Technologia : Jurnal Ilmiah
p-ISSN: 2086-6917, e-ISSN: 2656-8047
Homepage: https://ojs.uniska-bjm.ac.id/index.php/JIT/index
Vol. 17, No. 4, Oktober 2026

ANALISIS PERFORMA ALGORITMA GWO PADA SOLAR PANEL DENGAN KONDISI UIC DAN PSC

Abdi Satrio[1] , Istiyo Winarno[2] , Sinung Widiyanto[3], Munsyi[4], M. Abduh[5]
[1-3] Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah Surabaya, Indonesia.
[4-5] Fakultas Dakwah dan Ilmu Komunikasi, Universitas Islam Negeri Antasari Banjarmasin, Indonesia.

Informasi Artikel:
Dikirim: 04-08-2026; Diterima: 07-09-2026; Diterbitkan: 20-10-2026
Doi : http://dx.doi.org/10.31602/tji.v17i4.24978

Abstrak

Penelitian ini membandingkan kinerja algoritma *Grey Wolf Optimization* (GWO) dan *Perturb and Observe* (P&O) sebagai metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada sistem *Photovoltaic* (PV). Simulasi dilakukan menggunakan software PSIM pada rangkaian 4 modul PV seri dengan DC-DC *Boost Converter*. Pengujian mencakup kondisi *Uniform Irradiance Condition* (UIC) dan 4 pola *Partial Shading Condition* (PSC). Hasil pengujian menunjukkan GWO secara umum lebih unggul. Pada kondisi UIC, GWO mencapai efisiensi 99,40% (198,847 W), melampaui P&O yang hanya 81,17% (162,377 W). Pada skenario bayangan ringan hingga menengah (PSC 1-3), GWO konsisten mempertahankan efisiensi di sekitar 99%, sementara P&O tertahan di rentang 82-83% akibat jebakan puncak lokal (LMPP). Selain itu, GWO terbukti menghasilkan *ripple* daya yang lebih rendah di semua skenario pengujian. Namun, pada kondisi bayangan ekstrem (PSC 4), performa GWO mengalami penurunan efisiensi menjadi 84,30% (82,955 W), berada di bawah P&O yang mampu mencapai 92,62% (91,136 W). Kesimpulannya, algoritma GWO memberikan performa pelacakan daya yang lebih efisien dan stabil pada mayoritas kondisi lingkungan, meskipun kinerjanya masih menurun saat menghadapi pola bayangan yang sangat ekstrem.

Keywords: *Photovoltaic*, MPPT, *Grey Wolf Optimization*, *Partial Shading Condition*.

This is an open-access article under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) License. Copyright ©**2026** by authors.

Pendahuluan

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar dalam mendukung kebutuhan energi listrik. Sistem *Photovoltaic* (PV) memungkinkan energi radiasi matahari dikonversi secara langsung menjadi energi listrik sehingga teknologi ini banyak dikembangkan sebagai salah satu alternatif pembangkitan energi terbarukan [1]. Pemanfaatan energi surya juga memiliki potensi yang besar di Indonesia sehingga pengembangan sistem PV menjadi salah satu alternatif dalam pemanfaatan sumber energi terbarukan [10].

Modul PV memiliki karakteristik keluaran daya yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama intensitas iradiasi dan temperatur. Perubahan kondisi tersebut menyebabkan titik operasi dengan daya maksimum dapat berubah sehingga daya yang dihasilkan sistem tidak selalu berada pada kondisi optimum [2]. Selain perubahan lingkungan, gangguan pada panel PV juga dapat memengaruhi kemampuan sistem dalam menghasilkan daya [5]. Karakteristik keluaran PV yang

nonlinier menyebabkan terdapat titik operasi tertentu yang menghasilkan daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP). Posisi MPP dapat berubah ketika kondisi operasi berubah sehingga diperlukan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengatur titik operasi sistem agar bekerja mendekati daya maksimum [1], [4]. Berbagai metode MPPT telah dikembangkan, mulai dari metode konvensional hingga metode berbasis optimasi dan kecerdasan buatan.[15].

