

Perbandingan Efisiensi Pengendali Baterai Panel Surya PWM vs MPPT

Arsanto Narendro¹, Tatang Wirawan Wisnuadji^{1*}, Suwasti Broto¹

¹Fakultas Teknologi Informasi Universitas Budi Luhur, Jakarta, Indonesia

Email: 1*wisjhnuadji@budiluhur.ac.id

(* : coresponding author)

Abstrak– Pengendali pengisian diterapkan dalam beberapa sistem elektronik untuk melindungi dan mengontrol laju pengisian dan pengosongan baterai. Untuk sistem fotovoltaik (PV) yang tidak terhubung ke jaringan, terdapat dua jenis teknologi: Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). Dalam penelitian ini, kami membandingkan dua pengendali pengisian pada sistem PV dengan spesifikasi teknis yang sama untuk menentukan perilaku masing-masing di bawah kondisi lingkungan yang serupa. Implementasi kedua pengendali pengisian ini didasarkan pada firmware dan perangkat keras dengan desain asli, menggunakan teknologi PWM dan MPPT. Kedua sistem PV terdiri dari pengendali pengisian, panel surya 30 W, dan baterai 12V 18Ah. Dalam pengujian eksperimental, diukur tegangan dan arus di panel serta baterai selama proses pengisian dan pengosongan. Hasilnya menunjukkan bahwa pengendali MPPT memiliki efisiensi rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengendali PWM, mengindikasikan bahwa jenis teknologi yang digunakan dalam pengendali pengisian memiliki dampak langsung pada efisiensi, bahkan di bawah kondisi radiasi matahari dan suhu lingkungan yang tidak menguntungkan. Pengendali PWM adalah pilihan dengan efisiensi yang dapat diterima dan harga yang lebih rendah dibandingkan dengan pengendali MPPT.

Kata Kunci: Pengendali Pengisian, MPPT, Teknologi, PV, PWM

Abstract– Charging controllers are utilized in various electronic systems to manage and safeguard the charging and discharging rates of batteries. For off-grid photovoltaic (PV) systems, two main technologies are employed: Pulse Width Modulation (PWM) and Maximum Power Point Tracking (MPPT). This study compares two charging controllers in PV systems with the same technical specifications to evaluate their performance under similar environmental conditions. Both controllers are built on original firmware and hardware designs, incorporating PWM and MPPT technologies. Each PV system includes a charging controller, a 30 W solar panel, and a 12V 18Ah battery. During experimental trials, voltage and current measurements were taken at both the panel and battery during charging and discharging. The findings reveal that the MPPT controller achieves a higher average efficiency than the PWM controller, indicating that the technology used in the charging controller significantly affects efficiency, even in less than ideal solar radiation and temperature conditions. While the PWM controller is a more budget-friendly option with satisfactory efficiency, the MPPT controller outperforms it in efficiency.

Keywords: Charging Controller, MPPT, Technology, PV, PWM

1. PENDAHULUAN

Sumber energi terbarukan merupakan alternatif yang bersih dan dapat diandalkan (M. M. Hossain and M. Rahman, 2020); sumber-sumber ini dapat diterapkan secara bertahap untuk mengurangi pencemaran yang dihasilkan oleh sumber energi berbasis bahan bakar fosil (S. Chowdhury and M. Rahman, 2021). Di antara sumber energi terbarukan, energi surya fotovoltaik menonjol sebagai bentuk produksi energi listrik yang memanfaatkan radiasi matahari (J. K. Nayak and A. Das, 2021). Oleh karena itu, energi ini memungkinkan akses ke daerah pedesaan yang tidak memiliki kemungkinan untuk mendapatkan pasokan energi listrik konvensional (S. K. Patel and H. Shah, 2020). Sistem fotovoltaik dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu terhubung ke jaringan (Grid-tied) dan mandiri (Off-grid) (R. C. Bansal and S. Jain, 2021). Sistem Grid-tied terhubung ke jaringan listrik konvensional, sementara sistem Off-grid adalah sistem mandiri. Arsitektur sistem fotovoltaik mandiri terdiri dari susunan panel surya, bank baterai, pengendali pengisian, dan jika beban yang akan diberi daya adalah AC (arus bolak-balik), sistem ini juga dilengkapi dengan inverter DC/AC (Y. Zhang and Y. Wang, 2022). Salah satu elemen yang paling berpengaruh terhadap kualitas dan umur sistem adalah pengendali pengisian (M. R. Al-Mamun and S. Ahmed, 2018), karena fungsinya melindungi baterai dari pengisian berlebih dan pengosongan dalam (A. Kumar and R. Sharma, 2019). Pengendali pengisian juga dapat mengekstrak daya maksimum dari panel surya untuk disuplai ke beban, berdasarkan karakteristiknya. Pengendali

