

Optimasi Sistem Pengisian MPPT Berbasis *Fuzzy logic* Pada Panel Surya

Afidah Zuroida^{*a)}, Irwan Heryanto/Eryk^{a)}, Alfina Salsabella Ramandhani^{a)}

(Received 24 Desember 2024 || Revised 22 Februari 2025 || Published 28 Februari 2025)

Abstract: The transition to renewable energy is a crucial step in achieving sustainable development. However, the efficiency of Photovoltaic (PV) systems remains a challenge due to fluctuations in solar irradiation, which affect power generation. This study aimed to enhance Maximum Power Point Tracking (MPPT) performance by integrating Fuzzy logic Control (FLC) into the charging system of a solar power plant. The research employed an experimental approach involving the testing of a 100 Wp PV module and a 44 Ah battery, where data collection was conducted at 10-minute intervals from 10:30 AM to 3:00 PM. The proposed FLC-based MPPT system was compared with a conventional MPPT system to evaluate charging efficiency, power stability, and response time. The findings indicated that the FLC-based MPPT exhibited superior stability, maintaining output voltage within 12V to 12.5V, whereas the non-Fuzzy MPPT showed wider voltage variations. Additionally, the FLC-based system achieved an average charging current of 2.05 A, reducing the full battery charging time to 21 hours 46 minutes, compared to 46 hours 31 minutes for the conventional MPPT system. These results confirm that FLC enhances MPPT performance, particularly in optimizing power output and reducing charging time. However, efficiency trade-offs were observed due to step-down losses in the buck converter. Future research should focus on hybrid MPPT approaches, parameter optimization, and large-scale implementation, potentially integrating Artificial Intelligence (AI) techniques to further improve efficiency. This study contributes to advancing intelligent MPPT systems for renewable energy applications.

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Fuzzy logic, Battery Charging, Renewable Energy, Power Optimization

1. Pendahuluan

Energi ramah lingkungan sebagai salah satu tujuan pembangunan berkelanjutan, dengan fokus pada implementasi Energi Baru Terbarukan (EBT) di Indonesia. Dalam konteks ini, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi strategi utama karena Indonesia adalah negara tropis dengan paparan sinar matahari sepanjang tahun [1]. Meskipun potensi PLTS di Indonesia sangat besar, efektivitas kinerja PLTS perlu ditingkatkan untuk menghasilkan daya keluaran yang optimal. Salah satu permasalahan utama dalam sistem PLTS adalah fluktuasi daya keluaran akibat perubahan intensitas radiasi matahari dan suhu lingkungan [2], [3]. Karakteristik daya panel surya yang tidak linear menyebabkan perubahan titik daya maksimum (*Maximum Power Point*, MPP) seiring dengan perubahan kondisi lingkungan [4]. Jika tidak ditangani dengan baik, hal ini dapat menyebabkan energi yang dihasilkan tidak maksimal dan waktu pengisian baterai menjadi lebih lama. Oleh karena itu, diperlukan metode yang dapat mengoptimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya secara adaptif dan efisien.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi sistem PLTS, termasuk algoritma *Perturb and Observe* (P&O) [5], *Incremental Conductance* [6], serta pendekatan berbasis kecerdasan buatan seperti *Neural Network* [7] dan *Fuzzy logic*. Metode *Perturb and Observe* umumnya digunakan karena implementasinya yang sederhana, tetapi metode ini memiliki kelemahan dalam merespons perubahan lingkungan yang cepat [8], [9]. Sementara itu, metode *Neural Network* menawarkan keakuratan yang lebih tinggi tetapi membutuhkan data pelatihan yang kompleks [10]. Alternatif lainnya adalah penggunaan *Fuzzy logic*, yang memiliki kemampuan adaptif terhadap kondisi lingkungan yang berubah-ubah dengan proses komputasi yang lebih ringan dibandingkan *Neural Network*.

Meskipun metode *Fuzzy logic* telah diterapkan dalam berbagai sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diselesaikan. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa MPPT berbasis *Fuzzy logic* mampu meningkatkan stabilitas daya keluaran [11], [12], [13],

namun efisiensi pengisian baterai masih bervariasi tergantung pada parameter keanggotaan (*membership function*) yang digunakan. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara spesifik membandingkan kinerja MPPT *Fuzzy logic* dengan metode konvensional dalam skenario operasi yang lebih luas dan realistis.

Penelitian ini mengusulkan penerapan sistem MPPT berbasis *Fuzzy logic* dengan parameter *membership function* yang disesuaikan untuk meningkatkan efisiensi pengisian baterai. Pendekatan ini bertujuan untuk mengatasi tantangan utama dalam sistem MPPT konvensional, yakni efisiensi yang fluktuatif akibat perubahan kondisi lingkungan. Dengan desain algoritma yang lebih adaptif, diharapkan sistem ini mampu menjaga daya keluaran tetap stabil dan meningkatkan kecepatan pengisian baterai.

