SNESTIK

Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika

https://ejurnal.itats.ac.id/snestik dan https://snestik.itats.ac.id

Informasi Pelaksanaan :
SNESTIK V - Surabaya, 26 April 2025
Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

Informasi Artikel:
DOI : 10.31284/p.snestik.2025.7552

Prosiding ISSN 2775-5126

Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi-Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
Gedung A-ITATS, Jl. Arief Rachman Hakim 100 Surabaya 60117 Telp. (031) 5945043
Email: snestik@itats.ac.id

Optimalisasi MPPT Photovoltaic Seri-Paralel dengan Kondisi Berbayang

Haris Kurniawan, Wahyu Setyo Pambudi, Novian Patria Uman Putra, Misbahul Munir, Akhmad Fahruzi.

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi ITATS

e-mail: hariskurniawan12345@gmail.com

ABSTRACT

The depletion of fossil fuel reserves has accelerated the shift toward renewable energy sources, with solar energy via photovoltaic (PV) systems being a prominent solution. However, under partial shading conditions, conventional Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods often fail, becoming trapped at local power peaks. This study aims to optimize PV output power using a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm integrated with MPPT. Simulations were conducted in MATLAB Simulink on a series-parallel PV configuration with irradiance variations of 500–1000 W/m² and a constant temperature of 25°C. Experimental results show that prior to PSO optimization, the system achieved a maximum power of 862.7 W but exhibited instability. After optimization, the system reached a peak power of 736.5 W with a more stable output curve. The maximum voltage recorded was 197.13 V and the highest current was 3.7 A. The implementation of the MPPT-PSO algorithm significantly improved output stability despite a slight decrease in peak power, making it a viable solution under partial shading conditions.

Keywords: *photovoltaic, MPPT, PSO.*

ABSTRAK

Penurunan cadangan energi fosil mendorong pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya energi surya melalui sistem photovoltaic (PV). Namun, efisiensi sistem PV menurun signifikan pada kondisi berbayang parsial karena metode konvensional Maximum Power Point Tracking (MPPT) sering terjebak pada titik puncak lokal. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan daya keluaran PV menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) yang dikombinasikan dengan MPPT. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink pada konfigurasi PV seri-paralel dengan variasi iradiasi 500–1000 W/m² dan suhu konstan 25°C. Hasil percobaan menunjukkan bahwa daya maksimum sebelum optimasi PSO mencapai 862,7

W namun bersifat fluktuatif, sedangkan setelah optimasi, daya puncak sebesar 736,5 W diperoleh dengan pola grafik yang lebih stabil. Tegangan maksimum pasca-optimasi tercatat 197,13 V dan arus mencapai 3,7 A. Implementasi algoritma PSO terbukti meningkatkan kestabilan keluaran sistem meskipun terjadi penurunan daya puncak, menjadikannya solusi efektif untuk kondisi berbayang.

Kata kunci: Photovoltaic, MPPT, PSO.

PENDAHULUAN

Panel surya merupakan teknologi konversi energi terbarukan yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui prinsip efek fotovoltaik. Efisiensi konversi energi pada panel surya sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari dan suhu permukaan modul. Variabilitas alami seperti pergerakan matahari dan kondisi cuaca menyebabkan fluktuasi dalam intensitas cahaya yang diterima, sehingga memengaruhi keluaran daya [1]. Dalam konfigurasi sistem fotovoltaik (PV) seri-paralel, perubahan sebagian radiasi (*partial shading*) sering menimbulkan fenomena multi-peak pada kurva daya, sehingga titik daya maksimum (*Maximum Power Point*, MPP) sulit dicapai secara konsisten [2].