Pada kondisi *Uniform Irradiance Condition* (UIC), seluruh modul PV menerima tingkat iradiasi yang sama sehingga karakteristik daya umumnya memiliki satu titik maksimum. Kondisi tersebut relatif mudah untuk ditangani oleh algoritma MPPT. Sebaliknya, pada *Partial Shading Condition* (PSC), distribusi iradiasi yang tidak seragam pada modul PV dapat menghasilkan beberapa *Local Maximum Power Points* (LMPP) dan satu *Global Maximum Power Point* (GMPP). Kondisi *multi-peak* tersebut meningkatkan kompleksitas proses pencarian titik daya maksimum [8], [9].

Salah satu metode MPPT konvensional yang banyak digunakan adalah *Perturb and Observe* (P&O). Metode ini memiliki struktur sederhana karena bekerja dengan memberikan perturbasi pada titik operasi dan mengamati perubahan daya yang dihasilkan [14]. Namun, proses perturbasi yang dilakukan secara terus-menerus dapat menyebabkan osilasi di sekitar MPP dan menurunkan daya rata-rata yang dapat diekstraksi [4], [13]. Pada kondisi PSC, metode tersebut juga berpotensi berhenti pada LMPP sehingga tidak memperoleh GMPP [6], [8].

Untuk mengatasi keterbatasan metode pencarian lokal, algoritma berbasis optimasi metaheuristik dapat digunakan untuk melakukan pencarian pada ruang solusi yang lebih luas. Pendekatan berbasis kecerdasan buatan dan algoritma optimasi telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan MPPT pada sistem PV [9], [15]. Salah satu algoritma metaheuristik yang dapat digunakan adalah *Grey Wolf Optimization* (GWO). Algoritma GWO diperkenalkan oleh Mirjalili *et al.* dan terinspirasi dari mekanisme hierarki sosial serta strategi berburu serigala abu-abu [11]. Mekanisme tersebut memungkinkan beberapa kandidat solusi melakukan proses eksplorasi dan eksploitasi untuk memperoleh solusi optimum.

Penerapan GWO pada sistem PV dengan kondisi shading telah dikaji pada penelitian terdahulu. Li *et al.* melakukan analisis GWO pada sistem PV yang mengalami shading [7], sedangkan Nagadurga *et al.* membandingkan beberapa algoritma metaheuristik untuk pencarian GMPP pada sistem PV dengan kondisi *partial shading* [12]. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode metaheuristik memiliki potensi untuk menangani karakteristik PV yang memiliki beberapa titik maksimum. Selain algoritma MPPT, pemodelan sistem juga menjadi bagian penting dalam proses evaluasi. PSIM dapat digunakan untuk memodelkan sistem PV, DC-DC *Boost Converter*, dan algoritma MPPT secara terintegrasi. Shivrudraswamy *et al.* juga menggunakan PSIM dalam analisis dan implementasi MPPT pada sistem PV [16].

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih diperlukan evaluasi komparatif antara algoritma metaheuristik dan metode konvensional menggunakan konfigurasi sistem dan kondisi pengujian yang sama. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis performa GWO dan P&O pada satu kondisi UIC dan empat pola PSC. Evaluasi dilakukan berdasarkan daya rata-rata, *ripple* daya, dan efisiensi pendapatan daya untuk mengetahui kemampuan kedua algoritma dalam memperoleh dan mempertahankan titik operasi dengan daya tinggi.

Metodologi

1. Landasan Teori

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi komputer menggunakan perangkat lunak PSIM. Desain sistem yang dimodelkan terdiri dari 4 modul PV yang dihubungkan secara seri, yang mana keluaran dayanya disambungkan ke sirkuit *DC-DC Boost Converter* dan beban resistif. Sistem dikendalikan menggunakan dua variasi algoritma MPPT, yakni metode metaheuristik *Grey Wolf Optimization* (GWO) sebagai algoritma yang diusulkan dan metode konvensional *Perturb and Observe* (P&O) sebagai algoritma pembanding.

