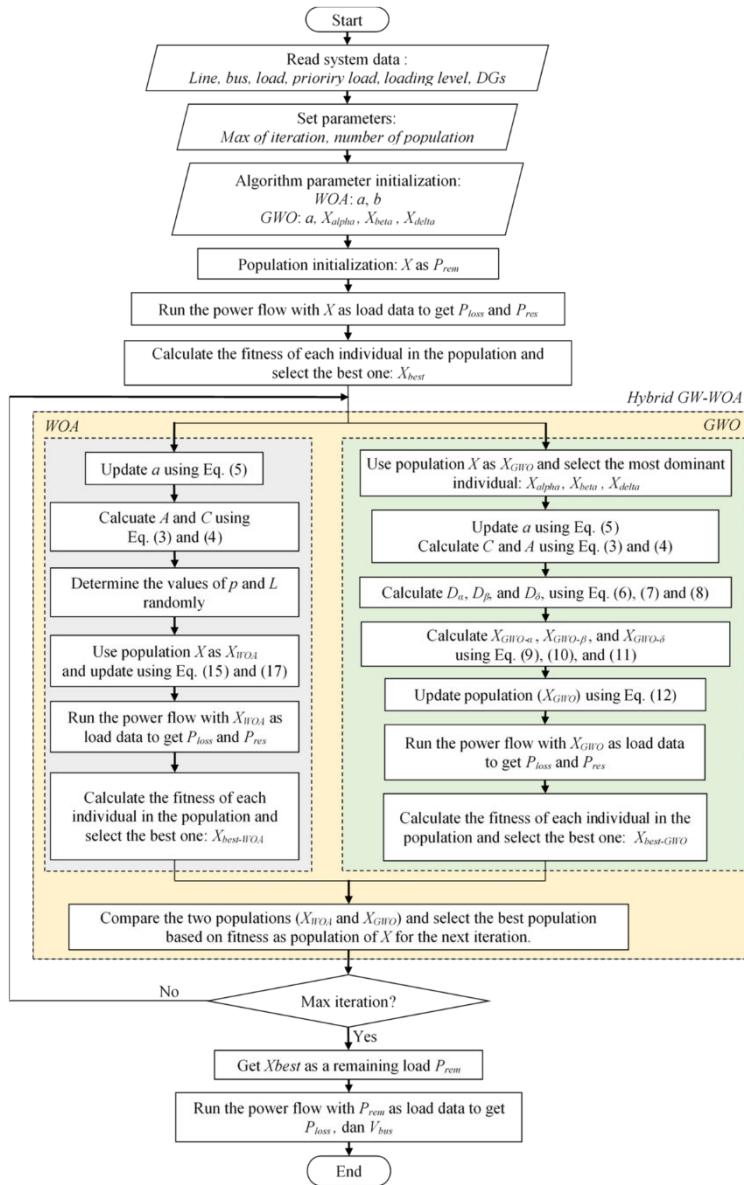
3. Pembangkitan listrik dari DG Pembangkitan listrik dari DG diatur pada batas maksimum.

$$P_{DG} = P_{DG}^{\max} \quad (28)$$

P_{DG} adalah pembangkitan listrik DG dan P_{DG}^{\max} adalah batas maksimum daya DG.

