

Modifikasi PSO Adaptif untuk MPPT Panel Surya pada Kondisi Partial Shading

Mochammad Reihan Pratama Putra¹, M Jasa Afroni², Arman³

¹Universitas Islam Malang

Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Islam Malang

Jl. MT Haryono 193 Malang

22201053022@unisma.ac.id, jasa.afroni@unisma.ac.id, arman@unisma.ac.id

Abstract

This study develops an adaptive Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of photovoltaic panels under partial shading. Partial shading produces multi-peak P-V characteristics with Local Maximum Power Points and one Global Maximum Power Point, making fixed-parameter PSO prone to premature convergence. The proposed method combines adaptive inertia weight, Time-Varying Acceleration Coefficients, stagnation detection, partial restart, and Elite Learning Strategy. Photovoltaic characteristics were obtained from measured voltage and current data of a 10 Wp monocrystalline panel and processed in Microsoft Excel to form I-V and P-V curves. Simulations were performed in MATLAB using identical scenarios for conventional and adaptive PSO. Twenty trials show that conventional PSO achieved 9.057 W average power, 91.15% efficiency, and 15.35 convergence iterations, whereas adaptive PSO achieved 9.935 W, 99.99% efficiency, and 9.55 iterations. The results indicate better tracking accuracy and faster convergence.

Keywords— MPPT, photovoltaic, partial shading, PSO, adaptive PSO, GMPP.

Abstraksi

Penelitian ini mengembangkan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) adaptif untuk Maximum Power Point Tracking (MPPT) panel surya pada kondisi partial shading. Partial shading menyebabkan kurva daya-tegangan memiliki beberapa puncak lokal dan satu puncak global, sehingga PSO dengan parameter tetap berpotensi terjebak pada Local Maximum Power Point. Metode yang diusulkan menggabungkan adaptive inertia weight, Time-Varying Acceleration Coefficients, stagnation detection, partial restart, dan Elite Learning Strategy. Data karakteristik panel surya diperoleh melalui pengukuran tegangan dan arus pada panel monocrystalline 10 Wp, kemudian diolah di Microsoft Excel untuk membentuk kurva I-V dan P-V sebagai dasar simulasi MATLAB. Pengujian dilakukan sebanyak 20 kali pada skenario yang sama. PSO konvensional menghasilkan rata-rata daya 9,057 W, efisiensi 91,15%, dan konvergensi 15,35 iterasi, sedangkan PSO adaptif mencapai 9,935 W, efisiensi 99,99%, dan konvergensi 9,55 iterasi.

Kata Kunci— MPPT, fotovoltaiik, partial shading, PSO, PSO adaptif, GMPP.

I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar karena berada di wilayah khatulistiwa. Intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi dan merata menjadikan sistem fotovoltaiik sebagai salah satu teknologi penting dalam pengembangan energi terbarukan. Pemanfaatan energi surya juga sejalan dengan kebutuhan peningkatan bauran energi baru dan terbarukan serta pengurangan ketergantungan terhadap sumber energi berbasis fosil. Dalam konteks tersebut, peningkatan kinerja panel surya menjadi isu penting agar daya yang dapat dimanfaatkan dari sistem fotovoltaiik semakin optimal [1], [2].

Salah satu kendala teknis pada sistem fotovoltaiik adalah partial shading. Kondisi ini terjadi ketika sebagian permukaan panel atau sebagian modul dalam rangkaian menerima intensitas penyinaran yang tidak sama akibat bayangan awan, bangunan, pepohonan, debu, atau objek lain. Perbedaan iradiasi tersebut menyebabkan karakteristik arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V) berubah dari bentuk single peak menjadi multi peak. Pada kondisi multi peak terdapat beberapa Local Maximum Power Point (LMPP) dan hanya satu Global Maximum Power Point (GMPP) yang harus ditemukan oleh sistem MPPT [3], [4].

Maximum Power Point Tracking (MPPT) digunakan untuk menjaga titik operasi panel surya

berada pada daya maksimum. Metode konvensional seperti Perturb and Observe serta Incremental Conductance banyak digunakan karena sederhana, tetapi mekanisme pencariannya bersifat lokal. Pada kurva P-V yang memiliki banyak puncak, metode tersebut berpotensi berhenti pada LMPP sehingga daya keluaran yang diperoleh tidak menjadi nilai optimum [4], [8]. Oleh karena itu, dibutuhkan algoritma optimasi yang memiliki kemampuan pencarian global.