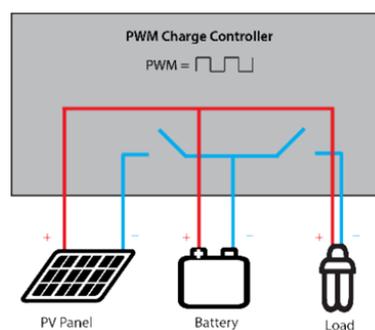
PWM(Kumar, 2020) dan MPPT(S. Rana and P. Kumar, 2019) adalah dua jenis yang paling umum; tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan jenis pengendali mana yang menawarkan rasio biaya-manfaat terbaik di bawah kondisi lingkungan yang serupa. Kedua sistem fotovoltaik yang diterapkan dalam penelitian ini adalah desain asli dengan karakteristik teknis yang sama, yang terdiri dari panel surya 30 W dan baterai asam timbal Absorbent Glass Mat (AGM) dengan tegangan nominal 12 V dan kapasitas 18 Ah. Dalam kedua sistem, diukur tegangan dan arus pada panel surya dan baterai, suhu lingkungan di sekitar panel surya, serta radiasi matahari yang masuk untuk membandingkan efisiensi sistem fotovoltaik selama waktu pengambilan sampel yang sama pada proses pengisian dan pengosongan baterai. Selain itu, kedua sistem menerapkan metode tegangan sirkuit terbuka bersamaan dengan algoritma penghitungan ampere-jam untuk memperkirakan status pengisian baterai(S. Singh and A. Gupta, 2021). Algoritma pengisian baterai terdiri dari tiga tahap: tahap pertama adalah Bulk atau pengisian dengan arus konstan, di mana pengendali pengisian memberikan semua arus yang mungkin ke baterai hingga mencapai 80% dari kapasitasnya. Selanjutnya adalah tahap absorpsi, atau pengisian berlebih yang terkontrol, di mana pengendali mempertahankan tegangan konstan dan nilai arus secara bertahap menurun saat baterai menyelesaikan proses pengisiannya. Terakhir, tahap float adalah ketika baterai telah terisi hingga 100%. Dengan menganalisis data yang diperoleh dari perbandingan kedua sistem fotovoltaik, pengendali MPPT terbukti lebih efisien daripada pengendali PWM dalam waktu operasi yang berkepanjangan. Kami juga menemukan bahwa kondisi lingkungan tidak mempengaruhi efisiensi pengendali pengisian. Namun, dari perbandingan antara kedua pengendali, kami menentukan kondisi di mana pengendali PWM dapat diterapkan sebagai pengganti pengendali MPPT, dengan mengorbankan efisiensi demi penghematan biaya.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk melakukan perbandingan kinerja antara pengendali pengisian MPPT dan pengendali PWM, digunakan dua sistem fotovoltaik dengan spesifikasi teknis yang sama. Pada kedua sistem tersebut, digunakan panel surya poli kristalin dengan daya 30 W, dan titik daya maksimum (V_{mp}) sebesar 18 V serta arus maksimum (I_{mp}) sebesar 1,667 A. Untuk baterai, kedua sistem menggunakan baterai dengan tegangan nominal 12 V dan kapasitas 18 Ah. Pada sistem dengan pengendali MPPT, digunakan lampu DC 6 W sebagai beban; sedangkan untuk pengendali PWM, karena tidak dapat menyuplai daya maksimum dari panel surya untuk menyalakan lampu, digunakan lampu DC 4 W sebagai beban.