3.4 Algoritma Hybrid GW-WOA untuk Optimasi Pemadaman Beban

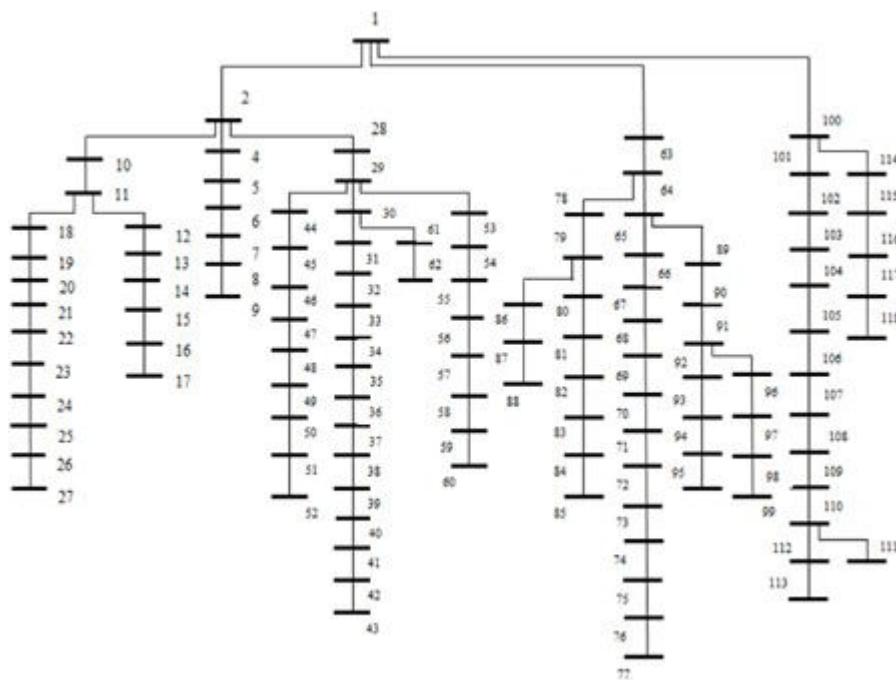
Algoritma Optimasi Serigala Abu-abu dan Paus Hibrida (GW-WOA) merupakan kombinasi paralel. Kombinasi paralel ini dilakukan dengan menerapkan perhitungan pembaruan populasi dari kedua algoritma GWO dan WOA. Kedua populasi yang dihasilkan kemudian dibandingkan, dan yang terbaik dipilih berdasarkan nilai kebugaran (fitness value) untuk digunakan sebagai populasi kandidat pada iterasi berikutnya. Dengan cara ini, diharapkan dapat mempercepat konvergensi iterasi untuk mendapatkan solusi optimal global. Gambar 2a dan 2b menunjukkan diagram alir WOA dan GWO masing-masing. Dalam makalah ini, algoritma hibrida GW-WOA yang diusulkan untuk optimasi pemadaman beban ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Diagram alir algoritma hibrida GW-WOA untuk optimasi pemangkasan beban.

4 Hasil dan Pembahasan

Optimasi pemadaman beban menggunakan sistem uji jaringan distribusi radial 118-bus IEEE yang ditunjukkan pada Gambar 4 [22]. Sistem uji ini memiliki 117 jalur dan 118 bus. Daya beban dasar total adalah 22.709,72 kW dan 17.041,068 kVAR. Beberapa pembangkit listrik terdistribusi (DG) dengan kapasitas dan lokasi, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, telah diintegrasikan ke dalam jaringan.



Gambar 4: Jaringan distribusi radial IEEE 118-bus.

Tabel 1: Lokasi dan kapasitas DG

DG	Bus GD	P _{out-max} (MW)
1	77	500
2	76	700
3	75	700
4	74	300
5	73	500
6	43	500
7	27	300
8	42	500
9	52	700
10	72	500
11	26	300
12	51	500
Kapasitas DG Total		6000

Optimasi pemadaman beban mencakup 3 studi kasus dengan tingkat beban 80%, 100%, dan 140% dari beban dasar. Berdasarkan hasil optimasi yang sesuai dengan tujuan optimasi, kerugian jaringan, dan kecepatan konvergensi, kinerja GW-WOA dibandingkan dengan GWO dan WOA.

4.1 Studi Kasus-1: Optimasi pemadaman beban pada 80% beban dasar

Pada 80% beban dasar, daya beban total adalah 18.167,20 kW dan 13.632,70 kVAR. Dengan kapasitas pembangkitan maksimum DG sebesar 6.000 kW, defisit daya di jaringan adalah 12.167,20 kW. Pemangkasan beban yang tepat dapat mewujudkan keseimbangan daya antara beban sisa dan kapasitas pembangkitan DG. Optimasi dilakukan dengan menerapkan algoritma GW-WOA, GWO, dan WOA. Tabel 2 merangkum hasil optimasi menggunakan algoritma GW-WOA, GWO, dan WOA hingga 500 iterasi.