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan algoritma metaheuristik yang sering digunakan untuk permasalahan MPPT karena mampu melakukan pencarian global pada ruang solusi. Dalam penerapannya, setiap partikel dapat merepresentasikan kandidat tegangan operasi atau duty cycle, sedangkan fungsi fitness dinyatakan sebagai daya keluaran panel surya. Walaupun memiliki kemampuan pencarian global, PSO konvensional dengan parameter tetap masih memiliki kelemahan, antara lain konvergensi yang tidak selalu cepat, munculnya osilasi di sekitar titik optimum, serta risiko terjebak pada puncak lokal ketika distribusi partikel kurang baik [5], [9].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penyesuaian parameter PSO secara adaptif dapat meningkatkan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi. Nilai inerti weight yang besar membantu partikel menjelajahi ruang pencarian secara luas, sedangkan nilai yang lebih kecil membantu memperhalus pencarian di sekitar solusi terbaik. Selain itu, perubahan koefisien akselerasi secara bertahap dapat mengatur pengaruh pengalaman individu dan pengalaman sosial partikel selama proses iterasi [6], [7].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini memodifikasi algoritma PSO menjadi PSO adaptif untuk MPPT panel surya pada kondisi partial shading. Modifikasi dilakukan melalui adaptive inertia weight, Time-Varying Acceleration Coefficients (TVAC), stagnation detection, partial restart, dan Elite Learning Strategy (ELS). Tujuan utama penelitian adalah membandingkan kinerja PSO konvensional dan PSO adaptif berdasarkan daya rata-rata yang diperoleh, efisiensi tracking, tegangan optimum, serta jumlah iterasi konvergensi pada simulasi MATLAB berbasis data hasil pengukuran panel surya.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi. Data karakteristik panel surya diperoleh melalui pengukuran tegangan dan arus keluaran panel, kemudian disimpan ke dalam Microsoft Excel. Data tersebut digunakan untuk membentuk kurva I-V dan P-V. Setelah kurva terbentuk, algoritma PSO konvensional dan PSO adaptif diuji pada ruang

pencarian yang sama sehingga perbandingan hasil dapat dilakukan secara objektif.

Panel surya yang digunakan adalah panel monocrystalline P-10W dengan daya nominal 10 Wp. Parameter kelistrikan yang digunakan meliputi tegangan rangkaian terbuka, arus hubung singkat, tegangan dan arus pada titik daya maksimum, jumlah sel, serta temperatur standar. Data spesifikasi tersebut digunakan sebagai acuan untuk memastikan bahwa rentang pencarian dan karakteristik yang digunakan dalam simulasi masih sesuai dengan karakteristik panel yang diuji.

Tabel 1. Parameter panel surya yang digunakan

Parameter	Nilai
Jenis modul	P-10W monocrystalline
Maximum Power (Pmax)	10 W
Open Circuit Voltage (Voc)	21,6 V
Short Circuit Current (Isc)	0,64 A
Maximum Power Voltage (Vmp)	17,4 V
Maximum Power Current (Imp)	0,57 A
Jumlah sel per modul	36
Cell temperature	25 °C

Daya keluaran panel dihitung dari hasil perkalian antara tegangan dan arus. Nilai daya tersebut digunakan sebagai fungsi objektif atau nilai fitness dalam proses optimasi MPPT. Hubungan dasar yang digunakan ditunjukkan pada (1).

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (1)$$

dengan P_{pv} adalah daya keluaran panel surya, V_{pv} adalah tegangan keluaran panel surya, dan I_{pv} adalah arus keluaran panel surya. Pada simulasi, data daya terhadap tegangan diinterpolasi sehingga algoritma dapat mengevaluasi nilai fitness pada setiap posisi partikel yang berada di dalam batas tegangan minimum dan maksimum.