Maximum Power Point Tracking (MPPT) adalah metode yang digunakan untuk menjaga operasi sistem PV agar selalu berada pada titik daya maksimum [3][4]. Beberapa pendekatan konvensional seperti *Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (INC), Hill Climbing (HC),* dan *Fuzzy Logic Control* telah digunakan secara luas[5][6][7]. Namun, dalam kondisi partial shading, metode konvensional ini cenderung terjebak pada titik puncak lokal (*local maxima*) dan gagal menemukan titik puncak global (*global maxima*), yang mengakibatkan penurunan efisiensi daya sistem sebesar 10–30% tergantung pada tingkat keteduhan dan konfigurasi array [8].

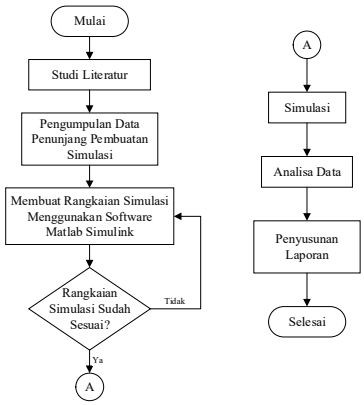
Upaya untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan berbasis *metaheuristic optimization*, khususnya Particle Swarm Optimization (PSO), telah dikembangkan dan terbukti efektif. PSO meniru perilaku sosial kawanan partikel dalam menemukan posisi optimal di ruang solusi dan dikenal memiliki konvergensi yang cepat, kestabilan numerik tinggi, serta efisiensi pencarian global yang baik serta dapat mengurangi fluktuasi daya hingga 60% dibanding metode konvensional pada skenario partial shading [9]. Selain itu, penerapan PSO juga mampu meningkatkan efisiensi pelacakan MPPT hingga 95,3% dengan waktu konvergensi lebih cepat dari 0,25 detik [10].

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan algoritma PSO yang diintegrasikan dengan MPPT dalam sistem PV berkonfigurasi seri-paralel yang mengalami kondisi berbayang parsial. Tujuan utama adalah untuk memperoleh performa keluaran daya maksimum dengan waktu stabilisasi dan respons transien yang lebih cepat. Pada simulasi awal, sistem PV tanpa optimasi PSO hanya mencapai kestabilan daya sebesar 485,7 W, sementara setelah dioptimasi menggunakan PSO, daya maksimum yang lebih stabil dapat dicapai, yakni 736,5 W. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan algoritma MPPT berbasis PSO dalam aplikasi sistem energi surya yang beroperasi pada kondisi lingkungan tidak ideal.

METODE

Pada tahap ini, referensi dikumpulkan dari berbagai sumber terkait dengan MPPT menggunakan metode PSO sebagai optimasilasasi. Sumber yang digunakan seperti buku, *handbook*, jurnal ilmiah, *website* yang diperlukan untuk mengetahui rangkaian-rangkaian simulasi, serta dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Pada penelitian ini juga mengumpulkan data iradiasi dan suhu temperatur sebagai *input* panel surya pada simulasi. Pengumpulan data ini dapat dicari pada jurnal, buku maupun penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. perancangan rangkaian simulasi dari sebuah sistem MPPT yang dioptimalkan dengan algoritma PSO dengan memasukkan data yang sudah didapatkan sebelumnya. Dalam pelaksanaan penelitian ini alurnya seperti pada gambar 1, simulasi pada penelitian ini menggunakan *software* Matlab Simulink.

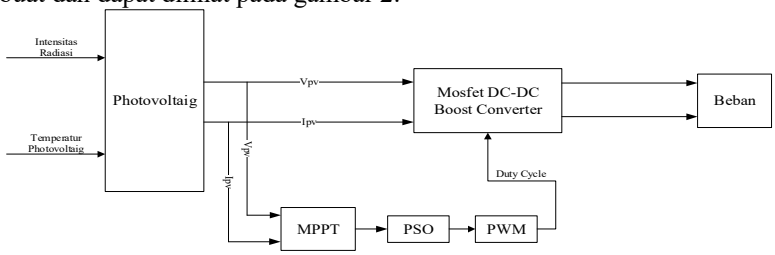
Data dari penelitian ini dianalisa dari hasil keluaran daya maupun keluaran tegangan dari *boost converter* yang telah di optimalkan dengan algoritma PSO. Hasil yang didapatkan ini memberikan referensi untuk mengoptimalkan keluaran daya dari panel surya.