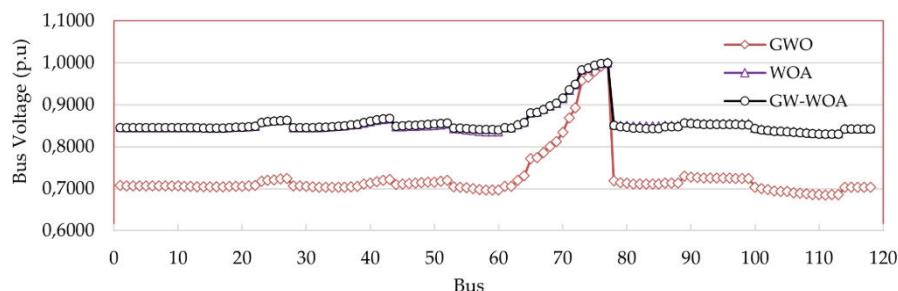
Tabel 2 menunjukkan bahwa dalam 500 iterasi, algoritma GWO belum mampu memberikan pemangkasan beban optimal. $P_{\text{rem}} = 6.545,30$ kW melebihi daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh DG, yaitu 6.000 kW. Keseimbangan antara daya beban dan daya pembangkitan DG belum tercapai. Bahkan jika nilai kerugian pada jaringan sebesar $P_{(\text{loss})} = 1.560,60$ kW diperhitungkan, hal ini akan meningkatkan defisit daya.

Tabel 2: Hasil optimasi pemangkasan beban pada 80% beban dasar

Parameter	Algoritma		
	GW-WOA	WOA	GWO
P_{muatan} (kW)	18.167,20	18.167,20	18.167,20
P_{shed} (kW)	12.937,40	12.961,20	11.622,10
P_{rem} (kW)	5.230,90	5.205,70	6.545,30
P_{kerugian} (kW)	468,30	472,90	1.560,60
$P_{\text{rem}} + P_{\text{kerugian}}$ (kW)	5.699,20	5.678,60	8.105,90

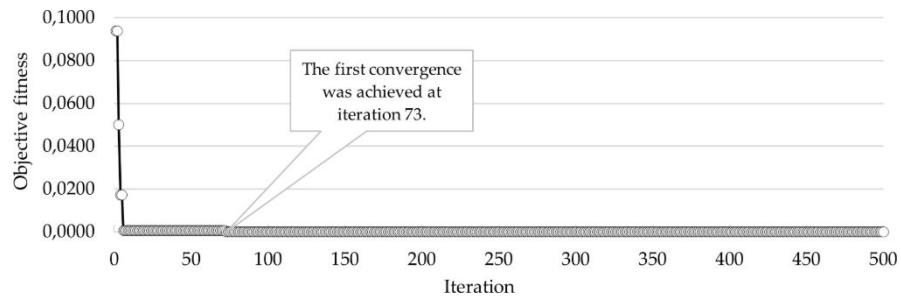
Algoritma GW-WOA melepaskan beban dari jaringan sebesar $P_{\text{shed}} = 12.937,40$ kW, sementara algoritma WOA menghasilkan $P_{\text{shed}} = 12.961,20$ kW. Algoritma GW-WOA dapat memberikan hasil yang lebih optimal untuk meminimalkan beban yang dilepaskan dari jaringan.

Algoritma GWO-WOA dan WOA memberikan beban sisa (P_{rem}) sebesar 5.230,90 kW dan 5.204,70 kW, masing-masing. Kerugian daya ($P_{(\text{loss})}$) setelah pemangkasan beban untuk kedua algoritma tersebut adalah 468,30 kW dan 472,90 kW, masing-masing. Defisit daya di jaringan dapat diatasi jika total daya beban sisa dan kerugian daya masih di bawah kapasitas pembangkitan maksimum oleh DG. Kapasitas pembangkitan DG dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk melanjutkan pasokan daya ke beban sisa selama isolasi jaringan.

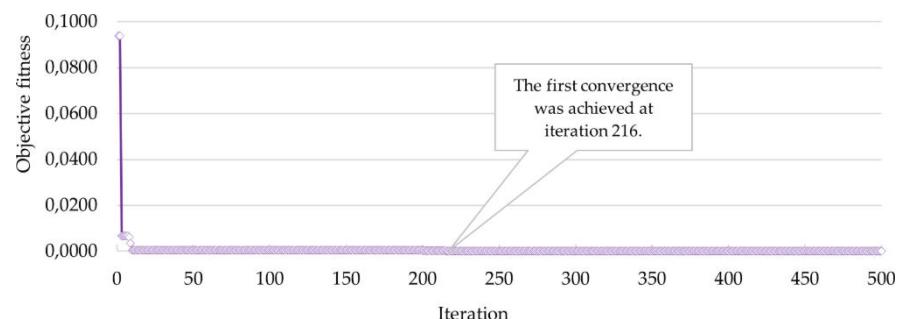


Gambar 5: Profil tegangan bus dalam jaringan yang dimuat dengan 80% beban dasar setelah optimasi pemangkasan beban menggunakan algoritma GW-WOA, WOA, dan GWO.

