

Perancangan dan Implementasi Sistem MPPT Berbasis Fuzzy Logic dengan Konverter Buck–Boost untuk Optimalisasi Daya Panel Surya

Design and Implementation of an MPPT System Based on Fuzzy Logic with a Buck–Boost Converter for Solar Panel Power Optimization

Nanang Rohadi

Electrical Engineering, Faculty of Mathematics and Natural Science, Universitas Padjadjaran
Sumedang 45363, Indonesia
Faculty of Mathematics and Natural Science, Universitas Padjadjaran
nanang.rohadi@unpad.ac.id

Abstrak – Energi surya merupakan sumber energi terbarukan yang potensial, namun efisiensi sistem fotovoltaik (PV) sangat dipengaruhi oleh variasi iradiasi, temperatur, dan beban. Penelitian ini mengusulkan sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis Fuzzy Logic Control (FLC) yang diintegrasikan dengan konverter Buck–Boost untuk mempertahankan operasi panel surya pada titik daya maksimum secara adaptif. Prototipe dibangun menggunakan modul PV 50 Wp, sensor INA219, dan mikrokontroler 8-bit sebagai pengendali utama. Hasil pengujian menunjukkan efisiensi pelacakan daya di atas 97 %, steady-state error di bawah 2,2 %, serta peningkatan daya hingga 106 % dibanding sistem direct coupling. Sistem juga menunjukkan respon cepat dengan waktu konvergensi hanya 5–6 iterasi dan osilasi daya yang minimal. Integrasi FLC dan konverter Buck–Boost terbukti meningkatkan kestabilan dan efisiensi sistem PV terhadap variasi beban maupun kondisi lingkungan, sehingga efektif diterapkan pada sistem energi surya adaptif berskala lebih luas.

Kata Kunci: Panel surya, Fuzzy logic control, MPPT, Buck–Boost Converter, Energi terbarukan..

Abstract – Solar energy is a promising renewable resource; however, the efficiency of photovoltaic (PV) systems is highly affected by variations in irradiance, temperature, and load. This study proposes a Maximum Power Point Tracking (MPPT) system based on Fuzzy Logic Control (FLC) integrated with a Buck–Boost Converter to adaptively maintain PV operation at the maximum power point. The prototype employs a 50 Wp PV module, an INA219 voltage–current sensor, and an 8-bit microcontroller as the main controller. Experimental results demonstrate a tracking efficiency above 97%, a steady-state error below 2.2%, and a power improvement of up to 106% compared with the direct coupling system. The proposed system exhibits a fast response with convergence achieved within 5–6 iterations and minimal power oscillation. The integration of FLC with a Buck–Boost converter effectively enhances the stability and efficiency of PV systems under varying load and environmental conditions, making it suitable for scalable and adaptive solar energy applications.

Keywords: Photovoltaic, Fuzzy logic control, MPPT, Buck–Boost Converter, Renewable energy.

1. Pendahuluan

Energi surya merupakan sumber energi terbarukan yang prospektif karena ramah lingkungan, melimpah, dan berkelanjutan [1]. Teknologi fotovoltaik (PV) memungkinkan konversi energi matahari menjadi listrik, namun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh iradiasi, suhu, dan beban [2], [3]. Variasi kondisi ini menyebabkan pergeseran Maximum Power Point (MPP), sehingga diperlukan metode Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk menjaga efisiensi sistem [4].

Algoritma MPPT konvensional seperti *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond) banyak digunakan karena sederhana, tetapi masih menghadapi masalah berupa osilasi daya dan respon lambat pada perubahan lingkungan [5], [6]. Modifikasi yang diusulkan, seperti penyesuaian ukuran langkah atau adaptasi berbasis parameter dinamis, hanya meningkatkan sebagian aspek kinerja dan belum sepenuhnya menyelesaikan persoalan stabilitas [6].