Gambar 1 *FlowChart* Tahapan Penelitian

Blok Diagram Sistem

Dalam penelitian, peneliti membuat blok diagram sistem dengan tujuan untuk acuan sistem yang akan dibuat dan dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem

Perancangan Simulasi MPPT PSO

Perancangan simulasi MPPT dengan menggunakan metode PSO terhubung dengan DC-DC *bosst converter* untuk menjaga keluaran daya panel surya pada titik daya maksimum. MPPT dengan metode PSO akan diprogram menggunakan Matlab *function* dengan kontrol PSO sebagai imputan PWM untuk DC-DC *boost converter*.

Data Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa data pada tabel 1, tabel 2 dan tabel 3 yang menjadi panduan dalam menunjang penelitian ini yaitu data spesifikasi *photovoltaic* yang digunakan. Selain itu pada penelitian ini data input iradiasi dan temperatur untuk *photovoltaic* digunakan pada simulasi.

Tabel 1. Spesifikasi Photovoltaic

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Daya Maksimum (Pmax)	249	W
2	Tegangan *open circuit* (Voc)	36.8	V
3	Arus hubung singkat (Isc)	8.83	A
4	Tegangan maksimum (Vmp)	30	V
5	Arus maksimum (Imp)	8.3	A
6	Jumlah *cell*	60	

Tabel 2. Data Iradiasi

	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Data 6
Panel 1	1000	1000	800	500	800	1000
Panel 2	800	500	500	500	800	1000
Panel 3	1000	1000	800	500	800	1000
Panel 4	800	500	500	500	800	1000

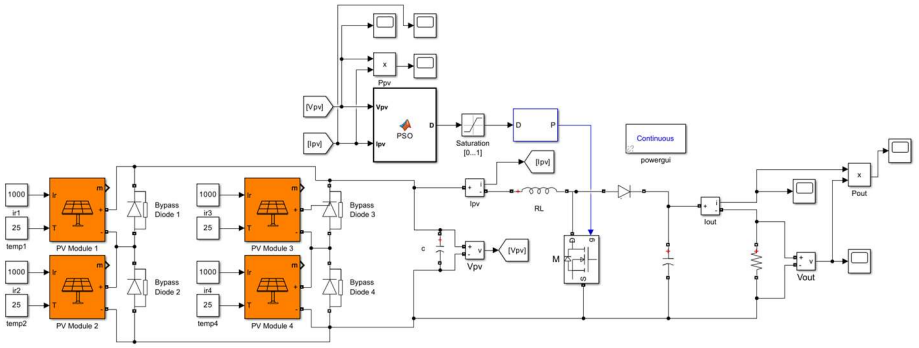
Tabel 3. Data Temperatur

	Data 1	Data 2	Data 3	Data 4	Data 5	Data 6
Panel 1	25	25	25	25	25	25
Panel 2	25	25	25	25	25	25
Panel 3	25	25	25	25	25	25
Panel 4	25	25	25	25	25	25

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Simulasi

Sebelum merancang rangkaian simulasi, pencarian data terkait dengan spesifikasi panel surya yang digunakan, nilai iradiasi dan temperatur panel, nilai komponen dari induktor, kapasitor, dioda, mosfet, dan resistor yang merupakan bagian komponen dari *boost-converter*, serta program PSO yang akan digunakan perlu dilakukan terlebih dahulu. Hal ini dilakukan agar mempermudah peneliti dalam melakukan penelitian yang akan dilakukan. Seletah itu, komponen yang diperlukan dari matlab simulink akan dirangkai dengan acuan dari data yang telah diperoleh sehingga menghasilkan rangkaian simulasi yang dapat dilihat pada gambar 3 dibawah ini.