2.1 Pengendali PWM

Sirkuit elektronik dari pengendali PWM yang dirancang terdiri dari sub-sirkuit kontrol dan sub-sirkuit daya. Komponen utama dari sub-sirkuit kontrol adalah sebuah mikrokontroler, yang menerima sinyal tegangan dari sensor tegangan dan arus sistem. Mikrokontroler memproses data ini dan memodifikasi siklus tugas dari dua sinyal PWM: satu untuk mengontrol aliran arus dari panel ke baterai, dan yang lainnya untuk mengontrol aliran arus dari baterai ke beban yang terhubung. Sensor tegangan berfungsi sebagai pembagi tegangan yang mengukur tegangan panel dan baterai. Arus yang mengalir ke baterai dan arus yang disuplai oleh baterai diukur dengan sensor arus Hall Effect. Seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem dengan PWM

Disisi lain, sub-sirkuit daya terdiri dari dua Transistor Efek Medan (MOSFET) berbahan semikonduktor oksida logam, yang melakukan switching koneksi antara panel surya, baterai, dan beban. Switching on dan off yang dilakukan oleh MOSFET disinkronkan dengan sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler. Untuk menghasilkan tegangan pemicu bagi MOSFET, dua tahap penguatan diterapkan menggunakan Transistor Bipolar (BJT); tegangan keluaran dari tahap penguatan ini disuplai ke terminal Gate dan Source dari MOSFET.

Untuk perhitungan efisiensi pada kedua pengendali pengisian, variabel tegangan dan arus dari baterai serta panel surya dipertimbangkan seperti yang ditetapkan dalam persamaan (1).

$$\text{Efisiensi} = \frac{V_{\text{Bat}} \times I_{\text{Bat}}}{V_{\text{Panel}} \times I_{\text{Panel}}} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

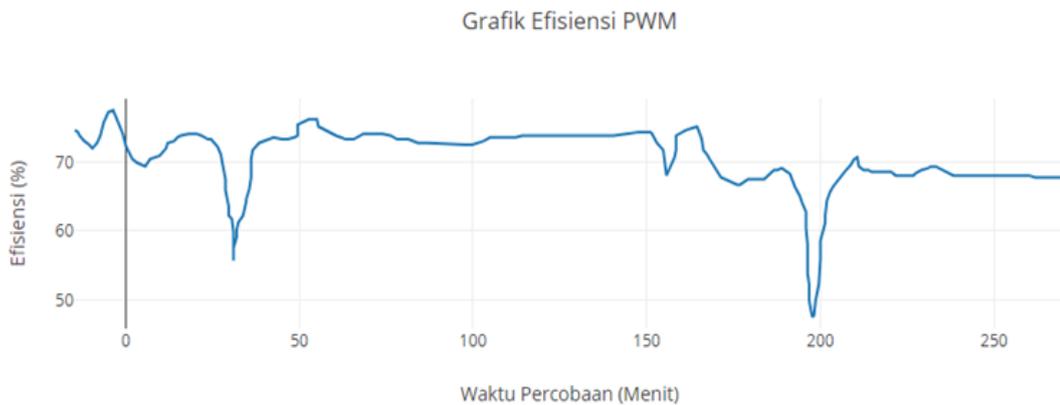
V_{Bat} : Voltage dari baterai (V)

I_{Bat} : Arus baterai (A)

V_{Panel} : Tegangan pada solar panel (V)

I_{Panel} : Arus Output pada solar panel (A)