2. Parameter Sistem dan Skenario Pengujian

Setiap modul PV dirancang dengan kapasitas daya maksimum P_{max} sebesar 50 W, tegangan

V_{mp} 17,8 V, arus I_{mp} 2,81 A, tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) 21,8 V, serta arus hubung singkat (I_{sc}) 3,05 A pada kondisi uji standar (1000 W/m^2 dan suhu modul 25°C). Metode perancangan *Boost Converter* mengacu pada pendekatan berbasis resistansi MPP yang dikembangkan oleh Ayop dan Tan untuk diaplikasikan pada sistem PV [3]. Sirkuit *DC-DC Boost Converter* dikonfigurasi untuk beroperasi pada *Continuous Conduction Mode* (CCM) guna membatasi riak arus. Parameter kelistrikan konverter yang ditetapkan menggunakan frekuensi penyakelaran (f_{sw}) sebesar 25 kHz, nilai induktor (L) sebesar 233 μH, kapasitor masukan (C_{in}) sebesar 4670 μF, kapasitor keluaran (C_{out}) sebesar 186 μF, serta resistansi beban output (R_o) sebesar 15,83 Ω.

Untuk mengevaluasi performa algoritma dalam melacak GMPP secara optimal dan menghindari LMPP, pengujian divariasikan menjadi 1 skenario iradiasi seragam (UIC) dan 4 variasi skenario PSC. Konfigurasi nilai intensitas cahaya (W/m²) pada 4 modul PV di setiap skenario ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Iradiasi pada Setiap Skenario

No.	Skenario Uji	Iradiasi Panel Surya (W/m²)
1	UIC	1000-1000-1000-1000
2	PSC 1	1000-1000-1000-600
3	PSC 2	1000-800-800-600
4	PSC 3	1000-500-1000-500
5	PSC 4	800-400-600-200

3. Perancangan Algoritma GWO

Algoritma Grey Wolf Optimization (GWO) digunakan sebagai solusi optimasi metaheuristik untuk melacak GMPP. Dalam metode ini, proses pencarian dilakukan melalui simulasi perilaku berburu serigala abu-abu yang terbagi dalam hierarki sosial, yaitu *alpha* (α), *beta* (β), dan *delta* (Δ). Pada sistem MPPT ini, setiap agen "serigala" dalam populasi serigala merepresentasikan nilai duty cycle pada konverter. Proses pembaruan posisi serigala (pencarian titik optimal) dimodelkan melalui persamaan 1:

$$D_{gwo} = \left|C, X_p(t) - X(t)\right| \qquad (1)$$

$$X(t+1) = X_p(t) + A \cdot D_{gwo}$$

Dengan koefisien vektor dan didefinisikan pada persamaan 2:

$$A = |2a \cdot r_1 - a| \qquad (2)$$

$$C = 2 \cdot r_2$$

Di mana:

- X_p : posisi mangsa (titik daya tertinggi saat ini)
- X : posisi serigala (*duty cycle*)
- t : Iterasi saat ini
- A : komponen yang menurun secara linear dari 2 ke 0,
- *r1 & r2* : koefisien vector acak

Pada simulasi yang akan dilakukan, algoritma GWO menggunakan 6 agen pencari (*Grey Wolf*) dengan jumlah iterasi maksimum (t_{max}) sebanyak 10 iterasi pada setiap proses optimasi. Waktu sampling ditetapkan sebesar 0,006 s sehingga pembaruan duty cycle dilakukan secara periodik selama simulasi berlangsung. Sementara itu, koefisien acak r_1 dan r_2 diatur secara acak pada rentang 0 hingga 1 sesuai dengan mekanisme dasar algoritma GWO. Berikut parameter algoritma GWO yang akan digunakan disajikan pada Tabel 2

Tabel 2. Parameter Algoritma GWO

No.	Parameter	Nilai
1	Jumlah Agen Pencari (W)	6
2	Iterasi Maximum (Tmax)	10
3	Waktu Sampling	0.006s
4	Koefisien r1 & r2	Acak dari [0,1]

4. Analisis Data Hasil Simulasi

Tahap akhir penelitian adalah analisis komparatif terhadap hasil simulasi. Parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi performa algoritma adalah daya rata-rata, *ripple* daya, dan efisiensi pendapatan daya. Efisiensi MPPT (η) dihitung dengan membandingkan daya rata-rata yang berhasil dilacak oleh algoritma yang digunakan (P_{track}) terhadap daya maksimum yang diperoleh oleh panel surya (P_{max}). Persamaan efisiensi daya MPPT disajikan pada persamaaan 3

$$\eta = \frac{P_{track}}{P_{max}} . 100\% \quad (3)$$

lalu *Ripple* daya dihitung dari perbedaan antara daya maksimum dan minimum pada saat *steady-state* yang dapat dilihat pada persamaan 4:

$$P_{ripple} = P_{max} - P_{min} \quad (4)$$

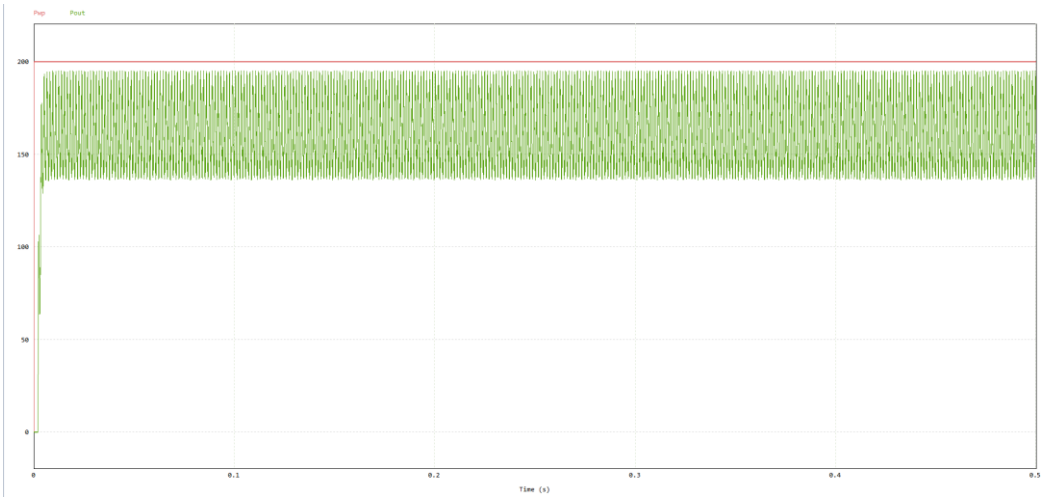
Di mana:

- P_{max} : daya maximum yang dilacak
- P_{min} : daya minimum yang dilacak

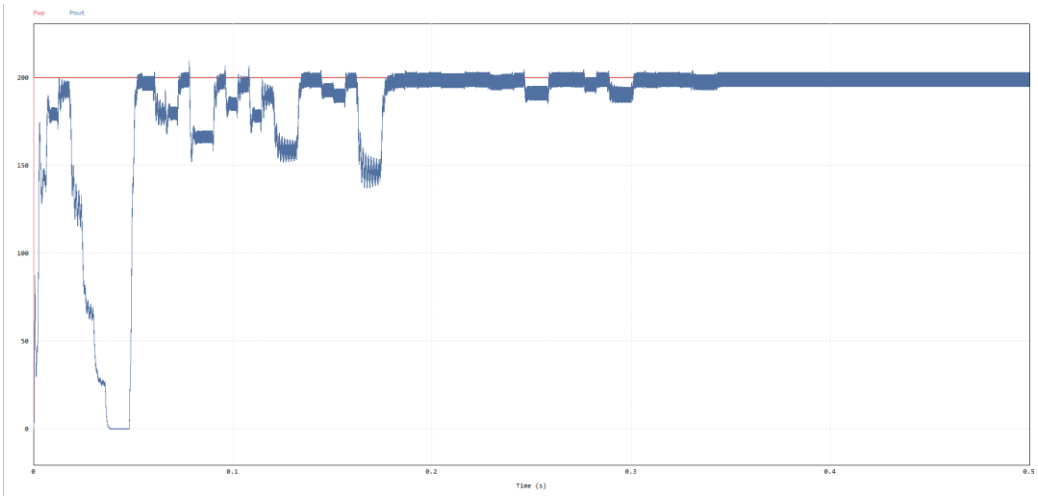
Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk membuktikan keunggulan algoritma metaheuristik *GWO* dibandingkan dengan metode konvensional P&O dalam hal efisiensi energi pada kondisi *UIC* dan *PSC*.