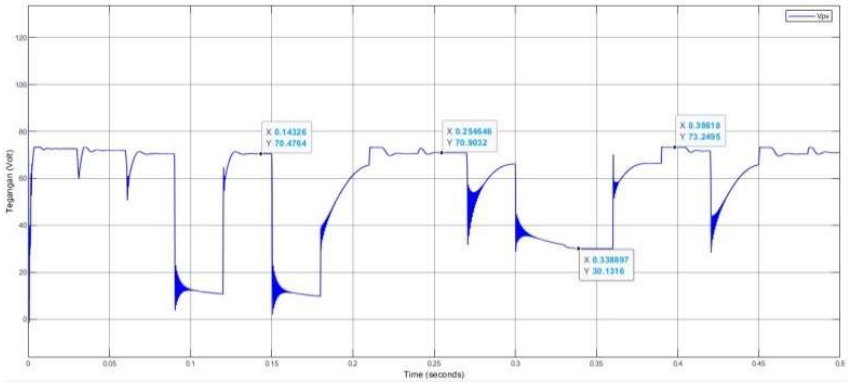


Gambar 3 Rangkaian Simulasi

Hasil Pengukuran Tegangan Pada Kondisi Berbayang Sebelum Menggunakan PSO

Percobaan Data 1

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan pertama dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 800 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 800 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan pertama dapat dilihat pada gambar 4.

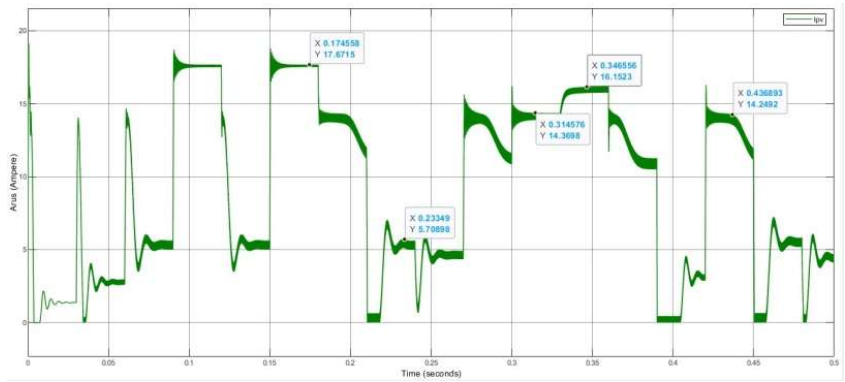


Gambar 4 Tegangan Keluaran PV Percobaan 1

Dari gambar 4 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran tegangan dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan yang masih banyak. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya masih belum melalui proses optimasi dengan program PSO dan hanya murni keluaran yang dihasilkan dari panel surya. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 1 yaitu nilai tegangan stabil terlama berada pada 70 sampai 71 Volt dengan waktu penstabilan dari 0,22 sampai 0,26 detik setelah simulasi dijalankan, diikuti dengan nilai stabil terendah terlama berada pada 30 Volt dengan waktu penstabilan dimulai dari 0,32 sampai 0,34 detik setelah simulasi dijalankan. Tegangan tertinggi yang dihasilkan berada pada 73,2 Volt pada waktu 0,4 detik setelah simulasi dijalankan.

Hasil Pengukuran Arus Sebelum pada Kondisi Berbayang Menggunakan PSO
Percobaan Data 1

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan pertama dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 800 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 800 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan pertama dapat dilihat pada gambar 5.