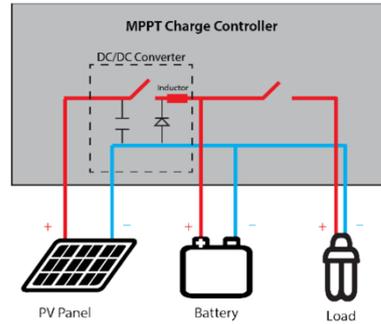
Efisiensi pengendali pengisian PWM dihitung dengan mengambil data tegangan dan arus dari panel surya dan baterai saat pengendali beroperasi selama 8 jam berturut-turut. Proses pengukuran ini diulang selama 7 hari berturut-turut untuk memeriksa transisi tahap pengisian dan menguji perilaku pengendali dalam kondisi operasi normal. Selain itu, suhu lingkungan di sekitar panel surya diukur menggunakan termokopel dari multimeter digital SANWA; radiasi matahari yang jatuh pada panel juga diukur menggunakan Lightmeter type Uyigao UA-962. Pengujian dilakukan dengan suhu ambient di atas 30° C. Setelah mengukur berbagai variabel selama implementasi pengendali PWM, efisiensi rata-rata dihitung. Gambar 2. menunjukkan efisiensi pengendali pengisian PWM terhadap waktu yang telah berlalu dalam eksperimen.



Gambar 2. Grafik Efisiensi Sistem PWM

2.2 Pengendali MPPT

Pengendali ini terdiri, mirip dengan pengendali PWM, dari dua sub-sirkuit: satu untuk fungsi kontrol dan satu lagi untuk menyuplai daya yang diperlukan. Mengenai sub-sirkuit kontrol, mikrokontroler bertanggung jawab untuk interpretasi dan evaluasi variabel, pengoperasian algoritma, serta kontrol antarmuka manusia-mesin. Sub-sirkuit daya terdiri dari konverter buck DC/DC tanpa kapasitor yang dimodifikasi; konverter ini memungkinkan interaksi antara panel surya, baterai, dan beban. Seperti terlihat pada Gambar 3.

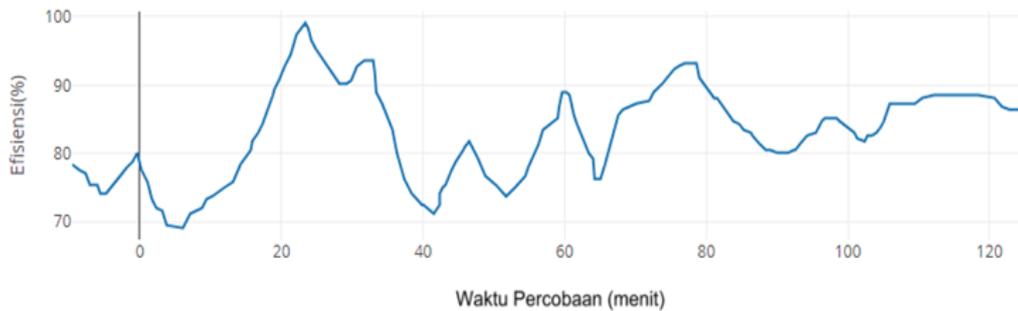


Gambar 3. Sistem Pengendali MPPT

Pada pengendali ini, algoritma Perturbation and Observation (P&O) diterapkan. Algoritma ini terdiri dari variasi siklus tugas konverter untuk mengubah daya yang disuplai oleh panel surya. Algoritma mengevaluasi apakah variasi tegangan konverter menghasilkan peningkatan atau penurunan daya dari panel surya, kemudian mengubah siklus tugas dan dengan demikian tegangan konverter sesuai dengan pencarian energi maksimum dari panel surya. Untuk kontrol ini, diperlukan sensor tegangan dan arus di input dan output pengendali pengisian. Sensor Hall Effect yang digunakan untuk mengukur arus, sementara pengukuran tegangan dilakukan menggunakan pembagi tegangan.

Sama seperti eksperimen sebelumnya yang dijelaskan di bagian B, kami mengukur tegangan dan arus dari panel surya dan baterai, suhu lingkungan, serta radiasi matahari. Kemudian, efisiensi pengendali MPPT ditentukan menggunakan persamaan (1). Selama eksperimen, algoritma pengisian dan pengosongan yang diusulkan, tahap pengisian, dan kinerja pengendali diverifikasi. Pengujian dilakukan di bawah karakteristik lingkungan yang mirip dengan yang ada dalam eksperimen pengendali PWM, dengan suhu di atas 30 °C dan radiasi matahari di atas 700 W/m². Efisiensi pengendali MPPT terhadap waktu yang berlalu selama pengujian disajikan dalam Gambar 4.