Sebagai alternatif, metode berbasis kecerdasan buatan, khususnya Fuzzy Logic Control (FLC), menawarkan kemampuan adaptif tanpa model matematis kompleks. FLC mampu menghasilkan duty cycle optimal secara real-time, dengan studi terkini menunjukkan efisiensi pelacakan yang cukup tinggi serta osilasi daya yang lebih rendah dibanding algoritma konvensional [6]–[8]. Namun, sebagian besar penelitian masih berbasis simulasi, sehingga bukti eksperimental yang komprehensif masih terbatas.

Untuk mengatasi kesenjangan tersebut, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan prototipe Fuzzy Logic-MPPT berbasis mikrokontroler dengan topologi Buck–Boost Converter. Prototipe diuji secara eksperimental pada variasi beban dan waktu operasi. Hasilnya diharapkan dapat memberikan validasi nyata efektivitas FLC dalam meningkatkan efisiensi konversi energi PV, sekaligus memperkuat penerapan metode cerdas pada sistem energi terbarukan skala komersial.

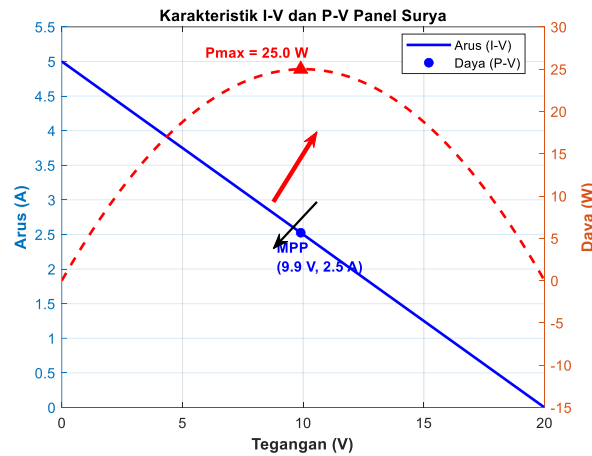
2. Prinsip Dasar MPPT Berbasis Fuzzy Logic dengan Konverter Buck-Boost

Panel fotovoltaik (PV) mengubah energi cahaya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik, di mana foton yang diserap menghasilkan pasangan elektron–hole yang membentuk arus listrik. Karakteristik utama panel ditunjukkan oleh kurva arus–tegangan (I – V) dan daya–tegangan (P – V). Titik operasi optimalnya disebut *Maximum Power Point* (MPP), yaitu saat daya keluaran maksimum tercapai. Posisi MPP bergeser mengikuti perubahan iradiasi dan temperatur—peningkatan iradiasi menaikkan arus, sedangkan suhu tinggi menurunkan tegangan [9], [10].

Hubungan daya dirumuskan sebagai $P=V \times I$, dan kondisi MPP ditentukan oleh

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (1)$$

Gambar 1 menunjukkan karakteristik I – V dan P – V panel surya, di mana MPP menjadi titik kendali utama untuk menjaga efisiensi konversi energi.

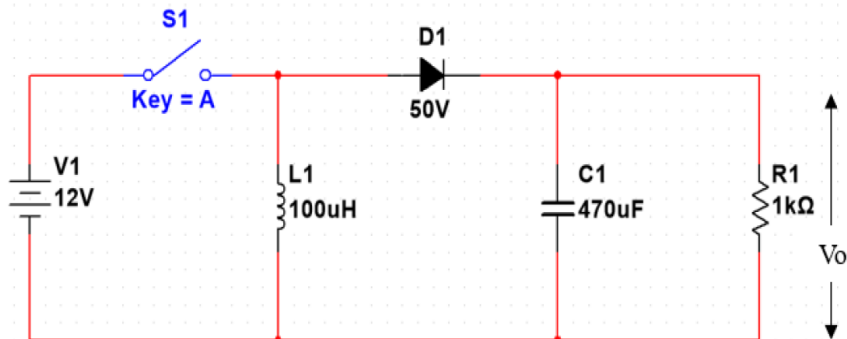


Gambar 1. Karakteristik I - V dan P - V Panel Surya

Untuk mempertahankan operasi pada MPP, digunakan konverter DC–DC tipe *Buck–Boost* yang mampu menaikkan maupun menurunkan tegangan keluaran sesuai kebutuhan beban [11]. Hubungan antara tegangan input (V_{in}) dan output (V_{out}) ditentukan oleh *duty cycle* (D) sinyal PWM [12], [13]:

$$V_{out} = \frac{D}{1 - D} \cdot V_{in}$$

Ketika saklar MOSFET *ON*, energi disimpan dalam induktor; saat *OFF*, energi dilepaskan melalui dioda ke beban. Skema dasar rangkaian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Buck-Boost Converter

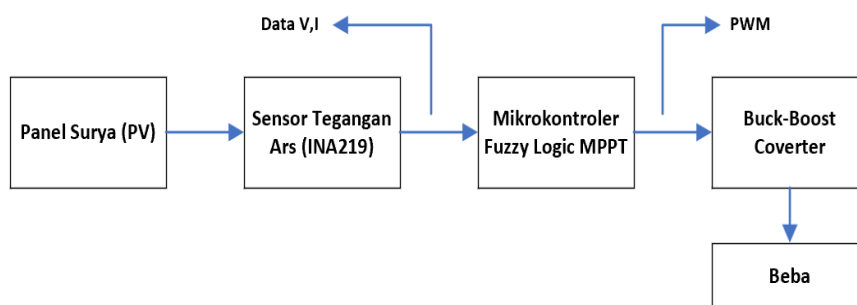
Untuk mengontrol titik daya maksimum secara adaptif, digunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) yang tidak memerlukan model matematis kompleks [14]. FLC terdiri dari tiga tahap utama: *fuzzifikasi*, *inferensi berbasis aturan*, dan *defuzzifikasi*. Pada sistem MPPT, masukan berupa *error* daya (E) dan perubahan *error* (ΔE) dikonversi ke variabel linguistik (NB, NS, ZE, PS, PB) untuk menghasilkan perubahan *duty cycle* optimal.

Aturan inferensi, seperti “*IF E is PB AND ΔE is PS THEN $\Delta Duty$ is PB,*” menghasilkan keluaran numerik melalui proses *defuzzifikasi* untuk mengatur PWM konverter. Metode ini memberikan respon cepat, kestabilan tinggi, dan adaptivitas lebih baik dibanding algoritma konvensional seperti *Perturb and Observe* dan *Incremental Conductance*. Integrasi FLC dengan konverter Buck–Boost terbukti efektif menjaga operasi panel di titik daya maksimum meskipun terjadi fluktuasi iradiasi dan beban.

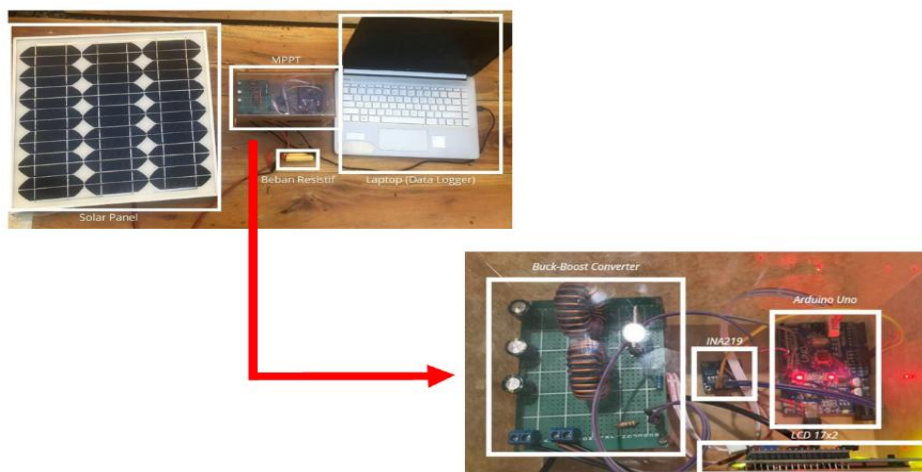
3. Desain dan Implementasi Eksperimental Sistem MPPT Berbasis Fuzzy Logic