Dengan mempertimbangkan permasalahan yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis kinerja MPPT berbasis *fuzzy logic* dalam sistem PLTS. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi efisiensi pengisian baterai yang dihasilkan serta membandingkannya dengan sistem MPPT tanpa *fuzzy logic*. Eksperimen dilakukan dengan mengukur parameter daya keluaran dan efisiensi pengisian dalam berbagai kondisi lingkungan guna mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai keunggulan dan keterbatasan sistem yang diusulkan.

2. Metode

2.1 Identifikasi Kebutuhan Komponen

Penelitian ini menggunakan berbagai material utama yang berperan dalam proses pengujian dan pengembangan sistem MPPT berbasis *Fuzzy logic*. Material utama yang digunakan terdiri dari modul panel surya, baterai, dan rangkaian pengendali daya yang mendukung implementasi sistem MPPT. Panel surya yang digunakan dalam penelitian ini adalah modul fotovoltaik monokristalin 100 Wp (Solar World, efisiensi 19%). Modul ini dipilih karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan panel polikristalin dan amorf, sehingga cocok untuk aplikasi pengisian daya pada kondisi iradiasi yang bervariasi. Panel surya ini memiliki tegangan maksimum operasi 18 V dan arus maksimum 5,56 A, yang sesuai dengan kebutuhan sistem MPPT dalam

*Korespondensi: afidah.z@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

penelitian ini. Sebagai penyimpan energi, digunakan baterai timbal-asam (*Lead Acid Battery*) 12V 44Ah (Yuasa, deep cycle). Jenis baterai ini dipilih karena memiliki karakteristik yang stabil dalam menyimpan dan melepaskan energi [14], serta umum digunakan dalam sistem *renewable energy storage* [15], [16]. Penggunaan baterai dengan kapasitas 44 Ah memungkinkan pengujian sistem MPPT dalam durasi waktu yang cukup panjang tanpa mengalami gangguan suplai daya.

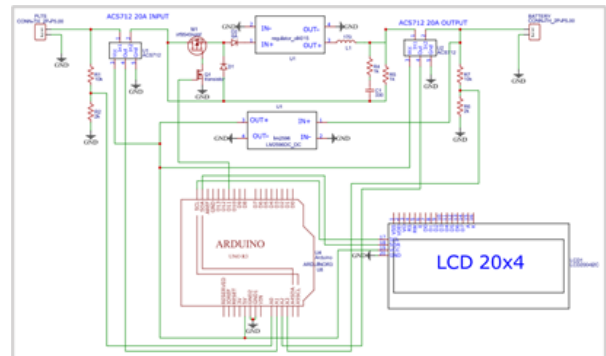
Sistem MPPT pada penelitian ini dikendalikan oleh Arduino Uno R3 (Arduino, Italy). Mikrokontroler ini dipilih karena memiliki 16 MHz clock speed, 6 input analog, serta kompatibel dengan berbagai sensor yang dibutuhkan dalam pengujian. Sistem kontrol MPPT dikombinasikan dengan konverter buck DC-DC (Texas Instruments, model XL4015) yang memiliki spesifikasi tegangan input maksimum 30V dan arus keluaran hingga 5A. Konverter ini berfungsi untuk menyesuaikan tegangan keluaran dari panel surya agar sesuai dengan tegangan operasi baterai. Pengukuran tegangan dilakukan menggunakan sensor pembagi tegangan dengan resistor 10 k Ω dan 2 k Ω untuk memastikan tegangan keluaran tetap dalam batas yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Sementara itu, pengukuran arus dilakukan menggunakan sensor ACS712-20A (Allegro Microsystems) yang memiliki keakuratan tinggi dalam mendeteksi arus DC dan AC hingga $\pm 20A$ dengan resolusi 66mV/A. Sebagai tampilan antarmuka pengguna, sistem dilengkapi dengan LCD 20x4 I2C (Hitachi, HD44780). LCD ini digunakan untuk menampilkan parameter operasi seperti tegangan input, tegangan output, arus input, arus output, daya keluaran, serta duty cycle dari sistem MPPT. Rangkaian sistem MPPT juga dilengkapi dengan driver MOSFET menggunakan IRF9540N yang berfungsi sebagai saklar daya utama dalam konverter buck. MOSFET ini memiliki tegangan drain-source maksimum 100V dan arus maksimum 23A, yang cukup untuk menangani daya keluaran dari panel surya.