Grafik Efisiensi MPPT



Gambar 4. Grafik Efisiensi MPPT

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1 Metode Pengumpulan Data

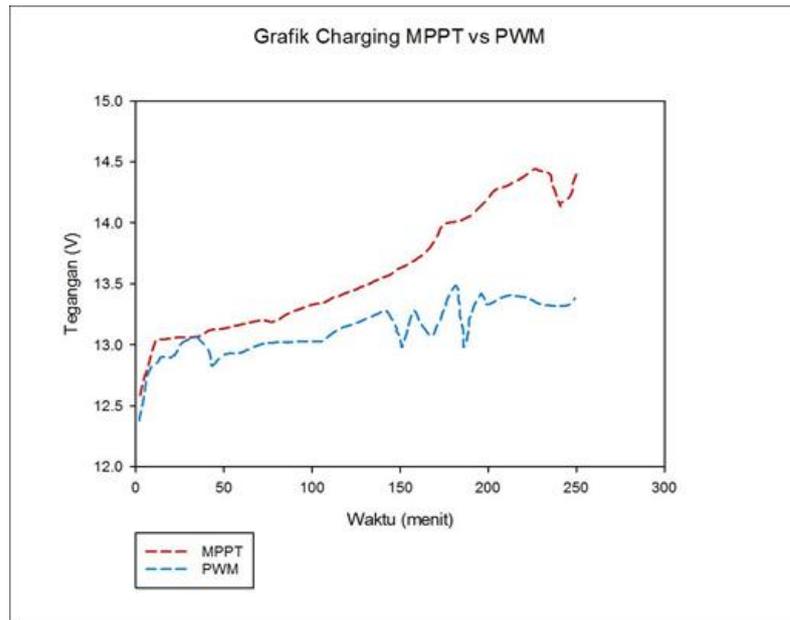
Perbandingan antara pengendali MPPT dan PWM dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi keduanya terhadap rata-rata radiasi matahari yang masuk dan suhu lingkungan di sekitar sistem fotovoltaik. Dalam eksperimen pengendali MPPT, rata-rata radiasi matahari yang masuk adalah 744 W/m² dengan suhu lingkungan rata-rata 42 °C. Di sisi lain, dalam eksperimen pengendali PWM, rata-rata radiasi matahari yang masuk adalah 813 W/m² dengan suhu lingkungan rata-rata 40 °C (lihat Tabel I).