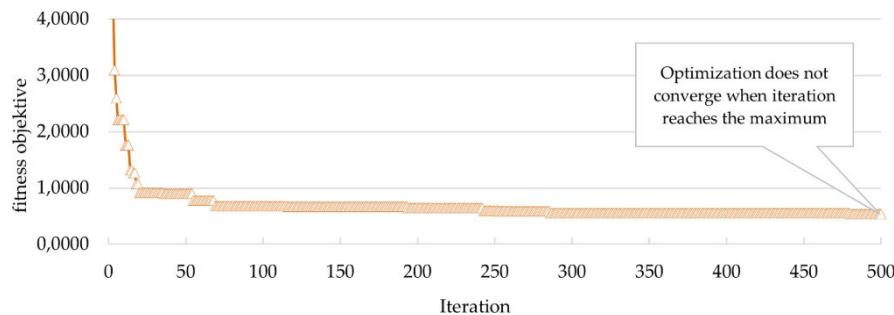
Gambar 5 menampilkan profil tegangan setelah optimasi pemangkasan beban. Gambar tersebut menunjukkan bahwa setelah optimasi pemangkasan beban menggunakan algoritma GW-WOA, tegangan bus dalam jaringan juga lebih baik daripada hasil yang diberikan oleh algoritma WOA standar. Algoritma GW-WOA memberikan tegangan bus yang relatif lebih tinggi daripada algoritma WOA.



Gambar 6: Konvergensi algoritma GW-WOA hibrida dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 80% beban dasar.



Gambar 7: Konvergensi WOA dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 80% beban dasar.



Gambar 8: Konvergensi GWO dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 80% beban dasar.

Gambar 6, 7, dan 8 menunjukkan konvergensi masing-masing algoritma. Hingga batas iterasi maksimum, algoritma GWO belum mencapai konvergensi. Sementara itu, algoritma GW-WOA dan WOA telah mencapai titik konvergensi sebelum batas iterasi maksimum. Algoritma GW-WOA memberikan hasil optimal pada iterasi ke-73, sedangkan algoritma WOA memberikan hasil optimal pada iterasi ke-216. Hibridisasi algoritma GWO dan WOA untuk membentuk algoritma hibrid GW-WOA telah meningkatkan kinerja secara signifikan dibandingkan dengan algoritma GWO dan WOA. Algoritma GW-WOA konvergensi lebih cepat daripada GWO dan WOA.

4.2 Kasus-2: Optimasi Pemadaman Beban pada 100% Beban Dasar

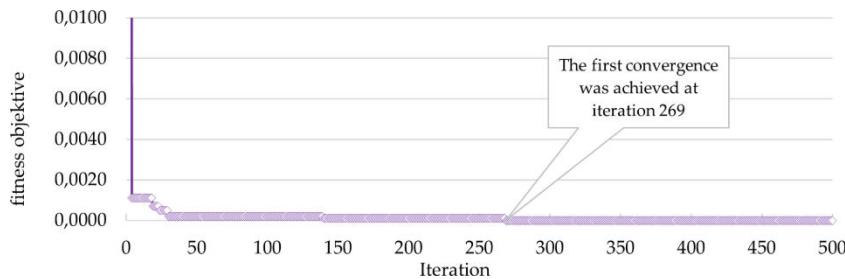
Ketika beban jaringan mencapai 100% dari beban dasar, daya beban total adalah 22.709,70 kW dan 17.041,20 kVAR. Dengan kapasitas pembangkit maksimum DG sebesar 6.000 kW, defisit daya di jaringan adalah 16.709,70 kW. Tabel 3 merangkum hasil optimasi menggunakan algoritma GW-WOA, GWO, dan WOA hingga 500 iterasi. Algoritma GWO belum mampu memberikan hasil optimal dalam pemangkasan beban. Hingga iterasi maksimum, nilai $P_{(rem)} = 6.557,80$ kW dan $P_{(loss)} = 1.571,20$ kW menunjukkan bahwa masih terdapat defisit daya sebesar 2.129,00 kW.