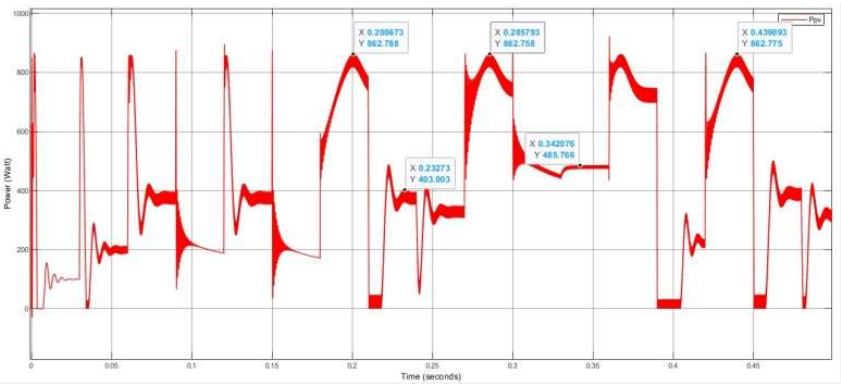
Gambar 5 Arus Keluaran PV Percobaan 1

Dari gambar 5 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran arus dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan yang masih banyak. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya masih belum melalui proses optimasi dengan program PSO dan hanya murni keluaran yang dihasilkan dari panel surya. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 1 yaitu nilai arus stabil terlama berada pada 14,3 sampai 16,2 Ampere dengan waktu penstabilan dari 0,31 sampai 0,35 detik setelah

simulasi dijalankan, diikuti dengan nilai stabil terendah terlama berada pada 4,9 sampai 5,7 Ampere dengan waktu penstabilan dimulai dari 0,23 sampai 0,27 detik setelah simulasi dijalankan. Arus tertinggi yang dihasilkan berada pada 17,67 Ampere pada waktu 0,16 sampai 0,17 detik setelah simulasi dijalankan.

Hasil Pengukuran Daya Sebelum Pada Kondisi Berbayang Menggunakan PSO
Percobaan Data 1

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan pertama dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 800 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 800 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan pertama dapat dilihat pada gambar 6.

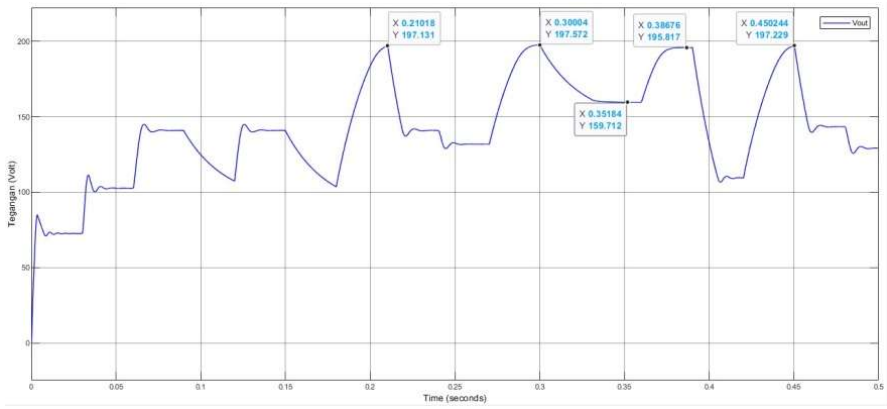


Gambar 6 Daya Keluaran PV Percobaan 1

Dari gambar 6 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran daya dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan yang masih banyak. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya masih belum melalui proses optimasi dengan program PSO dan hanya murni keluaran yang dihasilkan dari panel surya. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 1 yaitu nilai daya stabil terlama berada pada 485,5 sampai 485,7 Watt dengan waktu penstabilan dari 0,33 sampai 0,36 detik setelah simulasi dijalankan, diikuti dengan nilai stabil terendah terlama berada pada 380 sampai 403 Watt dengan waktu penstabilan dimulai dari 0,23 sampai 0,26 detik setelah simulasi dijalankan. Daya tertinggi yang dihasilkan berada pada 862,8 Watt pada waktu 0,2 detik yang tercepat setelah simulasi dijalankan.

Hasil Pengukuran Tegangan pada Kondisi Berbayang Setelah Menggunakan PSO
Percobaan Data 1

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan pertama dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 800 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 800 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan pertama dapat dilihat pada gambar 7.