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik PWM vs MPPT

Pengendali	Suhu (°C)	Radiasi (W/m ²)	Efisiensi (%)
PWM	40	813	71
MPPT	42	744	87

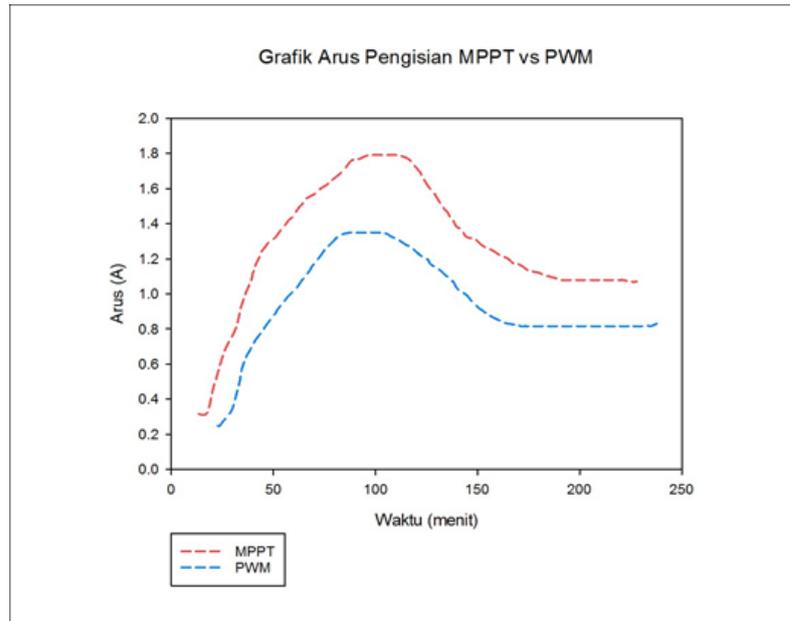
Data yang diukur pada kedua pengendali pengisian tidak diambil secara bersamaan, tetapi eksperimen dilakukan di bawah kondisi lingkungan yang serupa. Seperti yang terlihat pada Tabel 1, terdapat perbedaan suhu hanya sebesar 6,48% dan perbedaan radiasi sebesar 8,49% selama pengujian yang dilakukan pada kedua pengendali pengisian. Efisiensi pengendali MPPT melebihi efisiensi pengendali PWM sebesar 15,4%, meskipun kondisi lingkungan yang sedikit lebih baik ditunjukkan dalam eksperimen pengendali PWM. Mengenai proses pengisian, Gambar 5. menunjukkan perbandingan variasi tegangan pada baterai di kedua pengendali, sementara Gambar 6. menggambarkan perbandingan variasi arus yang disuplai oleh pengendali pengisian ke baterai.

Seperti yang terlihat pada Gambar 5, selama operasi pengendali MPPT, 200 menit pertama merupakan tahap Bulk dari proses pengisian, di mana tegangan baterai meningkat secara linier hingga mencapai sekitar 14,7 V. Setelah itu, pengendali mempertahankan nilai tegangan ini, yang merupakan tahap Absorpsi. Akhirnya, setelah 250 menit, tegangan menurun drastis, akibat tindakan pengendali untuk mengurangi arus yang disuplai ke baterai agar tegangan tetap di bawah nilai mengambang. Dalam kasus PWM, selama 215 menit pertama, pengendali berada di tahap Bulk yang meningkatkan tegangan baterai; setelah mencapai tahap absorpsi, pengendali mempertahankan tegangan sekitar 13,7 V.