Tabel 3: Hasil optimasi pemadaman beban pada 100% beban dasar

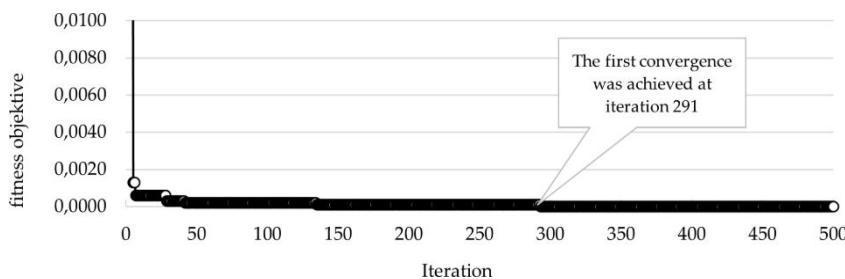
Parameter	Algoritma		
	GW-WOA	WOA	GWO
P_{muatan} (kW)	22.709,70	22.709,70	22.709,70
P_{shed} (kW)	17.492,200	17.537,30	16.152,10
P_{rem} (kW)	5.217,60	5.172,10	6.557,80
$P_{kerugian}$ (kW)	459,00	510,60	1.571,20
$P_{(rem)} + P_{(loss)}$ (kW)	5.676,60	5.682,70	8.129,00

Algoritma GW-WOA dan WOA telah memberikan hasil optimal sebelum batas iterasi maksimum. Optimasi pemangkasan beban menggunakan GW-WOA meninggalkan beban di jaringan $P_{rem} = 5.217,60$ kW dan kerugian daya $P_{loss} = 459,00$ kW, sementara WOA menghasilkan $P_{rem} = 5.172,10$ kW dan $P_{loss} = 472,90$ kW. Algoritma GW-WOA memberikan pemangkasan beban yang lebih optimal

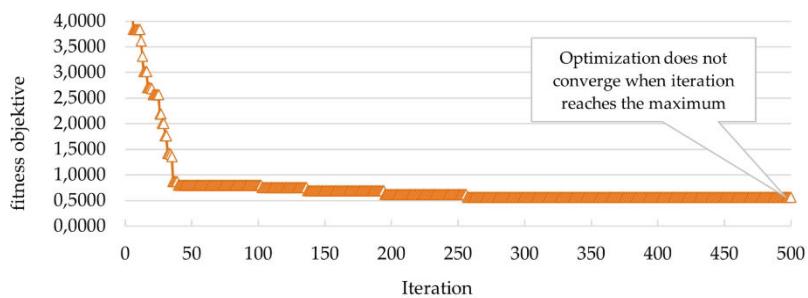
, di mana beban yang dapat dipertahankan dalam jaringan mencapai maksimum dengan kerugian daya minimal.



Gambar 9: Konvergensi algoritma hybrid GW-WOA dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 100% beban dasar.



Gambar 10: Konvergensi algoritma hybrid WOA dalam optimasi pemadaman beban pada jaringan dengan 100% beban dasar.



Gambar 11: Konvergensi algoritma GWO hibrida dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 100% beban dasar.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa algoritma GW-WOA konvergen dalam 269 iterasi, sementara algoritma WOA konvergen dalam 291 iterasi. Gambar 11 menunjukkan bahwa algoritma GWO

tidak konvergen ketika iterasi mencapai batas maksimum. Algoritma GW-WOA lebih unggul daripada algoritma GWO dan WOA.

4.3 Kasus-3: Optimasi Pemadaman Beban pada 140% Beban Dasar

Ketika tingkat beban mencapai 140% dari beban dasar, daya total beban jaringan masing-masing sebesar 31.793,20 kW dan 23.857,20 kVAR. Dengan daya pembangkitan maksimum dari 12 unit DG sebesar 6.000 kW, defisit daya jaringan sebesar 25.932,20 kW.