Hasil

Pengujian pertama dilakukan pada kondisi Uniform Irradiance Condition (UIC), yaitu seluruh modul PV menerima intensitas iradiasi sebesar 1000 W/m² dengan temperatur operasi 25°C. Pada kondisi ini, seluruh modul bekerja secara seragam sehingga kurva karakteristik daya hanya memiliki satu GMPP. Oleh karena itu, pengujian UIC digunakan sebagai kondisi dasar untuk mengevaluasi kemampuan algoritma MPPT dalam menemukan dan mempertahankan titik daya maksimum. Hasil simulasi sistem PV dengan algoritma P&O dan GWO pada skenario UIC dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1 Hasil Pengujian Algoritma P&O



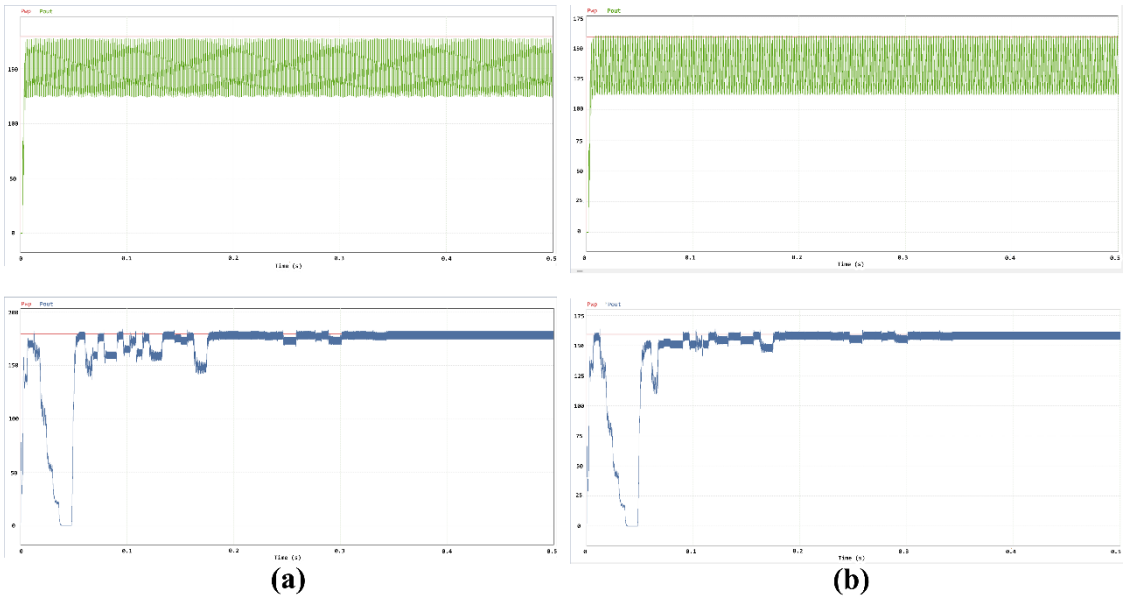
Gambar 2 Hasil Pengujian Algoritma GWO

Tabel 3. Hasil Pengujian Algoritma pada Kondisi UIC

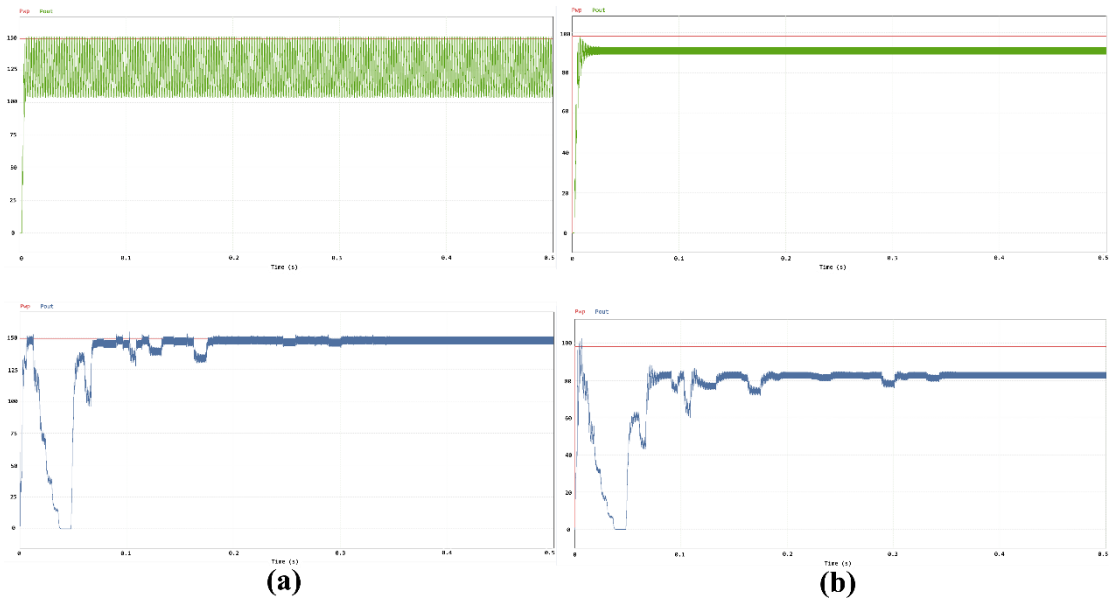
No.	Parameter	Algoritma P&O	Algoritma GWO
1	Daya rata-rata (W)	162,377 W	198,847 W
2	Ripple Daya (W)	58,06 W	6,98 W
3	Efisiensi Pendapatan Daya (%)	81,17%	99,40%