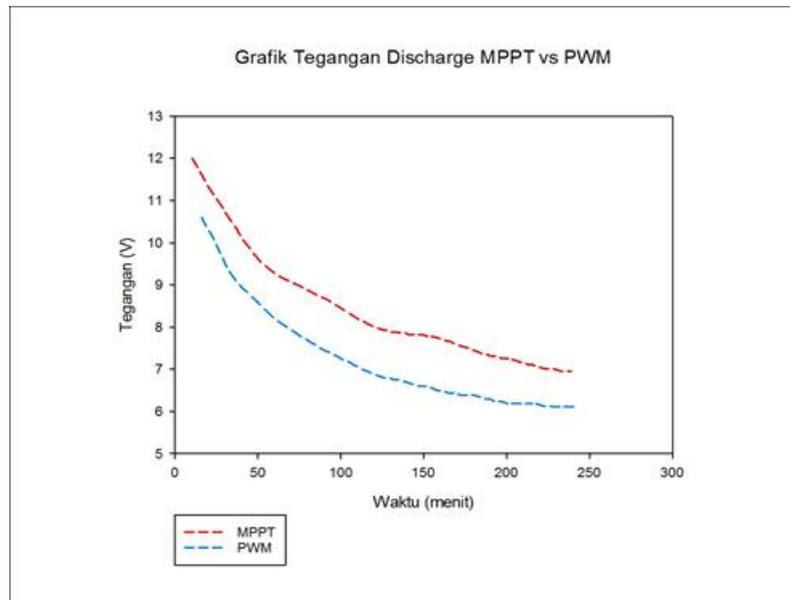
Gambar 5. Grafik Charging MPPT vs PWM

Pengendali MPPT mengalirkan lebih banyak arus dari panel surya ke baterai, dan itulah sebabnya tegangan meningkat lebih banyak pada tahap Bulk dibandingkan dengan pengendali PWM. Merujuk pada Gambar 6, arus yang disuplai oleh pengendali MPPT melebihi nilai 1 A, mencapai hingga 1,8 A selama 120 menit pertama, yang berarti pengendali berada di tahap Bulk. Setelah pengendali mulai beroperasi di tahap absorpsi, arus menurun ke nilai di bawah 1 A. Dalam kasus pengendali PWM, arus meningkat hingga mendekati 1,2 A selama 120 menit pertama saat beroperasi di tahap Bulk, dan setelah mencapai tahap absorpsi, arus sedikit menurun. Pada menit ke-150, arus yang disuplai ke baterai menurun drastis, karena saat pengukuran dilakukan, radiasi matahari yang jatuh menurun di bawah 300 W/m², yang menyebabkan panel surya menghasilkan arus yang lebih rendah, dan teknologi yang digunakan oleh pengendali PWM tidak dapat memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh panel.



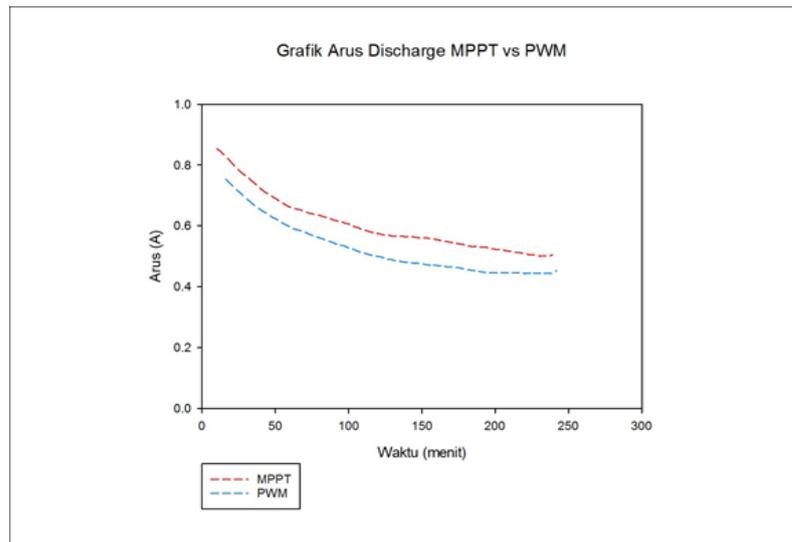
Gambar 6. Grafik Arus Pengisian

Untuk proses pengosongan, kami membandingkan penurunan tegangan baterai terhadap waktu untuk kedua pengendali seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7. Variasi arus yang disuplai ke beban juga dibandingkan, dan dapat dilihat pada Gambar 8. Perlu dicatat bahwa dalam pengujian pengosongan untuk pengendali MPPT, digunakan beban DC sebesar 6 W, sementara dalam pengujian pengosongan untuk pengendali PWM, digunakan beban DC sebesar 4 W.



Gambar 7. Tegangan Discharge

Dalam proses pengosongan, kedua baterai memulai dengan nilai tegangan 13,8 V, dan selama 200 menit, tegangan baterai yang menggunakan pengendali MPPT menurun menjadi 12,0 V, sementara dalam kasus pengendali PWM, tegangan baterai menurun menjadi 11,8 V. Variasi kecil ini disebabkan oleh perbedaan beban sebesar 2 W yang terhubung ke masing-masing pengendali. Namun, perilaku penurunan tegangan seiring waktu adalah serupa pada kedua kasus tersebut. Seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Arus Discharge

Mengenai perilaku arus yang disuplai ke beban dalam proses pengosongan baterai, terlihat profil penurunan yang serupa untuk kedua pengendali. Perbedaan antara tingkat arus disebabkan oleh fakta bahwa daya beban yang terhubung ke pengendali MPPT lebih besar dibandingkan dengan yang digunakan pada pengendali PWM. Dalam kedua kasus, arus yang disuplai dari baterai ke beban relatif konstan seiring waktu, dengan penurunan hanya sebesar 24 mA pada pengendali MPPT dan penurunan arus sebesar 16 mA untuk pengendali PWM.