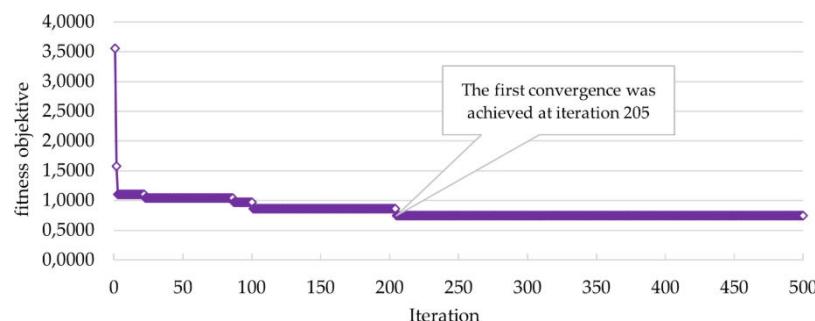
Tabel 4 merangkum hasil optimasi pemadaman beban menggunakan tiga algoritma. Algoritma GWO dan WOA tidak dapat memberikan hasil optimal ketika iterasi mencapai batas maksimum, seperti yang ditunjukkan oleh $P_{(rem)}$ sebesar 6.672,50 kW dan 7.232,60 kW masing-masing. Nilai ini masih melebihi daya maksimum yang dihasilkan oleh DG ($P_{(max)(DG)} = 6.000$ kW), yang menyebabkan defisit daya pada jaringan.

Tabel 4: Hasil optimasi pemadaman beban pada 140% beban dasar

Parameter	Algoritma		
	GW-WOA	WOA	GWO
P_{muatan} (kW)	31.792,20	31.792,20	31.792,20
P_{shed} (kW)	26.587,20	25.121,10	24.561,00
P_{rem} (kW)	5.206,70	6.672,50	7.232,60
P_{kerugian} (kW)	769,30	1.683,80	3.020,20
$P_{\text{(rem)}} + P_{\text{(loss)}}$ (kW)	5.976,00	8.356,30	10.252,80

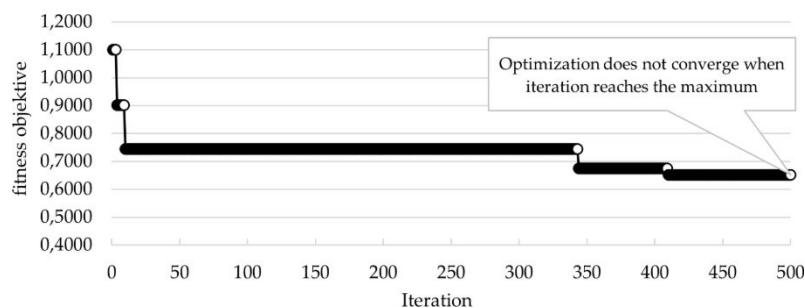
Algoritma GW-WOA menghasilkan beban yang dilepaskan dari jaringan $P_{\text{shed}} = 26.587,20$ kW, beban yang tersisa di jaringan $P_{\text{rem}} = 5.206,70$ kW, dan kerugian daya $P_{\text{loss}} = 769,30$ kW. Jumlah P_{rem} dan P_{loss} adalah 5.976,00 kW dan dapat dipenuhi dari pembangkit listrik distribusi (DG). Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma GW-WOA memberikan hasil optimal untuk mewujudkan keseimbangan daya di jaringan.

Berdasarkan Gambar 12, algoritma GW-WOA menunjukkan kinerja yang lebih unggul, dengan konvergensi pertama tercapai pada iterasi ke-205. Algoritma GWO dan WOA belum mencapai konvergensi ketika iterasi mencapai batas maksimum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14.

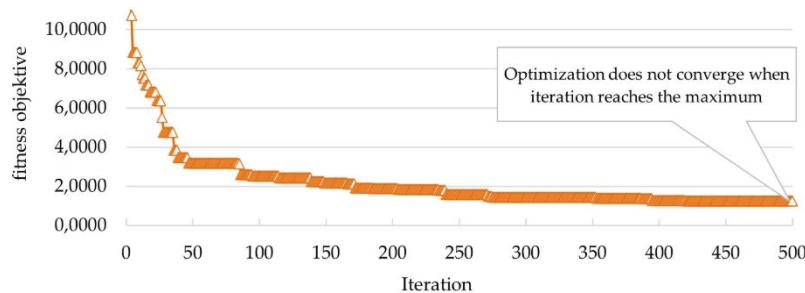


Gambar 12: Konvergensi algoritma hybrid GW-WOA dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 140% beban dasar.