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berbasis *Fuzzy Logic Control* (FLC) yang diintegrasikan dengan konverter *Buck–Boost* untuk meningkatkan efisiensi konversi daya panel surya. Sistem dikembangkan dalam bentuk kendali tertutup (*closed-loop*), di mana sensor tegangan–arus INA219 mengukur parameter V_{pv} dan I_{pv} secara *real-time*, sedangkan mikrokontroler 8-bit menghasilkan sinyal PWM berdasarkan algoritma fuzzy guna menjaga operasi panel pada titik daya maksimum.

Struktur sistem ditunjukkan pada Gambar 3, terdiri atas panel surya 50 Wp, sensor INA219, mikrokontroler, serta konverter *Buck–Boost* dengan induktor 80 μH , kapasitor 470 μF , MOSFET IRL3705N, dan dioda Schottky MBR1060. Tata letak fisik rangkaian ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Diagram blok sistem Fuzzy-MPPT berbasis mikrokontroler



Gambar 4. Prototipe Sistem Fuzzy-MPPT dengan Konverter Buck–Boost

Algoritma *Fuzzy Logic Control* (FLC) dalam sistem ini berfungsi mengadaptasi *duty cycle* sinyal PWM berdasarkan perubahan daya keluaran panel. Nilai *error* daya $E(k) = P(k) - P(k - 1)$ dan perubahan *error* $\Delta E(k)$ menjadi masukan utama untuk menentukan koreksi *duty cycle* (ΔD). Proses inferensi fuzzy memanfaatkan aturan linguistik yang merepresentasikan hubungan nonlinier antara kondisi daya dan aksi kendali, sehingga sistem mampu menyesuaikan titik operasi panel menuju MPP secara cepat dan stabil tanpa memerlukan model matematis yang kompleks.

Pengujian eksperimental dilakukan dengan dua skenario, yaitu variasi beban (5 Ω , 10 Ω , 100 Ω) dan variasi waktu (10.00–16.00 WIB). Setiap pengujian mencatat parameter tegangan, arus, daya, iradiasi, dan temperatur setiap 100 ms hingga sistem mencapai keadaan tunak. Evaluasi

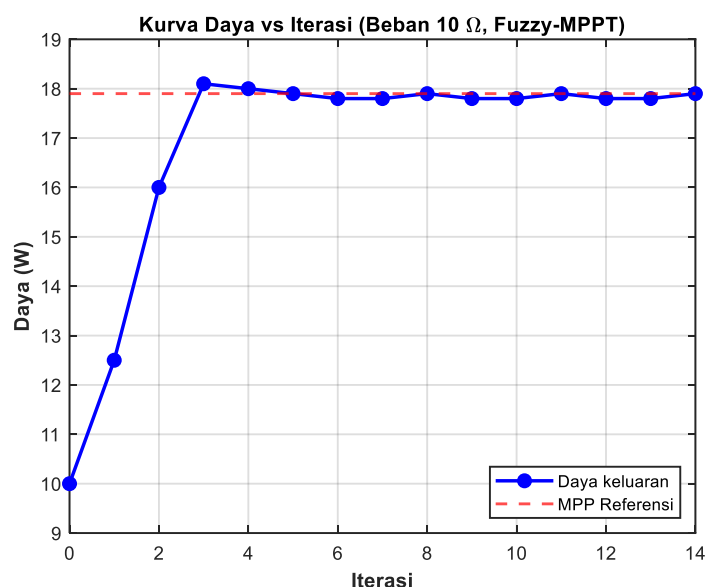
dilakukan berdasarkan efisiensi pelacakan, *steady-state error*, dan waktu konvergensi untuk menilai kinerja sistem.