4. KESIMPULAN

Efisiensi rata-rata pengendali MPPT adalah 15% lebih tinggi dibandingkan dengan pengendali PWM, meskipun dalam pengujian pengendali PWM, kondisi lingkungan lebih menguntungkan, seperti suhu ambient yang lebih rendah yang berarti suhu sel panel surya juga lebih rendah, dan radiasi matahari rata-rata yang 70 W/m² lebih tinggi. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa jenis teknologi yang diterapkan pada pengendali pengisian mempengaruhi efisiensi transfer daya dari panel surya ke baterai lebih besar dibandingkan dengan radiasi matahari yang masuk atau suhu lingkungan. Dalam proses pengisian baterai, tegangan pada pengendali pengisian MPPT meningkat dengan kecepatan yang lebih cepat dibandingkan dengan pengendali PWM, mencapai nilai maksimum 14,7 V ketika pengendali PWM mencapai nilai maksimum 13,7 V. Di sisi lain, peningkatan arus yang disuplai ke baterai pada kedua sistem teramati, mencapai titik maksimum 1,8 A untuk MPPT dan 1,4 A untuk PWM. Setelah 200 menit, kedua nilai mulai mendekati satu sama lain hingga mencapai titik di mana kedua sistem menyuplai arus sekitar 0,9 A ke baterai, karena setelah 200 menit, pengendali MPPT masuk ke tahap absorpsi, sementara pengendali PWM masuk ke tahap yang sama setelah 215 menit. Selama proses pengosongan, tegangan menurun dengan kecepatan yang serupa dan konstan untuk kedua pengendali, sementara perilaku arus relatif konstan dengan penurunan yang sangat kecil untuk masing-masing kasus. Pengendali pengisian MPPT memiliki efisiensi rata-rata yang lebih tinggi dan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan pengendali PWM. Namun, pengendali pengisian PWM menawarkan opsi efisiensi yang dapat diterima serta biaya rendah dibandingkan dengan pengendali MPPT.

REFERENCES

- A. Kumar and R. Sharma. (2019). Analysis of MPPT vs PWM Control in Standalone Solar Systems. *Solar Energy*, 182, 9.
- J. K. Nayak and A. Das. (2021). Investigating the Efficiency of MPPT and PWM Controllers in Solar PV Arrays. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 135(1), 110184.

- Kumar, I. M. A. Khan and A. (2020). Comparison of MPPT and PWM Techniques for Solar PV Applications. *Int. J. Renew. Energy Res*, 10(3), 11.
- M. M. Hossain and M. Rahman. (2020). Dynamic Performance Analysis of MPPT and PWM Technologies in Solar PV Systems,. *Renewable Energy*, 145, 8.
- M. R. Al-Mamun and S. Ahmed. (2018). Performance Comparison of MPPT and PWM Controllers in Photovoltaic Systems. *J. Power Electron*, 18(3), 11.
- R. C. Bansal and S. Jain. (2021). Comparative Study of MPPT and PWM Control Techniques in Solar PV Applications,. *Int. J. Energy Res*, 45(13), 13.
- S. Chowdhury and M. Rahman. (2021). A Comparative Study of MPPT and PWM Techniques in Solar Energy Harvesting. *Energy Convers. Manage*, 249, 114813.
- S. K. Patel and H. Shah. (2020). A Review of MPPT and PWM Techniques for Optimal Solar Power Generation. *J. Renew. Sustain. Energy*, 12(4), 043108. <https://doi.org/doi:10.1063/5.0005862>.
- S. Rana and P. Kumar. (2019). Evaluating the Efficiency of MPPT and PWM in PV Systems. *J. Electr. Eng. Autom*, 1(2), 8.
- S. Singh and A. Gupta. (2021). Performance Analysis of MPPT and PWM Controllers in Solar Energy Systems. *Energy Rep*, 7(2), 8.
- Y. Zhang and Y. Wang. (2022). Performance Evaluation of MPPT and PWM Methods in Solar Energy Conversion. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 13, 110184. <https://doi.org/doi:10.1109/TSTE.2021.3080801>