Berdasarkan Tabel 3, daya rata-rata yang dihasilkan oleh algoritma P&O lebih rendah daripada daya rata-rata yang dihasilkan oleh algoritma GWO. P&O menghasilkan 162,377 W dengan efisiensi 81,17%, sedangkan GWO menghasilkan 198,847 W dengan efisiensi 99,40%. Algoritma P&O melacak dengan cepat, namun daya yang dihasilkan terus berosilasi akibat siklus perturbasi yang tidak pernah berhenti, sehingga menyebabkan daya rata-rata pada sistem menurun. Berbeda halnya dengan GWO yang memberikan hasil pelacakan yang jauh lebih stabil. Setelah proses optimasi tuntas, GWO mampu memperkecil perubahan *duty cycle* dan mengunci keluaran dayanya di sekitar titik GMPP. Kestabilan yang fluktuasinya sangat rendah ini menjadi bukti bahwa GWO mampu mengatasi masalah osilasi daya yang kerap terjadi pada P&O.

Setelah menyelesaikan pengujian pada kondisi UIC, tahap pengujian selanjutnya difokuskan pada kondisi 4 PSC. Skenario PSC ini akan memberikan distribusi iradiasi yang tidak seragam pada modul PV, sehingga kurva daya yang terbentuk memiliki banyak titik puncak lokal (LMPP) dan hanya satu titik GMPP. Skenario ini dibuat untuk mensimulasikan permukaan panel yang tertutup oleh bayangan. Untuk menilai keandalan algoritma dalam melacak titik GMPP secara akurat, pengujian ini menerapkan empat tingkat skenario PSC yang bervariasi yang disajikan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 2 (a) Hasil Pengujian Algoritma P&O (hijau) dan GWO (biru) pada skenario PSC 1, (b) Hasil Pengujian Algoritma P&O (hijau) dan GWO (biru) pada skenario PSC 2



Gambar 3 (a) Hasil Pengujian Algoritma P&O (hijau) dan GWO (biru) pada skenario PSC 3, (b) Hasil Pengujian Algoritma P&O (hijau) dan GWO (biru) pada skenario PSC 4

Setelah simulasi dilakukan, data hasil dari setiap skenario kemudian ditampilkan dan diukur menggunakan *SimView*. Nilai keseluruhan hasil simulasi PSC 1 hingga 4 yang telah diukur disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Algoritma Pada Seluruh Skenario PSC

No.	Skenario	Daya Rata-Rata Algoritma P&O	Daya Rata-Rata Algoritma GWO	Ripple Daya Algoritma P&O	Ripple Daya Algoritma GWO	Efisiensi Pendapatan Daya Algoritma P&O	Efisiensi Pendapatan Daya Algoritma GWO
1	PSC 1	148,181 W	178,575 W	45,755 W	6,962 W	82,46%	99,38%
2	PSC 2	133,513 W	158,432 W	43,215 W	6,176 W	83,76%	99,39%
3	PSC 3	124,962 W	124,962 W	124,962 W	148,194 W	83,78%	99,36%
4	PSC 4	91,136 W	82,955 W	3,553 W	2,627 W	92,62%	84,30%

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa GWO secara umum mengungguli performa pelacakan pada berbagai kondisi PSC. Algoritma ini sukses mengekstrak daya yang lebih tinggi dan mempertahankan efisiensinya meski kurva daya memiliki *multi-peak*. Walau begitu, efektivitas GWO tampak berkurang saat masuk ke skenario bayangan terberat (PSC 4). Kerumitan area pencarian pada kondisi ekstrem ini membuat proses optimasi menjadi kurang optimal dalam menemukan titik optimum global.