Pada PSO konvensional, posisi partikel diperbarui menggunakan kecepatan yang dipengaruhi oleh tiga komponen, yaitu inertia weight, komponen kognitif, dan komponen sosial. Persamaan pembaruan kecepatan dan posisi partikel ditunjukkan pada (2) dan (3).

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1 \times r_1 \times (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \times r_2 \times (gbest - x_i(t)) \quad (2)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (3)$$

Parameter w merupakan inertia weight, c_1 dan c_2 merupakan koefisien akselerasi, r_1 dan r_2 merupakan bilangan acak antara 0 sampai 1, $pbest$ merupakan solusi terbaik masing-masing partikel, dan $gbest$ merupakan solusi terbaik populasi. Pada penelitian ini, PSO konvensional menggunakan nilai parameter tetap sehingga pola eksplorasi dan eksploitasi tidak berubah selama iterasi berjalan.

Algoritma PSO adaptif dirancang untuk mengurangi kelemahan parameter tetap. Pada tahap awal, nilai inertia weight dibuat relatif besar agar partikel dapat menjelajahi ruang pencarian lebih luas. Ketika solusi semakin mendekati target, nilai inertia weight diturunkan agar pencarian lebih stabil. TVAC digunakan untuk mengubah $c1$ dan $c2$ secara bertahap sehingga pengaruh pencarian individu lebih dominan pada awal iterasi dan pengaruh solusi global lebih kuat pada tahap akhir.

Mekanisme stagnation detection digunakan untuk mendeteksi kondisi ketika nilai gbest tidak mengalami peningkatan berarti dalam beberapa iterasi. Jika stagnasi terdeteksi, partial restart dilakukan pada sebagian partikel dengan performa terendah agar ruang pencarian kembali terbuka. Sementara itu, Elite Learning Strategy digunakan untuk memperbaiki solusi terbaik di sekitar gbest melalui pencarian lokal sehingga akurasi pencapaian GMPP dapat meningkat.

Tabel 2. Parameter utama PSO konvensional dan PSO adaptif

Parameter	PSO Konvensional	PSO Adaptif
Jumlah partikel	4	4
Iterasi maksimum	30	30
Batas tegangan	0-66 V	0-66 V
Inertia weight	$w = 0,4$	$w = 0,25-0,95$
Koefisien kognitif	$c1 = 1,6$	$c1 = 0,3-2,2$
Koefisien sosial	$c2 = 0,8$	$c2 = 0,6-2,4$
Mekanisme tambahan	-	TVAC, restart, ELS

Kinerja algoritma dievaluasi menggunakan empat indikator, yaitu daya terbaik yang ditemukan, tegangan terbaik atau V_{gbest} , jumlah iterasi menuju konvergensi, dan efisiensi tracking. Efisiensi tracking dihitung dengan membandingkan daya yang ditemukan algoritma terhadap target GMPP dari kurva P-V, sebagaimana ditunjukkan pada (4).

$$\eta = (P_{gbest} / P_{GMPP}) \times 100\% \quad (4)$$

Pengujian dilakukan sebanyak 20 kali untuk setiap algoritma karena PSO bersifat stokastik dan hasilnya dapat dipengaruhi oleh inisialisasi partikel secara acak. Kedua algoritma menggunakan data, batas tegangan, jumlah partikel, dan iterasi maksimum yang sama sehingga perbedaan hasil terutama berasal dari mekanisme adaptif yang diterapkan.

Secara umum, prosedur simulasi diawali dengan mengimpor data Excel yang berisi pasangan tegangan, arus, dan daya. Data yang tidak valid dihapus, kemudian data diurutkan berdasarkan nilai tegangan agar proses interpolasi berjalan stabil. Fungsi interpolasi P-V selanjutnya digunakan sebagai fungsi fitness, sehingga setiap

kandidat tegangan yang dibangkitkan oleh partikel dapat langsung dievaluasi menjadi nilai daya.

Pada setiap running, partikel diinisialisasi secara acak di dalam rentang V_{min} sampai V_{max} . Setelah nilai fitness setiap partikel dihitung, algoritma menentukan pbest dan gbest. Selanjutnya, kecepatan partikel dibatasi agar perubahan posisi tidak terlalu besar. Pembatasan kecepatan ini penting pada simulasi berbasis data pengukuran karena posisi yang bergerak terlalu jauh dapat melewati daerah puncak dan menyebabkan proses pencarian menjadi tidak stabil.