2.2 Hasil Perancangan Komponen Elektronik

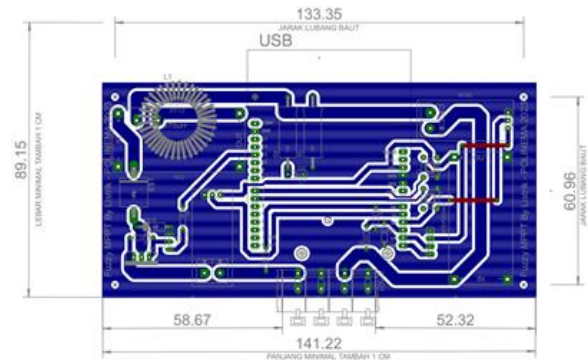
Diagram skematik sistem MPPT berbasis Arduino dapat dilihat di Gambar 2.1 yang menunjukkan sistem pemantauan dan pengendalian daya berbasis Arduino Uno terintegrasi dengan sensor tegangan dan arus, konverter DC-DC, serta LCD 20x4 sebagai tampilan data. Arduino Uno berfungsi sebagai pusat kendali, membaca tegangan melalui pembagi tegangan dan arus melalui sensor ACS712, yang masing-masing mengukur kondisi input dan output daya dari sistem. Data ini diproses dan ditampilkan pada LCD 20x4. Selain itu, skema ini mencakup dua modul konverter DC-DC, yang berperan sebagai buck converter untuk menurunkan tegangan dari panel surya agar sesuai dengan kebutuhan sistem, menjaga stabilitas daya yang masuk ke mikrokontroler dan perangkat lainnya. Struktur rangkaian ini mendukung sistem MPPT untuk pengoptimalan daya keluaran dari panel surya, menjadikannya lebih efisien dalam mengisi baterai atau memasok daya ke beban.

Sedangkan desain tata letak PCB sistem MPPT berbasis mikrokontroler dapat dilihat Gambar 2.2. PCB ini memiliki jalur tembaga yang tertata secara optimal untuk menghubungkan berbagai komponen elektronik dengan efisiensi tinggi, memastikan distribusi daya dan sinyal tetap stabil. Terlihat adanya lubang pemasangan komponen dan pad soldering untuk komponen surface-mount (SMD). Pada bagian atas, terdapat port USB untuk komunikasi data atau suplai daya untuk mikrokontroler, serta beberapa terminal konektor di bagian bawah yang berfungsi

sebagai input dan output daya dari sistem. Dimensi PCB juga sudah ditentukan dengan detail, mencakup panjang 141,22 mm dan lebar 69,15 mm, menunjukkan bahwa desain ini siap untuk fabrikasi.



GAMBAR 2.1 DIAGRAM SKEMATIK KOMPONEN



GAMBAR 2.2 DESAIN TATA LETAK PAPAN PCB

Seluruh material utama didukung dengan perancangan mekanik berupa casing sistem MPPT berbahan akrilik transparan 5 mm, yang dirancang agar komponen elektronik tetap terlindungi tetapi tetap memungkinkan pemantauan secara visual seperti yang terlihat di Gambar 2.3. Dimensi casing adalah 15,4 cm x 10,65 cm x 5,5 cm dengan total berat 400 gram. Pada permukaan depan case terdapat komponen-komponen sebagai berikut : 1 *part* LCD 20 x 4 dengan panjang 7,55 cm dan lebar 2,55 cm, 2 *part* tombol ON dan OFF dengan diameter 1,23 cm yang berjarak 2,4 cm dari kedua diameter, serta 1 *part* terminal dengan panjang 3,63 cm dan lebar 1,07 cm.

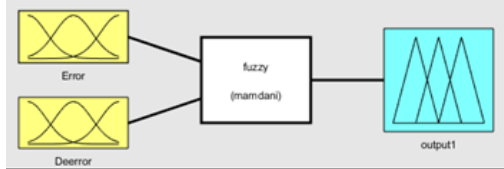


GAMBAR 2.3 HASIL PERENCANAAN CASING MPPT

2.3 Perencanaan Logika Fuzzy

Penyajian logika fuzzy dilakukan dengan menentukan 'fungsi keanggotaan' (*membership function*) dari masing-masing variabel yang disajikan dalam bentuk kurva yang memetakan titik data input

ke dalam nilai derajat keanggotaannya, yang biasanya memiliki rentang antara 0 hingga 1. Algoritma kontrol berbasis *Fuzzy logic* dirancang menggunakan tiga variabel utama, yaitu error (E), delta error (ΔE), dan duty cycle (D). Nilai error dihitung berdasarkan selisih antara daya keluaran aktual dengan daya maksimum yang diharapkan, sedangkan delta error menunjukkan perubahan nilai error dari waktu ke waktu. Fungsi keanggotaan dari sistem *Fuzzy logic* ditunjukkan dalam Gambar 2.4.