Pembahasan

Pada kondisi UIC, kurva karakteristik daya panel surya hanya memiliki satu GMPP, sehingga proses pelacakan cukup mudah dilakukan. Pada kondisi ini, kedua algoritma mampu menemukan titik daya maksimum, namun karakteristik pelacakannya berbeda. Berdasarkan hasil simulasi, algoritma GWO memperoleh efisiensi pelacakan sebesar 99,38%, sedangkan algoritma P&O hanya mencapai 82,46%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa GWO mampu mempertahankan titik operasi di sekitar GMPP dengan lebih stabil, sedangkan algoritma P&O masih mengalami osilasi di sekitar titik maksimum akibat proses perturbasi yang dilakukan secara terus-menerus. Osilasi tersebut menyebabkan daya keluaran berfluktuasi sehingga menurunkan nilai daya rata-rata yang berhasil diperoleh sistem.

Pada kondisi PSC, perbedaan performa kedua algoritma menjadi lebih jelas. Ketika tingkat iradiasi pada sebagian modul panel surya berubah, kurva karakteristik daya berubah menjadi nonlinier, menghasilkan beberapa titik LMPP dan 1 GMPP. Karena proses pencarian algoritma tersebut hanya bergantung pada perubahan gradien daya di sekitar titik operasi, algoritma P&O cenderung berhenti pada titik maksimum lokal. Akibatnya, daya yang diperoleh tidak maksimal.

Sebaliknya, algoritma GWO melakukan proses pencarian menggunakan mekanisme optimasi berbasis populasi. Setiap individu memperbarui posisinya berdasarkan tiga solusi terbaik (*alpha*, *beta*, dan *delta*), sehingga proses pencarian tidak hanya terfokus pada satu titik operasi. Mekanisme eksplorasi dan eksploitasi tersebut memungkinkan algoritma keluar dari jebakan LMPP dan bergerak menuju GMPP, sehingga daya keluaran yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada PSC 1, PSC 2, dan PSC 3, algoritma GWO mampu mempertahankan efisiensi pelacakan yang relatif stabil pada kisaran 99%, sedangkan algoritma P&O hanya mencapai 82%. Konsistensi ini menunjukkan bahwa mekanisme optimasi GWO masih mampu menemukan solusi meskipun distribusi iradiasi berubah dan jumlah titik maksimum lokal meningkat. Sebaliknya, performa algoritma P&O tidak mengalami peningkatan yang signifikan karena hanya melakukan pertubasi daya.

Namun, pada hasil skenario PSC 4, performa algoritma GWO justru menunjukkan sebuah penurunan. Berdasarkan data pengujian, efisiensi pelacakan GWO merosot ke angka 84,30%, sementara algoritma P&O justru mampu bertahan di level 92,62%. Penurunan ini mengindikasikan bahwa semakin rumit pola iradiasi, proses optimasi untuk menemukan titik GMPP dalam batasan iterasi yang ditetapkan menjadi semakin berat. Banyaknya puncak daya

lokal serta tipisnya selisih nilai antarpuncak membuat fase eksplorasi GWO terhenti sebelum berhasil menuntaskan pencarian titik GMPP. Fenomena ini menegaskan bahwa tingkat keberhasilan algoritma metaheuristik GWO sangat bergantung pada penyesuaian parameter, seperti besar populasi, kuantitas iterasi, serta cara pembaruan posisi agen.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis performa algoritma MPPT pada sistem PV, penelitian ini menyimpulkan bahwa algoritma GWO memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan algoritma P&O dalam meningkatkan pendapatan daya pada sebagian besar kondisi operasi. Keunggulan tersebut ditunjukkan melalui kemampuan GWO mencapai efisiensi pelacakan sebesar 99,40% pada kondisi UIC serta mempertahankan efisiensi sekitar 99% pada sebagian besar skenario PSC . Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme optimasi berbasis populasi pada GWO lebih efektif dalam menemukan GMPP dan mengurangi kecenderungan terjebak pada LMPP dibandingkan dengan metode P&O yang hanya memperoleh efisiensi sekitar 82-83% akibat karakteristik osilasi di sekitar titik operasi serta keterbatasannya dalam membedakan titik maksimum lokal dan global. Namun demikian, pada kondisi PSC 4, performa GWO mengalami penurunan hingga 84,30%, lebih rendah dibandingkan dengan P&O dengan efisiensi daya 92,62%, yang menunjukkan bahwa efektivitas algoritma masih dipengaruhi oleh kompleksitas distribusi iradiasi serta parameter optimasi yang digunakan. Oleh karena itu, algoritma GWO berpotensi menjadi metode MPPT yang lebih andal untuk meningkatkan performa sistem PV pada kondisi lingkungan yang dinamis, meskipun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut agar kemampuan pencarian titik daya maksimum global tetap optimal pada pola bayangan yang sangat kompleks.