Skenario partial shading digunakan untuk menguji kemampuan algoritma pada kondisi kurva P-V yang tidak sederhana. Pada skenario ringan, perbedaan iradiasi relatif kecil sehingga puncak lokal belum terlalu dominan. Pada skenario sedang dan berat, perbedaan iradiasi semakin besar dan karakteristik multi-puncak menjadi semakin jelas. Semakin banyak dan semakin tinggi puncak lokal yang muncul, semakin besar pula kemungkinan algoritma dengan parameter tetap berhenti pada LMPP.

Tabel 3. Skenario pengujian partial shading

Skenario	Kondisi pengujian
Normal	Tanpa bayangan, kurva cenderung single peak
PSC 1	Partial shading ringan
PSC 2	Partial shading sedang
PSC 3	Partial shading berat

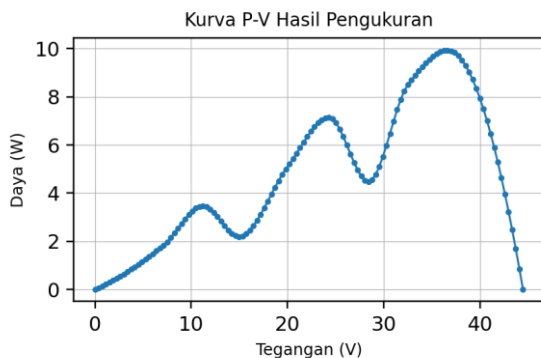
Evaluasi tidak hanya melihat nilai daya tertinggi pada satu kali running, tetapi menggunakan rata-rata dari 20 kali running. Pendekatan ini diperlukan karena PSO menggunakan bilangan acak dalam inisialisasi dan pembaruan partikel. Dengan pengujian berulang, kinerja algoritma dapat dinilai berdasarkan konsistensi, bukan hanya berdasarkan hasil terbaik yang muncul secara kebetulan.

Kondisi konvergen ditentukan ketika nilai gbest telah mencapai daerah target atau ketika perubahan daya terbaik sudah sangat kecil. Pada PSO adaptif, kondisi near target dan stagnasi juga digunakan sebagai dasar penguncian parameter agar pergerakan partikel tidak terus berosilasi di sekitar titik optimum. Oleh sebab itu, indikator iterasi konvergensi menjadi parameter penting untuk menilai seberapa cepat algoritma mencapai titik kerja yang stabil.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran karakteristik panel surya menghasilkan data tegangan, arus, dan daya. Kurva P-V dari data pengukuran menunjukkan bahwa daya meningkat seiring bertambahnya tegangan hingga mencapai titik maksimum, kemudian menurun ketika tegangan mendekati batas rangkaian terbuka. Berdasarkan data

pengukuran, daya maksimum berada di sekitar 9,936 W pada tegangan 36,618 V. Kurva ini menjadi dasar pembentukan fungsi fitness pada simulasi MATLAB.



Gambar 1. Kurva P-V hasil pengukuran panel surya

Skenario partial shading dibentuk untuk merepresentasikan kondisi iradiasi yang tidak seragam. Pada kondisi normal, kurva P-V cenderung memiliki satu puncak. Pada PSC 1, PSC 2, dan PSC 3, perbedaan iradiasi antarbagian panel menyebabkan kurva P-V membentuk karakteristik multi-puncak. Kondisi ini menjadi lebih sulit bagi algoritma optimasi karena puncak lokal dapat menarik partikel menuju solusi yang bukan merupakan GMPP.

Pada PSO konvensional, proses pencarian mampu meningkatkan nilai gbest pada iterasi awal, tetapi hasil akhir masih menunjukkan variasi. Beberapa eksekusi berhasil mendekati GMPP, sedangkan beberapa eksekusi lain berhenti pada nilai daya yang lebih rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa PSO konvensional masih dipengaruhi oleh posisi awal partikel dan dapat terjebak pada LMPP ketika eksplorasi tidak cukup luas.