4. Hasil Eksperimen dan Analisa Kerja

Prototipe sistem MPPT berbasis *Fuzzy Logic Control* (FLC) dengan konverter *Buck–Boost* berhasil diimplementasikan menggunakan mikrokontroler 8-bit dan sensor INA219. Sistem mampu menyesuaikan *duty cycle* secara adaptif untuk menjaga operasi panel surya tetap berada di sekitar titik daya maksimum pada berbagai kondisi lingkungan.

Gambar 5 menunjukkan karakteristik konvergensi daya keluaran sistem MPPT berbasis Fuzzy Logic pada beban $10\ \Omega$. Terlihat bahwa daya awal sebesar sekitar 10 W meningkat tajam selama tiga iterasi pertama hingga mencapai 18,1 W, yang mendekati nilai titik daya maksimum (MPP) sebesar 17,9 W. Setelah iterasi keempat, sistem memasuki kondisi tunak dengan fluktuasi daya yang sangat kecil di sekitar nilai MPP, menandakan bahwa algoritma fuzzy berhasil menstabilkan keluaran tanpa osilasi signifikan.

Hasil ini konsisten dengan data pada Tabel 1, di mana efisiensi pelacakan untuk beban $10\ \Omega$ tercatat sebesar 98,9%, nilai tertinggi dibandingkan kondisi beban lain. Tingginya efisiensi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi antara mekanisme inferensi fuzzy dan konverter Buck–Boost mampu menyesuaikan *duty cycle* secara adaptif terhadap perubahan daya. Dengan waktu konvergensi hanya sekitar 5–6 iterasi, sistem menunjukkan performa dinamis yang cepat dan stabil dalam mencapai serta mempertahankan titik daya maksimum.



Gambar 5. Kurva daya terhadap iterasi pengendalian pada beban $10\ \Omega$.

Data hasil pengujian dirangkum pada Tabel 1, yang memperlihatkan efisiensi pelacakan daya sistem tetap tinggi pada berbagai kondisi pengujian.

Tabel 1. Hasil Eksperimen Fuzzy-MPPT.

Kondisi Uji	Daya (W)	Efisiensi Pelacakan (%)
Beban $5\ \Omega$	12,5	98,2
Beban $10\ \Omega$	17,8	98,9
Beban $100\ \Omega$	5,9	97,8
Pukul 10.00 WIB	15,2	97,5
Pukul 12.00 WIB	21,7	99,1
Pukul 14.00 WIB	18,4	98,6
Pukul 16.00 WIB	12,1	97,3

Secara keseluruhan, sistem menunjukkan efisiensi tinggi, respon cepat, dan kestabilan daya yang baik di berbagai kondisi. Hasil ini membuktikan bahwa integrasi *Fuzzy Logic Control* dengan konverter *Buck-Boost* efektif dalam meningkatkan performa pelacakan titik daya maksimum dan efisiensi konversi energi pada sistem fotovoltaik.

5. Kesimpulan

Sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berbasis *Fuzzy Logic Control* (FLC) dengan konverter *Buck-Boost* telah berhasil dirancang dan diuji secara eksperimental. Hasil menunjukkan sistem mampu menyesuaikan *duty cycle* secara adaptif untuk menjaga operasi panel surya pada titik daya maksimum dengan efisiensi pelacakan di atas 97% dan *steady-state error* di bawah 2,2%. Waktu konvergensi yang cepat (5–6 iterasi) dan osilasi daya yang minimal membuktikan respon dinamis dan kestabilan sistem yang tinggi. Integrasi metode FLC dengan konverter *Buck-Boost* terbukti efektif meningkatkan efisiensi konversi energi dan dapat menjadi dasar pengembangan sistem fotovoltaik cerdas pada skala aplikasi yang lebih luas.