Daftar Pustaka

[1] M. H. Ali, M. Zakaria, and S. El-Tawab, “A comprehensive study of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-96247-5.

[2] M. Ahmed, I. Harbi, R. Kennel, J. Rodríguez, and M. Abdelrahem, “Maximum Power Point Tracking-Based Model Predictive Control for Photovoltaic Systems: Investigation and New Perspective,” *Sensors*, vol. 22, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22083069.

[3] R. Ayop and C. W. Tan, “Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications,” *Solar Energy*, vol. 160, pp. 322–335, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.016.

[4] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, “A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems,” 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2015.02.009.

[5] J. A. Dhanraj et al., "An effective evaluation on fault detection in solar panels," Energies, vol. 14, 2021, doi: 10.3390/en14227770.

[6] M. S. ENDİZ, “PERFORMANCE ANALYSIS OF P&O AND PSO MPPT ALGORITHMS FOR PV SYSTEMS UNDER PARTIAL SHADING,” *Konya Journal of Engineering Sciences*, pp. 84–99, Dec. 2023, doi: 10.36306/konjes.1359177.

[7] L. Guanghua, D. Jamro, A. Q. Rahimoon, D. A. Memon, Z. Bhatti, and S. H. H. Shah, “Comparative analysis of GWO MPPT with conventional techniques in shaded PV arrays,” *Results in Engineering*, vol. 27, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106881.

[8] C. H. Hussaian Basha and C. Rani, “Performance Analysis of MPPT Techniques for Dynamic Irradiation Condition of Solar PV,” *International Journal of Fuzzy*

Systems, vol. 22, no. 8, pp. 2577–2598, Nov. 2020, doi: 10.1007/s40815-020-00974-y.

[9] M. L. Katche, A. B. Makokha, S. O. Zachary, and M. S. Adaramola, “A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems,” Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16052206.

[10] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Matahari untuk PLTS di Indonesia," [Online]. Tersedia: https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/matahari-untuk-plts-di-indonesia. [Diakses: 27 November 2025]

[11] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

[12] T. Nagadurga, R. Devarapalli, and Ł. Knypiński, “Comparison of Meta-Heuristic Optimization Algorithms for Global Maximum Power Point Tracking of Partially Shaded Solar Photovoltaic Systems,” Algorithms, vol. 16, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/a16080376.

[13] K. Saidi, M. Maamoun, and M. Bounekhla, "Simulation and analysis of variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic power control," in Proceedings of the 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/GECS.2017.8066265.

[14] I. Winarno, L. Natasari, J. Teknik Elektro, U. Hang Tuah Surabaya Jalan Arief Rachman Hakim No, K. Sby, and J. Timur, “*Maximum Power Point Tracker* (MPPT) Berdasarkan Metode *Perturb And Observe* Dengan Sistem *Tracking* Panel Surya *Single Axis*,” [Online]. Tersedia: https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/1901. [Diakses: 26 Februari 2026]

[15] K. Y. Yap, C. R. Sarimuthu, and J. M. Y. Lim, “Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1043–1059, Nov. 2020, doi: 10.35833/MPCE.2020.000159.

[16] R. Shivrudraswamy, A. N. Shukla, and C. B. Chandrakala, “Design analysis and implementation of MPPT using PSIM,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 157–166, Oct. 2017. doi:10.1007/978-981-10-4286-7_16