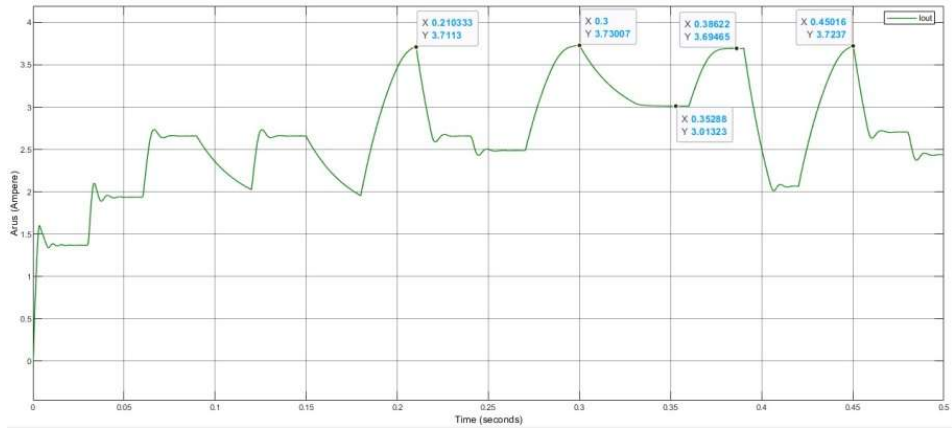


Gambar 7 Tegangan Keluaran Boost-Converter Percobaan 1

Dari gambar 7 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran tegangan dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan lebih stabil. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya telah melalui proses optimasi dengan program PSO yang telah dihubungkan dengan mosfet *boost-converter* sebagai referensi dari PWM generator yang kemudian keluaran dari *boost-converter* menjadi lebih stabil. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 1 yaitu nilai tegangan stabil terlama berada pada 159,7 Volt dengan waktu penstabilan dari 0,34 sampai 0,36 detik setelah simulasi dijalankan. Tegangan tertinggi yang dihasilkan berada pada 197,13 Volt dengan waktu tercepat pada 0,21 detik setelah simulasi dijalankan.

Hasil Pengukuran Arus pada Kondisi Berbayang Setelah Mengguanakan PSO
Percobaan Data 1

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan pertama dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 800 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 800 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan pertama dapat dilihat pada gambar 8.



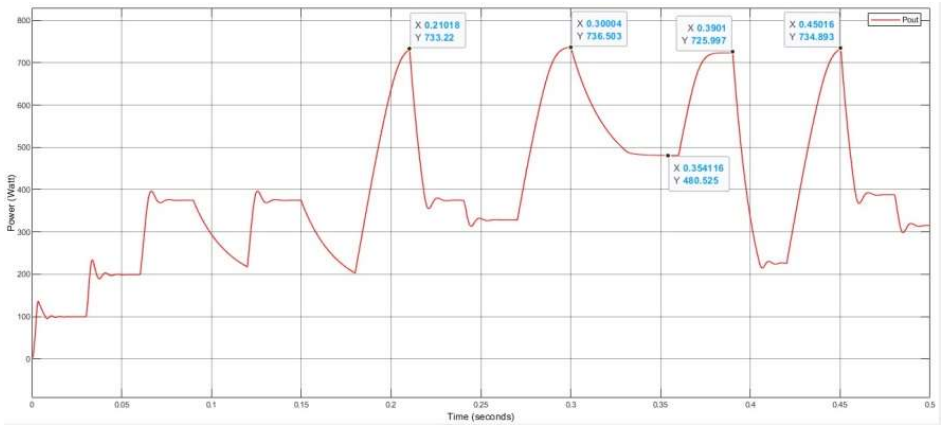
Gambar 8 Arus Keluaran Boost-Converter Percobaan 1

Dari gambar 8 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran arus dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan lebih stabil. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya telah melalui

proses optimasi dengan program PSO yang telah dihubungkan dengan mosfet *boost-converter* sebagai referensi dari PWM generator yang kemudian keluaran dari *boost-converter* menjadi lebih stabil. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 1 yaitu nilai arus stabil terlama berada pada 3,01 Ampere dengan waktu penstabilan dari 0,34 sampai 0,36 detik setelah simulasi dijalankan. Arus tertinggi yang dihasilkan berada pada 3,7 Ampere dengan waktu tercepat pada 0,21 detik setelah simulasi dijalankan.