Gambar 13: Konvergensi algoritma hybrid WOA dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 140% beban dasar.



Gambar 14: Konvergensi algoritma hybrid GWO dalam optimasi pemangkasan beban pada jaringan dengan 140% beban dasar.

5 Kesimpulan

Integrasi DG memungkinkan jaringan untuk tetap beroperasi meskipun terputus dari jaringan utama. Namun, batasan kapasitas pembangkitan DG tidak dapat memenuhi permintaan daya seluruh beban dalam jaringan yang terisolasi. Artikel ini membahas optimasi pemutusan beban untuk mencapai keseimbangan daya dalam jaringan distribusi yang terisolasi dari jaringan utama. Pemutusan beban dioptimalkan menggunakan algoritma hibrid GW-WOA, yang mempertimbangkan prioritas beban yang harus dipertahankan dalam jaringan. Tujuan optimasi adalah memaksimalkan beban yang tetap terhubung ke jaringan sehingga kapasitas pembangkitan DG dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin untuk terus menyediakan layanan kepada pelanggan. Kinerja algoritma GW-WOA dibandingkan dengan algoritma GWO dan WOA. Algoritma GW-WOA unggul dibandingkan algoritma GWO dan WOA, yang ditunjukkan oleh hasil yang lebih optimal dan konvergensi yang lebih cepat. Hibridisasi dapat meningkatkan kinerja algoritma. Penelitian masa depan adalah kombinasi antara pemutusan beban simultan dan rekonfigurasi untuk meningkatkan keandalan jaringan distribusi terisolasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Universitas Budi Luhur atas dukungan pendanaan untuk kegiatan penelitian dan publikasi.

Referensi

- [1] S. Sepasi, C. Talichet, dan A. S. Pramanik, “Kualitas daya dalam mikrogrid: Tinjauan kritis tentang dasar-dasar, standar, dan studi kasus,” *IEEE Access*, vol. 11, hlm. 108493–108531, 2023.
- [2] T. H. B. Huy, D. N. Vo, K. H. Truong, dan T. Van Tran, “Penempatan pembangkit listrik terdistribusi optimal dalam jaringan distribusi radial menggunakan algoritma Enhanced Search Group,” *IEEE Access*, vol. 11, hlm. 103288–103305, 2023.
- [3] M. Dreidy, H. Mokhlis, dan S. Mekhilef, “Aplikasi teknik meta-heuristik untuk pemadaman beban optimal pada jaringan distribusi terisolasi dengan penetrasi tinggi pembangkit tenaga surya PV,” *Energies*, vol. 10, no. 2, hlm. 150, 2017.
- [4] B. de Nadai Nascimento, A. C. Zambroni de Souza, J. G. de Carvalho Costa, dan M. Castilla, “Skema pemutusan beban dengan tindakan korektif frekuensi rendah dan tegangan rendah untuk memasok beban prioritas tinggi pada mikrogrid terisolasi,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 11, hlm. 1981–1989, 2019.
- [5] A. Khamis, H. Shareef, dan A. Mohamed, “Deteksi isolasi dan skema pemutusan beban untuk sistem distribusi radial yang terintegrasi dengan pembangkit terdesentralisasi,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 15, hlm. 2261–2275, 2015.
- [6] S. Kamel, M. Khasanov, F. Jurado, A. Kurbanov, H. M. Zawbaa, dan M. A. Alath-bah, “Alokasi pembangkit listrik terdistribusi secara bersamaan dan rekonfigurasi jaringan dalam jaringan distribusi dengan mempertimbangkan tingkat beban yang berbeda,” *IEEE Access*, vol. 11, hal. 105916–105934, 2023.
- [7] V. V. V. S. N. Murty dan A. Kumar, “Integrasi DG optimal dan rekonfigurasi jaringan dalam sistem mikrogrid dengan model beban waktu nyata yang bervariasi menggunakan optimisasi hibrida,” *IET Smart Grid*, vol. 2, no. 2, hlm. 192–202, 2019.
- [8] Q. Shi, F. Li, M. Olama, J. Dong, Y. Xue, M. Starke, C. Winstead, dan T. Kuruganti, “Rekonfigurasi jaringan dan penjadwalan sumber energi terdistribusi untuk meningkatkan ketahanan sistem distribusi,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, hlm. 106355, 2021.
- [9] S. A. Siddiqui, M. Fozdar, dkk., “Penempatan optimal generator terdistribusi dalam sistem distribusi radial untuk mengurangi efek isolasi pulau,” *Jurnal Teknik Listrik dan Teknologi*, vol. 11, no. 3, hlm. 551–559, 2016.
- [10] Q. Shi, F. Li, M. Olama, J. Dong, Y. Xue, M. Starke, C. Winstead, dan T. Kuruganti, “Rekonfigurasi jaringan dan penjadwalan sumber energi terdistribusi untuk meningkatkan ketahanan sistem distribusi,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, hlm. 106355, 2021.