GAMBAR 2.4 FUNGSI KEANGGOTAAN UNTUK VARIABEL ERROR, DELTA ERROR, DAN DUTY CYCLE

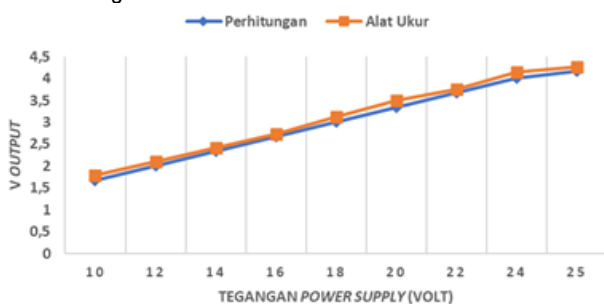
2.4 Pengujian Komponen dan Sistem

Pengujian komponen bertujuan untuk menganalisis tingkat keasalahan masing-masing komponen yang meliputi uji pembagi tegangan, uji sensor arus, uji tampilan LCD, dan uji *buck converter*. Pengujian sistem meliputi pengujian sistem MPPT berbasis *fuzzy logic* dan tanpa *fuzzy logic*, bertujuan membandingkan efisiensi sistem MPPT berbasis *Fuzzy logic* dengan sistem MPPT konvensional.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Sensor Tegangan (Voltage Divider)

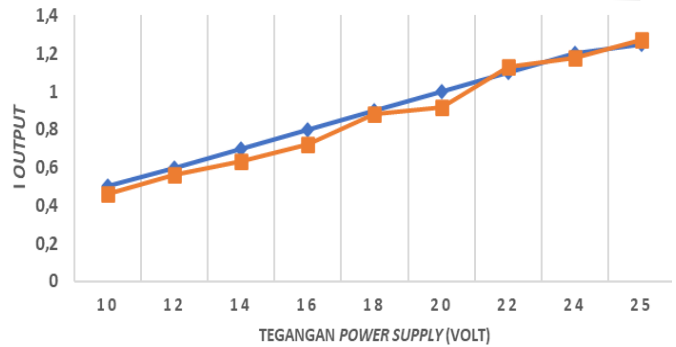
Gambar 3.1 merupakan hasil pengujian sensor tegangan yang menunjukkan bahwa tegangan keluaran dari rangkaian voltage divider konsisten dengan perhitungan teoritis, yaitu 1/6 dari tegangan masukan. Grafik hasil eksperimen menunjukkan korelasi linier antara tegangan masukan dan keluaran, dengan tegangan keluaran mengalami peningkatan proporsional dengan kenaikan tegangan masukan dari sumber. Namun, terdapat kesalahan sistem sebesar 0,04%, yang dapat dikaitkan dengan toleransi komponen resistor serta variasi lingkungan yang mempengaruhi stabilitas rangkaian.



GAMBAR 3.1 GRAFIK HASIL PENGUJIAN (VOLTAGE DIVIDER)

3.2 Pengujian Sensor Arus (ACS712-20A)

Gambar 3.2 menunjukkan hasil pengujian sensor arus. Dari grafik yang diperoleh, terlihat bahwa terjadi kenaikan yang signifikan pada arus *output* seiring dengan peningkatan tegangan *input* dari *power supply*. Namun, dalam pengujian ini terdapat kesalahan sistem sebesar 0,05%. Hasil yang terukur pada alat ukur cenderung sedikit lebih rendah daripada nilai yang dihitung secara teoritis menggunakan nilai resistansi (R) sebesar 20 Ω .



GAMBAR 3.2 GRAFIK PENGUJIAN SENSOR ARUS

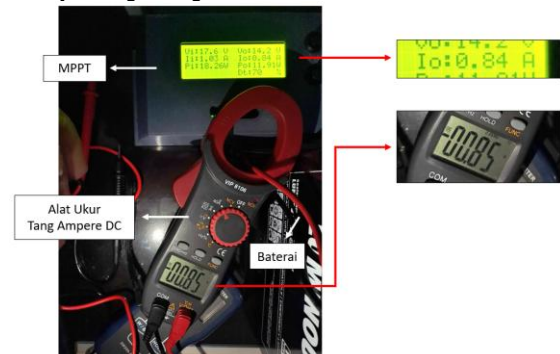
3.3 Pengujian Liquid Crystal Display (LCD I2C 20x4)

Gambar 3.3 menunjukkan hasil pengujian tampilan LCD. Diketahui bahwa LCD ini menampilkan informasi seperti tegangan *input* (V_i), tegangan *output* (V_o), arus *input* (I_i), arus *output* (I_o), daya *input* (P_i), daya *output* (P_o), *duty cycle* (Dt).