Pada PSO adaptif, nilai daya yang diperoleh lebih konsisten mendekati target GMPP. Adaptive inertia weight menjaga kemampuan eksplorasi pada tahap awal, sedangkan penurunan inertia weight pada tahap akhir membuat partikel lebih stabil saat mendekati solusi terbaik. TVAC juga membantu menggeser perilaku algoritma dari pencarian individu menuju pencarian yang lebih terarah pada solusi global. Ketika stagnasi terjadi, partial restart dan ELS membantu mengurangi kemungkinan partikel berhenti pada LMPP.

Tabel 4. Rata-rata hasil pengujian 20 kali running

Indikator	PSO Konvensional	PSO Adaptif
Rata-rata GMPP	9,057 W	9,935 W
Rata-rata Vgbest	33,079 V	36,617 V
Rata-rata iterasi	15,35	9,55
Rata-rata efisiensi	91,15%	99,99%

Tabel 5. Ringkasan daya dan iterasi pada setiap running

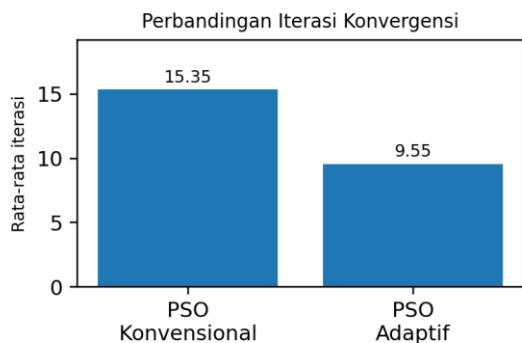
Run	PSO (W/iter) Konv.	PSO (W/iter) Adaptif
1	9,935 / 29	9,935 / 17
2	9,931 / 10	9,935 / 7
3	7,151 / 30	9,935 / 8
4	9,935 / 1	9,935 / 3
5	7,151 / 30	9,935 / 3
6	7,151 / 30	9,935 / 10
7	9,935 / 7	9,935 / 12
8	9,935 / 1	9,935 / 6
9	8,014 / 30	9,935 / 4
10	9,935 / 9	9,935 / 12
11	7,151 / 30	9,935 / 10
12	9,935 / 5	9,935 / 19
13	9,935 / 3	9,935 / 13
14	7,151 / 30	9,935 / 22
15	9,935 / 7	9,935 / 8
16	9,935 / 6	9,935 / 6
17	9,935 / 2	9,935 / 3
18	8,214 / 30	9,935 / 1
19	9,935 / 9	9,935 / 8
20	9,933 / 8	9,935 / 19

Tabel 5 memperlihatkan bahwa variasi hasil PSO konvensional lebih besar dibandingkan PSO adaptif. Pada beberapa running, PSO konvensional berhenti pada daya 7,151 W atau 8,014 W dengan iterasi mencapai batas maksimum. Pola tersebut mengindikasikan bahwa partikel berada pada daerah puncak lokal dan tidak berhasil berpindah ke puncak global. Sebaliknya, PSO adaptif menghasilkan nilai daya yang hampir sama pada seluruh running sehingga lebih konsisten dalam menemukan GMPP.

Tabel 4 menunjukkan bahwa PSO adaptif menghasilkan rata-rata daya 9,935 W, sedangkan PSO konvensional menghasilkan rata-rata daya 9,057 W. Selisih daya rata-rata sebesar 0,878 W menunjukkan peningkatan sekitar 9,69% terhadap hasil PSO konvensional. Efisiensi tracking juga meningkat dari 91,15% menjadi 99,99%, atau naik 8,84 poin persentase. Nilai Vgbest pada PSO adaptif sebesar 36,617 V juga lebih dekat dengan tegangan pada titik daya maksimum hasil pengukuran.

Dari sisi kecepatan konvergensi, PSO adaptif membutuhkan rata-rata 9,55 iterasi, sedangkan PSO konvensional membutuhkan 15,35 iterasi. Dengan demikian, jumlah iterasi konvergensi berkurang sekitar 37,78%. Penurunan jumlah

iterasi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme adaptif tidak hanya meningkatkan akurasi pencarian GMPP, tetapi juga mempercepat proses pencarian solusi optimum.