Hasil Pengukuran Daya pada Kondisi Berbayang Setelah Mengguanakan PSO
Percobaan Data 1

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan pertama dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 800 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 800 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan pertama dapat dilihat pada gambar 9.

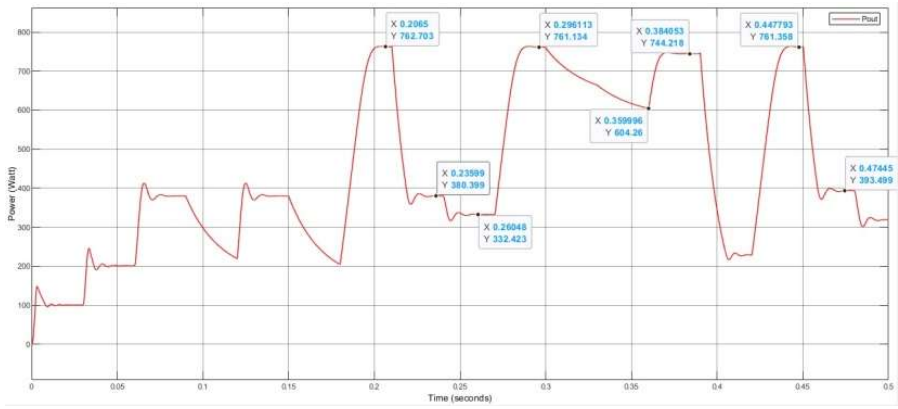


Gambar 9 Daya Keluaran Boost-Converter Percobaan 1

Dari gambar 9 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran daya dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan lebih stabil. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya telah melalui proses optimasi dengan program PSO yang telah dihubungkan dengan mosfet *boost-converter* sebagai referensi dari PWM generator yang kemudian keluaran dari *boost-converter* menjadi lebih stabil. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 1 yaitu nilai daya stabil terlama berada pada 480,52 Watt dengan waktu penstabilan dari 0,33 sampai 0,36 detik setelah simulasi dijalankan. Daya tertinggi yang dihasilkan berada pada 736,5 Watt dengan waktu tercepat pada 0,3 detik setelah simulasi dijalankan.

Percobaan Data 6

Simulasi dilakukan dengan tipe berkelanjutan atau *continuous* dengan *stop time* yang diatur pada 0,5 detik. Percobaan ke-enam dilakukan dengan iradiasi bernilai 1000 pada panel 1, 1000 pada panel 2, 1000 pada panel 3, dan 1000 pada panel 4 sesuai dengan tabel 3.2. Hasil dari simulasi diperlihatkan dengan *scope* agar dapat memperlihatkan hasil grafik yang dihasilkan dari menjalankan simulasi sesuai dengan percobaan yang dilakukan dimana hasil percobaan ke-enam dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10 Daya Keluaran Boost-Converter Percobaan 6

Dari gambar 10 diatas, dapat dilihat bahwa keluaran daya dari panel surya mengalami kenaikan dan penurunan lebih stabil. Hal ini disebabkan keluaran dari panel surya telah melalui proses optimasi dengan program PSO yang telah dihubungkan dengan mosfet *boost-converter* sebagai referensi dari PWM generator yang kemudian keluaran dari *boost-converter* menjadi lebih stabil. Hasil yang didapat dari simulasi percobaan 6 yaitu nilai daya stabil terlama berada pada 332,42 Watt dengan waktu penstabilan dari 0,25 sampai 0,27 detik setelah simulasi dijalankan. Daya tertinggi yang dihasilkan berada pada 762,7 Watt dengan waktu tercepat pada 0,2 detik setelah simulasi dijalankan.