GAMBAR 3.3 TAMPILAN LCD

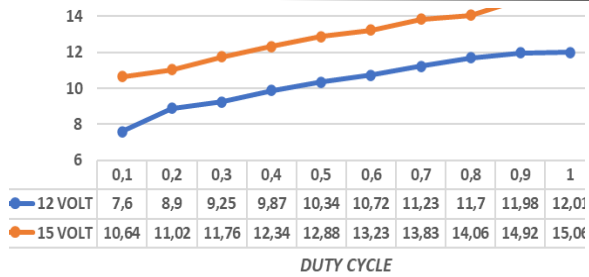
Nilai parameter yang tampil di LCD juga dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan alat ukur standar seperti terlihat pada Gambar 3.4. Pada alat ukur standar, terbaca nilai 0,85 A, sedangkan pada LCD ditampilkan nilai 0,84 A. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa tampilan LCD sesuai dengan keadaan sebenarnya dengan tingkat kesalahan sebesar 0,01 %.



GAMBAR 3.4 TAMPILAN LCD SAAT PENGUJIAN DENGAN ALAT UKUR STANDAR

3.4 Pengujian Duty Cycle

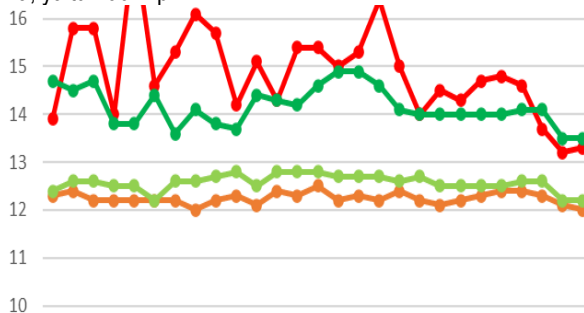
Gambar 3.5 merupakan hasil pengujian *duty cycle* yang menunjukkan adanya kenaikan yang signifikan, dimana semakin besar nilai *duty cycle*, maka semakin besar pula tegangan yang dihasilkan. Sebaliknya, semakin kecil nilai *duty cycle*, maka akan terjadi peningkatan nilai *error* yang dihasilkan. Misalnya, *duty cycle* 0,1 memiliki nilai *error* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *duty cycle* 1.



GAMBAR 3.5 GRAFIK PENGUJIAN DUTY CYCLE

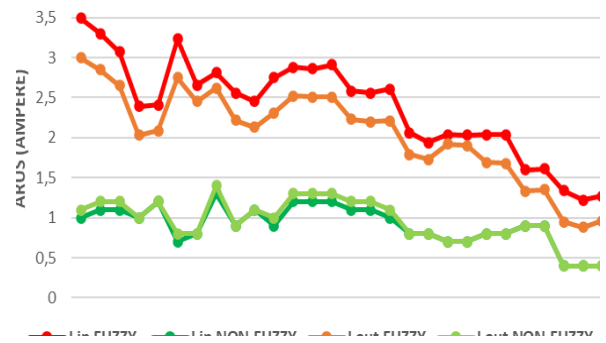
3.5 Pengujian Sistem Fuzzy dan Non-Fuzzy

Gambar 3.6 menunjukkan nilai tegangan masukan (V_{in}) dan tegangan keluaran (V_{out}) dari sistem MPPT Fuzzy maupun sistem MPPT Non-Fuzzy. Tegangan *output* pada MPPT Fuzzy stabil antara 12 Volt hingga 12,5 Volt, sedangkan MPPT Non-Fuzzy memiliki tegangan *output* stabil dalam rentang 12,1 Volt hingga 12,8 Volt. Hasil pengujian tegangan pada hari ke-2 menunjukkan bahwa banyak tegangan *input* yang terbuang oleh MPPT Non-Fuzzy. Pengujian ini dilakukan di lokasi yang sama, dengan kondisi cuaca yang terik mencapai suhu 31°C. Pengujian dilakukan pada waktu yang sama dan menggunakan modul PV dengan daya yang sama, yaitu 100 Wp.