Gambar 2. Perbandingan rata-rata iterasi konvergensi

Perbedaan hasil tersebut dapat dijelaskan melalui karakteristik eksplorasi dan eksploitasi algoritma. PSO konvensional menggunakan nilai w , c_1 , dan c_2 yang tetap. Kombinasi parameter tetap dapat sesuai pada kondisi tertentu, tetapi tidak selalu mampu menyesuaikan diri ketika partikel berada pada daerah pencarian yang kompleks. Akibatnya, partikel dapat cepat berkumpul pada puncak lokal dan kehilangan kemampuan untuk mencari puncak lain yang lebih tinggi.

Sebaliknya, PSO adaptif mengubah parameter sesuai perkembangan proses pencarian. Ketika solusi masih jauh dari target, eksplorasi diperkuat agar partikel tidak terlalu cepat berkumpul. Ketika solusi sudah mendekati GMPP, eksploitasi diperkuat untuk memperhalus pencarian di sekitar gbest. Strategi ini sesuai dengan kebutuhan MPPT pada kurva P-V multi-puncak, karena algoritma harus mampu menjelajahi beberapa daerah kandidat puncak sekaligus tetap cepat mengunci daerah dengan daya terbesar.

Mekanisme stagnation detection juga berperan penting. Pada kurva partial shading, partikel yang telah terkumpul di sekitar LMPP dapat menyebabkan nilai gbest berhenti meningkat. Partial restart memberikan peluang bagi partikel terburuk untuk kembali menjelajahi daerah lain, sedangkan ELS menyempurnakan hasil di sekitar solusi terbaik. Kombinasi mekanisme tersebut membuat PSO adaptif lebih stabil dalam menemukan GMPP dan mengurangi variasi hasil antar-running.

Berdasarkan keseluruhan hasil, modifikasi PSO adaptif terbukti lebih efektif dibandingkan PSO konvensional dalam simulasi MPPT berbasis data pengukuran panel surya. Keunggulan PSO adaptif terlihat pada tiga aspek utama, yaitu akurasi pencapaian daya maksimum, efisiensi tracking, dan kecepatan konvergensi. Hasil ini

mendukung penggunaan strategi adaptif pada algoritma metaheuristik untuk mengatasi karakteristik nonlinier dan multi-puncak pada sistem fotovoltaik di bawah kondisi partial shading.

IV. KESIMPULAN

Data karakteristik panel surya berupa tegangan, arus, dan daya berhasil digunakan untuk membentuk kurva I-V dan P-V sebagai dasar simulasi MPPT pada MATLAB. Kondisi partial shading menyebabkan kurva P-V memiliki beberapa puncak lokal dan satu puncak global, sehingga proses pelacakan daya maksimum menjadi lebih kompleks dibandingkan kondisi iradiasi seragam.

Hasil pengujian 20 kali menunjukkan bahwa PSO konvensional memperoleh rata-rata daya 9,057 W dengan efisiensi 91,15% dan rata-rata konvergensi 15,35 iterasi. PSO adaptif memperoleh rata-rata daya 9,935 W dengan efisiensi 99,99% dan rata-rata konvergensi 9,55 iterasi. Dengan demikian, PSO adaptif meningkatkan daya rata-rata sekitar 9,69% dan mengurangi jumlah iterasi konvergensi sekitar 37,78% dibandingkan PSO konvensional.