- [11] V. Tamilselvan, “Algoritma hibrida PSO-ABC untuk pengurangan beban optimal dan peningkatan stabilitas tegangan,” *Jurnal Internasional Teknologi Manufaktur dan Manajemen*, vol. 34, no. 6, hlm. 577–597, 2020.
- [12] N. Sapari, H. Mokhlis, J. A. Laghari, A. Bakar, dan M. Dahalan, “Aplikasi skema pemutusan beban pada jaringan distribusi yang terhubung dengan pembangkit listrik terdistribusi: Sebuah tinjauan,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, hlm. 858–867, 2018.
- [13] J. Jallad, S. Mekhilef, H. Mokhlis, J. Laghari, dan O. Badran, “Aplikasi teknik meta-heuristik hibrida untuk perencanaan dan operasi pemadaman beban optimal pada jaringan distribusi terisolasi yang terintegrasi dengan pembangkit listrik terdistribusi,” *Energies*, vol. 11, no. 5, hlm. 1134, 2018.
- [14] H. Gao, Y. Chen, Y. Xu, dan C.-C. Liu, “Pemadaman beban dinamis untuk jaringan mikro terisolasi dengan sumber pembangkit terbatas,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 12, hlm. 2953–2961, 2016.
- [15] A. Khamis, H. Shareef, A. Mohamed, dan Z. Y. Dong, “Skema pemutusan beban untuk sistem tenaga listrik terisolasi yang terintegrasi dengan DG menggunakan algoritma pencarian balik,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 1, hlm. 161–172, 2018.
- [16] A. Priyadi, M. Pujiantara, M. H. Purnomo, dkk., “Algoritma Partikel Swarm-Grey Wolf Paralel untuk Pemangkasan Beban Optimal pada Jaringan Terisolasi,” *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika: JANAPATI*, vol. 13, no. 1, hlm. 11–21, 2024.
- [17] A. Tian dan X. Mou, “Strategi pemadaman beban terdistribusi berbasis analisis jaringan untuk pencegahan keruntuhan tegangan,” *IEEE Access*, vol. 7, hlm. 161375–161384, 2019.
- [18] S. K. Mosavi, E. Jalalian, dan F. Gharahchopog, “Survei komprehensif algoritma optimizer serigala abu-abu dan aplikasinya,” *Int. J. Adv. Robot. Expert Syst.*, vol. 1, no. 6, hlm. 23–45, 2018.
- [19] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, dan A. Lewis, “Optimizer Serigala Abu-abu,” *Kemajuan Perangkat Lunak Teknik*, vol. 69, hlm. 46–61, 2014.
- [20] S. Mirjalili dan A. Lewis, “Algoritma Optimasi Paus,” *Advances in Engineering Software*, vol. 95, hlm. 51–67, 2016.
- [21] M. Suresh dan E. J. Belwin, “Penempatan DG optimal untuk memaksimalkan manfaat dalam jaringan distribusi menggunakan algoritma dragonfly,” *Energi Terbarukan: Angin, Air, dan Matahari*, vol. 5, hlm. 1–8, 2018.
- [22] H. Hartono, M. Azis, dan Y. Muhamni, “Penempatan kapasitor optimal untuk sistem bus IEEE 118 menggunakan algoritma genetika,” dalam *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, hlm. 1–5, IEEE, 2019.