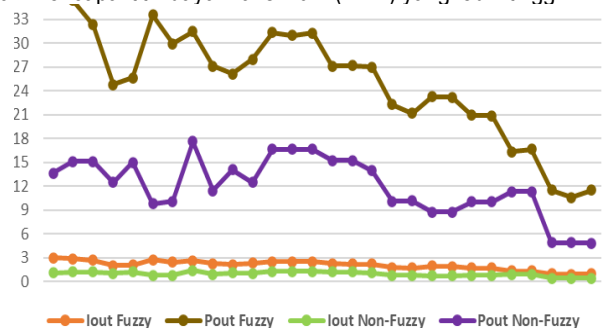
GAMBAR 3.6 HASIL PENGUJIAN TEGANGAN

Gambar 3.7 menunjukkan nilai arus masukan (I_{in}) dan arus keluaran (I_{out}) dari sistem MPPT Fuzzy maupun sistem MPPT Non-Fuzzy. Pengujian ini membuktikan bahwa arus masukan MPPT Fuzzy lebih tinggi daripada arus *masukan* MPPT Non-Fuzzy, dan arus keluaran (*charging*) MPPT Fuzzy juga lebih tinggi daripada arus keluaran MPPT Non-Fuzzy. Perbedaan besar kecilnya arus keluaran ini penting untuk menentukan waktu pengisian baterai. Jika pada pengujian menggunakan baterai 44 Ah dan mengasumsikan pengisian dengan arus 1 A secara terus-menerus, maka waktu yang dibutuhkan untuk mengisi penuh baterai adalah 44 jam. Dalam hal ini, rata-rata arus *charging* MPPT Fuzzy sebesar 2,05 A dapat mengisi penuh baterai dalam waktu 21 jam 46 menit. Sementara rata-rata arus *charging* MPPT Non-Fuzzy sebesar 0,95 A membutuhkan waktu 46 jam 31 menit. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *charging* menggunakan *charge controller* MPPT Fuzzy lebih cepat dalam melakukan pengisian baterai.



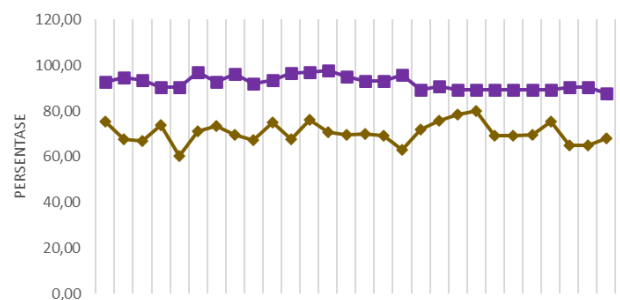
GAMBAR 3.7 HASIL PENGUJIAN ARUS

Gambar 3.8 menunjukkan nilai arus keluaran (I_{out}) dan daya keluaran (P_{out}) dari sistem MPPT Fuzzy maupun sistem MPPT Non-Fuzzy. Arus keluaran yang dihasilkan oleh MPPT Fuzzy dan Non-Fuzzy memiliki kecenderungan yang sama dan mendekati, namun arus *output* dari MPPT Fuzzy lebih besar. Rentang arus *output* yang dihasilkan oleh keduanya adalah 0,4 A - 3 A, tetapi daya keluaran yang dihasilkan oleh MPPT Fuzzy lebih tinggi daripada MPPT Non-Fuzzy. Hal ini menunjukkan bahwa MPPT Fuzzy berhasil mencapai tujuannya untuk mengoptimalkan daya keluaran dan mencapai titik daya maksimum (MPP) yang lebih tinggi.



GAMBAR 3.8 HASIL PERBANDINGAN PERCOBAAN FUZZY DAN NON-FUZZY

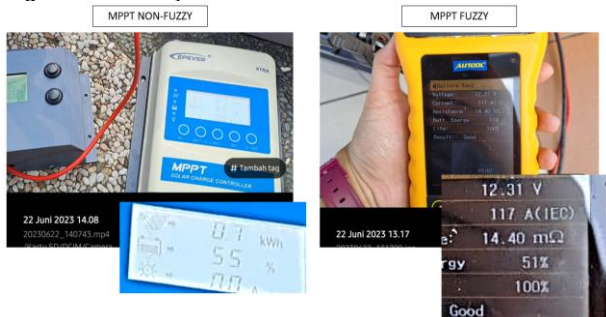
Gambar 3.8 menunjukkan perbandingan nilai prosentase dari sistem MPPT Fuzzy maupun sistem MPPT Non-Fuzzy. MPPT Fuzzy memiliki kecepatan pengisian baterai yang lebih tinggi dibandingkan dengan MPPT Non-Fuzzy. Namun, hal ini dikompensasi oleh kurang efisiennya MPPT Fuzzy dalam mengkonversi daya saat dilakukan *step down* menggunakan *buck-converter*. Sebaliknya, MPPT Non-Fuzzy memiliki kecepatan pengisian yang lebih lambat namun lebih efisien karena berhasil mencapai nilai $\Delta P = 0$, menunjukkan keseimbangan antara daya masukan dan keluaran. Oleh karena itu, kesimpulannya adalah MPPT Non-Fuzzy lebih efisien dalam pengisian baterai meskipun membutuhkan waktu lebih lama.



GAMBAR 3.9 HASIL PERSENTASE EFISIENSI

3.6 Pengujian Battery System Tester

Gambar 3.10 menunjukkan perbandingan kecepatan pengisian baterai antara sistem MPPT Fuzzy maupun sistem MPPT Non-Fuzzy. Hasil pengujian tersebut membuktikan bahwa MPPT Fuzzy mampu mengisi baterai dengan lebih cepat dibandingkan dengan MPPT Non-Fuzzy. Terbukti, pada pukul 13.10, baterai yang diisi menggunakan MPPT Fuzzy telah mencapai tingkat pengisian 51%, sedangkan pada pukul 14.10, baterai yang diisi menggunakan MPPT Non-Fuzzy baru mencapai tingkat pengisian yang sama (55%). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa MPPT Fuzzy memiliki keunggulan dalam kecepatan pengisian baterai dibandingkan dengan MPPT Non-Fuzzy, dengan selisih waktu pengisian sekitar 1 jam.