KESIMPULAN

Berdasarkan enam skenario pengujian dengan variasi intensitas iradiasi dan temperatur yang seragam, hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma Maximum Power Point Tracking berbasis Particle Swarm Optimization (MPPT-PSO) mampu meningkatkan kestabilan tegangan, arus, dan daya keluaran dari sistem fotovoltaik dalam kondisi partial shading. Pada percobaan pertama, daya maksimum dari panel tanpa optimasi tercatat sebesar 862,7 Watt, namun sangat fluktuatif. Sebaliknya, setelah dioptimasi menggunakan MPPT-PSO, daya maksimum sebesar 736,5 Watt dicapai dengan karakteristik output yang jauh lebih stabil dalam rentang 480,52–736,5 Watt, dan waktu stabilisasi hanya dalam 0,33–0,36 detik. Parameter tegangan dan arus juga menunjukkan kestabilan signifikan pada masing-masing 159,7 Volt dan 3,01 Ampere, dengan waktu tanggap lebih cepat dan gejala osilasi minimal.

Kontribusi ilmiah utama dari penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan metaheuristik PSO dalam MPPT untuk menghadapi kompleksitas multi-peak power curve akibat bayangan parsial, yang sering menjadi keterbatasan pendekatan konvensional seperti Perturb and Observe (P&O) atau Incremental Conductance. Implementasi PSO dalam platform simulasi MATLAB-Simulink membuktikan efektivitasnya sebagai metode pelacakan titik daya maksimum global (global peak) dengan efisiensi waktu dan kestabilan output yang superior. Dengan mengatasi keterjebakan pada local maxima, algoritma ini tidak hanya meningkatkan performa konversi daya, tetapi juga membuka arah baru dalam pengembangan sistem kendali adaptif cerdas

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. S. Abid, W. S. Pambudi, T. Suheta, T. Wati, and M. Munir, “Analisa Efisiensi Daya Solarcell dengan Integrasi Sistem Pendingin,” *BEES Bull. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 123–132, 2024.

[2] T. Winarno, L. N. Palupi, A. Pracoyo, and L. Ardhenta, "MPPT control of PV array based on PSO and adaptive controller," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.*, vol. 18, no. 2, pp. 1113–1121, 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v18i2.14845.

[3] A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, and K. B. Mohanty, "A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. December 2016, pp. 854–867, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.083.

[4] P. Slamet, S. Yulianananda, and S. Santoso, "Simulasi Desain Kontrol MPPT Sistem Photovoltaic," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 40–56, 2019, doi: 10.21070/jeee-u.v3i1.2019.

[5] M. Z. Efendi, Suhariningsih, F. D. Murdianto, and E. Inawati, "Implementation of modified P&O method as power optimizer of solar panel under partial shading condition for battery charging system," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1977, no. March 2016, 2018, doi: 10.1063/1.5042858.

[6] dimas nur prakoso, "Perbandingan Metode MPPT Incremental Conductance," vol. 17, no. 2, pp. 175–190, 2019.

[7] A. Zuroida, I. Heryanto, and A. Salsabella, "Optimasi Sistem Pengisian MPPT Berbasis Fuzzy logic Pada Panel Surya," vol. 12, no. 1, pp. 13–18, 2025.

[8] F. Belhachat and C. Larbes, "A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. April, pp. 513–553, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.094.

[9] L. Xu, R. Cheng, Z. Xia, and Z. Shen, "Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-based MPPT Method for PV String under Partially Shading and Uniform Irradiance Condition," *2020 Asia Energy Electr. Eng. Symp. AEEES 2020*, no. 1, pp. 771–775, 2020, doi: 10.1109/AEEES48850.2020.9121377.

[10] S. Javed and K. Ishaque, "A comprehensive analyses with new findings of different PSO variants for MPPT problem under partial shading," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 5, p. 101680, 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.101680.