Referensi

- [1] S. Kalyan, S. Dawn, et al., "Solar integrated Wind Turbines for Sustainable Energy Generation from Urban Highways," *2024 1st International Conference on Sustainability and Technological Advancements in Engineering Domain (SUSTAINED)*, Faridabad, India, 2024, pp. 168-173, doi: 10.1109/SUSTAINED63638.2024.11074106.
- [2] A. M. Gabor et al., "The Impact of Cracked Solar Cells on Solar Panel Energy Delivery," *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Calgary, AB, Canada, 2020, pp. 0810-0813, doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300743.
- [3] R. Kapoor, B. G. Babu, P. Upadhyay and D. R. Kumar, "Daily Solar Irradiance Forecasting for Optimum Load Distribution Planning in Hybrid Electrical Power System," *2024 Second International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things (ICoICI)*, Coimbatore, India, 2024, pp. 606-610, doi: 10.1109/ICoICI62503.2024.10696168.
- [4] Z. Housheng, "Research on MPPT for Solar Cells Based on Flyback Converter," *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Changsha, China, 2010, pp. 36-39, doi: 10.1109/ICICTA.2010.140.
- [5] M. S. Nkambule, A. N. Hasan and A. Ali, "MPPT under partial shading conditions based on Perturb & Observe and Incremental Conductance," *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 2019, pp. 85-90, doi: 10.23919/ELECO47770.2019.8990426.
- [6] D. K. M. Idris, R. Birasa, C. S. Marțiș and D. R. Philippe, "Comparative Analysis of Classical and AI-Based MPPT Techniques in Stand-Alone PV Systems: Perturb and Observe, Incremental Conductance, and Fuzzy Logic," *2024 IEEE International Conference And Exposition On Electric And Power Engineering (EPEi)*, Iasi, Romania, 2024, pp. 139-144, doi: 10.1109/EPEi63510.2024.10758020.
- [7] M. N. Nazirbhai and R. R. Gajjar, "Comparative Analysis of Perturb & Observe, Incremental Conductance and Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Methods," *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/RESEM57584.2023.10236212.
- [8] N. Kumari C.H. and V. S. V. Kaumudi Pravallika, "Fuzzy based Improved Incremental Conductance MPPT algorithm in PV System," *2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, Bangalore, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198384.

- [9] B. Srikanth, S. Sarangi and D. Guha, "Improved MPP Technique for Load and Irradiation Variations," *2022 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, Prayagraj, India, 2022, pp. 01-05, doi: 10.1109/SCES55490.2022.9887675.
- [10] S. Pattanaik and K. C. Bhuyan, "Solar Cell Connected To SEPIC Converter Using Various Loads for Power Tracking," *2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology(ODICON)*, Bhubaneswar, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ODICON50556.2021.9428935.
- [11] O. K. Islam, et al., "A Comprehensive Comparison Between Boost and Buck-Boost Converters in Solar MPPT With ANN," *2020 Emerging Technology in Computing, Communication and Electronics (ETCCE)*, Bangladesh, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETCCE51779.2020.9350867.
- [12] I. Hussain, M. Zohaib and E. Babaei, "Modeling, Simulation of Buck Boost Converter with MPPT and Control of Battery Charging Application," *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISMSIT.2019.8932883.
- [13] F. Méndez-Díaz, B. Pico, E. Vidal-Idiarte, J. Calvente and R. Giral, "HM/PWM Seamless Control of a Bidirectional Buck–Boost Converter for a Photovoltaic Application," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2887-2899, March 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2843393.
- [14] H. Ishibuchi, "Prof. Lotfi A. Zadeh [Editor's Remarks]," in *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 2-2, Feb. 2019, doi: 10.1109/MCI.2018.2881775.