GAMBAR 3.10 HASIL PENGISIAN BATERAI

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyoroti pentingnya Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis Logika Fuzzy dalam mengoptimalkan efisiensi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya dalam proses pengisian baterai. Mengingat tantangan utama dalam sistem PLTS adalah fluktuasi daya akibat perubahan intensitas radiasi matahari, maka diperlukan metode kontrol yang adaptif untuk memastikan daya keluaran tetap optimal. Implementasi MPPT berbasis Logika Fuzzy yang dikombinasikan dengan buck-converter terbukti mampu meningkatkan stabilitas daya keluaran dan mempercepat pengisian baterai dibandingkan dengan MPPT Non-Fuzzy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MPPT berbasis Logika Fuzzy memiliki kinerja lebih unggul dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran, dengan kisaran 12V hingga 12,5V, dibandingkan dengan MPPT Non-Fuzzy yang memiliki variabilitas tegangan yang lebih besar. Dari segi arus pengisian, MPPT berbasis Logika Fuzzy mampu mengisi baterai dengan rata-rata arus 2,05 A, sehingga baterai 44 Ah dapat terisi penuh dalam 21 jam 46 menit. Sebaliknya, MPPT Non-Fuzzy hanya menghasilkan arus rata-rata 0,95 A, yang membutuhkan 46 jam 31 menit untuk pengisian penuh. Dengan demikian, sistem berbasis Logika Fuzzy lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi pengisian daya baterai. Temuan ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa algoritma MPPT berbasis kecerdasan buatan, seperti Logika Fuzzy dan Jaringan Saraf Tiruan, memiliki keunggulan dalam meningkatkan efisiensi energi dibandingkan metode konvensional seperti *Perturb and Observe* (P&O) [17], [18] atau *Incremental Conductance* (IncCond) [19]. Namun, hasil penelitian ini juga mengungkapkan bahwa meskipun MPPT berbasis Logika Fuzzy mempercepat pengisian daya, efisiensi konversinya sedikit lebih rendah dibandingkan MPPT Non-Fuzzy akibat penyesuaian daya dalam proses *step-down* menggunakan buck-converter.

Untuk pengembangan di masa mendatang, penelitian ini dapat

diperluas dengan beberapa perbaikan, seperti penggunaan algoritma hibrida yang menggabungkan Logika Fuzzy dengan metode optimasi lainnya, seperti Neural Network atau Algoritma Genetika, guna meningkatkan akurasi dan efisiensi sistem MPPT. Selain itu, penelitian lebih lanjut dapat berfokus pada optimasi parameter keanggotaan Logika Fuzzy, sehingga sistem dapat lebih responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Implementasi sistem MPPT ini juga dapat diuji dalam skenario beban yang lebih kompleks atau integrasi dengan jaringan listrik mikrogrid, untuk menilai potensi penerapannya dalam skala yang lebih besar.

Referensi

- [1] A. Khaffi, A. Rosyid Idris, J. Teknik Elektro, and P. Negeri Ujung Pandang, "Rancang Bangun Modul Trainer Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," *jurnal.poliupg.ac.id* Khaffi, AR Idris, S Sofyan Seminar Nas. Tek. Elektro dan Inform. (SNTETI), 2020. *jurnal.poliupg.ac.id*, 2020, Accessed: Feb. 22, 2025. [Online]. Available: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/snteti/article/view/2184>
- [2] A. Y. Salile, S. Nisworo, and S. Sumardi, "Analisis Fluktuasi Radiasi Matahari dan Implikasinya Terhadap Penempatan PLTS," *J. Profesi Ins. Indones.*, vol. 2, no. 6, pp. 354–358, Dec. 2024, doi: 10.14710/JPII.2024.24596.
- [3] M. Anggara and W. Saputra, "Analisis Kinerja Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline di Kabupaten Sumbawa NTB," *J. FLYWHEEL*, vol. 14, no. 1, pp. 7–12, Feb. 2023, doi: 10.36040/FLYWHEEL.V14I1.6521.
- [4] A. Faizal, "DESAIN MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) PADA PANEL SURYA MENGGUNAKAN METODE SLIDING MODE CONTROL," *SITEKIN J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 22–31, Dec. 2016, doi: 10.24014/SITEKIN.V14I1.2103.
- [5] A. Tetuko, D. Djuniadi, and E. Apriaskar, "Analisis Kinerja Maximum Power Point Tracker (MPPT) Pada Sistem Photovoltaic Standalone Berbasis Algoritme Perturb And Observe (P&O)," *PROtek J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, p. 72, 2021, doi: 10.33387/protek.v8i2.2768.
- [6] M. Ula, A. Rahmadani, and P. Elektronika Negeri Surabaya, "Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya dengan Metode Incremental Conductance Menggunakan Zeta Konverter," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–20, Apr. 2023, doi: 10.31358/TECHNE.V22I1.334.
- [7] M. HABIBI, M. N. HABIBI, D. N. PRAKOSO, N. A. WINDARKO, and A. TJAHJONO, "Perbaikan MPPT Incremental Conductance menggunakan ANN pada Berbayang Sebagian dengan Hubungan Paralel," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 8, no. 3, p. 546, Aug. 2020, doi: 10.26760/elkomika.v8i3.546.
- [8] H. Rusiana Iskandar et al., "Algoritma Incremental Conductance dan Perturbation Observation Sebagai Kendali MPPT PLTS 1000Wp," *J. Tek. Media Pengemb. Ilmu dan Apl. Tek.*, vol. 19, no. 2, pp. 79–89, Dec. 2020, doi: 10.26874/JT.VOL19NO02.151.
- [9] I. C. W. Aji, U. T. Kartini, S. I. Haryudo, and M. Widyartono,