Peningkatan kinerja tersebut dipengaruhi oleh adaptive inertia weight, TVAC, stagnation detection, partial restart, dan ELS yang membuat proses pencarian lebih seimbang antara eksplorasi dan eksploitasi. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan implementasi real time pada perangkat keras, menambahkan variasi skenario partial shading, serta menguji algoritma pada sistem dengan konverter DC-DC agar performa MPPT dapat divalidasi pada kondisi operasi aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Sampe, Y. Kusdiah, M. Sriwati, and S. Dharma Yadi Makkassar, "Analisis kinerja sistem panel surya berbasis Maximum Power Point Tracking (MPPT) dalam kondisi cuaca tropis," *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, vol. 4, no. 2, pp. 8276-8282, 2025, doi: 10.31004/jerkin.v4i2.3165.
- [2] I. Soesanti and R. Syahputra, "Analisis kinerja metode fuzzy teroptimasi PSO untuk strategi kendali MPPT pada sistem solar photovoltaic," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 98-108, 2021, doi: 10.15294/jte.v13i2.33477.
- [3] E. H. Elinda, I. Setiawan, and E. W. Sinuraya, "Perancangan pencarian titik daya maksimum panel surya menggunakan boost converter dengan algoritma Firefly," *Transient*, vol. 10, no. 1, n.d.
- [4] E. W. Mukti, A. Risdiyanto, A. A. Kristi, dan R. Darussalam, "Particle Swarm Optimization (PSO) based photovoltaic MPPT algorithm under the partial shading condition," *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, vol. 23, no. 2, hlm. 99, 2023, doi: 10.55981/jet.552.
- [5] R. Bennia, C. Larbes, dan F. Belhachat, "Efisiensi MPPT dalam susunan PV dalam kondisi bayangan parsial: Analisis komparatif algoritma PSO dan P&O," *Jurnal Ilmu Teknik ENP*, vol. 5, no. 1, hlm. 37-42, 2025, doi: 10.53907/enpesj.v5i1.306.

- [6] E. S. Wirateruna, M. J. Afroni, dan A. F. Ayu, "Implementasi algoritma PSO pada sistem PV MPPT menggunakan Arduino Uno di bawah PSC," *Jurnal Internasional Kecerdasan Buatan & Robotika*, vol. 5, no. 1, hlm. 13-20, 2023, doi: 10.25139/ijair.v5i1.6029.
- [7] A. Putra, P. Asri, F. Romadloni, R. R. Arnestanta, and Z. M. A. Putra, "Penerapan algoritma Particle Swarm Optimization untuk meningkatkan efisiensi daya keluaran panel surya," *TRIAC*, n.d.
- [8] D. M. Noor, E. S. Wirateruna, and B. M. Basuki, "Implementasi teknik interkoneksi cross-tied panel surya dan Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) dalam kondisi partial shading," *Science Electro*, n.d.
- [9] B. Ayeb, Y. Soufi, D. Ounnas, A. Kouzou, dan D. Guiza, "Optimasi Kawanan Partikel Adaptif dari sistem fotovoltaik di bawah bayangan parsial," *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 72, no. 1, hlm. 30-38, 2024, doi: 10.46904/eea.24.72.1.1108004.
- [10] D. Sooriamoorthy, A. Manoharan, SK Sivanesan, KL Soon, ACH Cheong, dan SKS Perumal, "Mengoptimalkan pelacakan titik daya maksimum surya dengan PSO adaptif: Analisis komparatif strategi berat inersia dan koefisien percepatan," *Hasil dalam Teknik*, vol. 27, Seni. No. 106429, 2025, DOI: 10.1016/J.Rineng.2025.106429.
- [11] H. Alhusseini, LM Abdali, HA Issa, dan V. I. Velkin, "Algoritma MPPT kontrol prediktif berbasis optimasi kawanan partikel adaptif untuk sistem PV dalam kondisi bayangan parsial," *Hasil dalam Teknik*, vol. 28, Seni. No. 107419, 2025, DOI: 10.1016/J.Rineng.2025.107419.
- [12] E. Jamiyanti, S. W. Jannah, and F. Hasan, "Perbandingan performa optimasi MPPT menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization dan Firefly Algorithm pada photovoltaic dalam kondisi bayangan parsial," *AKIRATECH: Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 2, 2024.
- [13] E. Rizqi dan K. Pradani, "Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada topologi DC-DC boost converter sistem fotovoltaik," *Jurnal Teknologi Mekanik dan Listrik*, vol. 3, no. 2, 2024.
- [14] E. S. Ward, A. Yahia, N. Gad, dan M. Rabeh, "Efek radiasi matahari dan suhu pada karakteristik modul fotovoltaik menggunakan metode beban kapasitif," *Menoufia Journal of Electronic Engineering Research*, vol. 32, no. 1, n.d.
- [15] A. S. Hadi, T. Alawiy, and E. S. Wirateruna, "Optimasi PV dengan metode MPPT berbasis algoritma genetika," n.d.