- "Rancang Bangun Sistem Pompa Air Tenaga Surya Skala Rumah Tangga Menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan Metode Algoritma Perturb dan Observe untuk Memaksimalkan Daya," *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 10, no. 3, pp. 629–638, Jul. 2021, doi: 10.26740/JTE.V10N3.P629-638.
- [10] A. H. Sangaji and T. Rijanto, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Menggunakan Metode Artificial Neural Network untuk Panel Surya," *J. Tek. Elektro*, vol. 07, pp. 85–92, 2018.
- [11] I. G. Ferryawan, A. Natsir, and I. M. A. Nratha, "MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) PADA SISTEM FOTOVOLTAIK DENGAN BOOST CONVERTER BERBASIS LOGIKA FUZZY," *DIELEKTRIKA*, vol. 4, no. 2, pp. 147–154, Oct. 2017, Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://dielektrika.unram.ac.id/index.php/dielektrika/article/view/85>
- [12] H. P. Waseso, A. Lomi, and A. U. Krismanto, "Sistem Kendali MPPT Berbasis Fuzzy Logic Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Magn. J. Mhs. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 91–100, May 2024, Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/magnetika/article/view/10183>
- [13] M. Z. Abdullah, I. Sudiharto, and R. P. Eviningsih, "Photovoltaic System MPPT using Fuzzy Logic Controller," *Proc. - 2020 Int. Semin. Appl. Technol. Inf. Commun. IT Challenges Sustain. Scalability, Secur. Age Digit. Disruption, iSemantic 2020*, pp. 378–383, Sep. 2020, doi: 10.1109/ISEMANTIC50169.2020.9234200.
- [14] J. Lach, K. Wróbel, J. Wróbel, P. Podsadni, and A. Czerwiński, "Applications of carbon in lead-acid batteries: a review," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 23, no. 3, pp. 693–705, Mar. 2019, doi: 10.1007/S10008-018-04174-5/FIGURES/9.
- [15] G. J. May, A. Davidson, and B. Monahov, "Lead batteries for utility energy storage: A review," *J. Energy Storage*, vol. 15, pp. 145–157, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.EST.2017.11.008.
- [16] N. M. Nasab and S. Yazdani, "The advantages of lead-acid battery for off-grid design," *Energy Storage*, vol. 6, no. 2, p. e595, Mar. 2024, doi: 10.1002/EST2.595.
- [17] M. Dabboussi, A. Hmidet, and O. Boubaker, "An efficient fuzzy logic MPPT control approach for solar PV system: A comparative analysis with the conventional perturb and observe technique," *6th IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCON 2020*, pp. 366–371, Sep. 2020, doi: 10.1109/ENERGYCON48941.2020.9236503.
- [18] D. Remoaldo and I. S. Jesus, "Analysis of a Traditional and a Fuzzy Logic Enhanced Perturb and Observe Algorithm for the MPPT of a Photovoltaic System," *Algorithms 2021, Vol. 14, Page 24*, vol. 14, no. 1, p. 24, Jan. 2021, doi: 10.3390/A14010024.
- [19] E. Kandemir, S. Borekci, and N. S. Cetin, "Comparative Analysis of Reduced-Rule Compressed Fuzzy Logic Control and Incremental Conductance MPPT Methods," *J. Electron. Mater.*, vol. 47, no. 8, pp. 4463–4474, Aug. 2018, doi: 10.1007/S11664-018-6273-Y/METRICS.