

Pengembangan Model Pengisian Dinamis Paralel Baterai untuk Optimasi Produksi Daya Sistem PV Off-Grid

I Wayan Sutaya^{1*}, Ketut Udy Ariawan², I Putu Suka Arsa³

^{1,2}Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

³Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

*wsutaya@undiksha.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan model pengisian dinamis paralel baterai untuk mengoptimalkan produksi daya sistem photovoltaic (PV) off-grid. Sistem pengisian baterai yang umum digunakan saat ini bersifat statis, dengan baterai terpasang secara paralel tetap (fix), sehingga setiap baterai memiliki persentase pengisian dan tegangan yang sama. Selain itu, model statis ini menghadapi kendala dalam penambahan baterai atau PV baru dan menyebabkan PV tidak selalu bekerja pada titik maksimum jika kapasitas baterai yang tersedia tidak sesuai dengan kebutuhan sistem. Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian ini mengusulkan model dinamis yang memungkinkan baterai secara otomatis menyambung atau memutuskan diri dari rangkaian paralel sesuai dengan produksi daya PV, sehingga kapasitas baterai dapat menyesuaikan dengan kebutuhan sistem secara fleksibel. Dengan model ini, PV dapat bekerja pada titik maksimum secara konsisten, sehingga efisiensi penggunaan daya meningkat. Simulasi model dilakukan menggunakan MATLAB Simulink dengan konfigurasi PV berkapasitas 200 Watt dan tiga baterai masing-masing 12 V, 10 Ah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model ini mampu memastikan PV bekerja pada titik maksimum dan meningkatkan efisiensi proses pengisian baterai secara signifikan.

Kata Kunci: MATLAB Simulink, Optimasi produksi daya, Pengisian dinamis baterai, Sistem photovoltaic (PV) off-grid

1. PENDAHULUAN

Energi terbarukan telah menjadi salah satu solusi utama dalam mengatasi permasalahan lingkungan dan krisis energi global yang semakin kompleks. Dunia semakin menyadari pentingnya beralih dari sumber energi berbasis bahan bakar fosil menuju penggunaan energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu bentuk energi terbarukan yang paling potensial dan telah diimplementasikan secara luas adalah energi surya. Energi ini menggunakan sinar matahari sebagai sumber utama, yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui teknologi yang dikenal sebagai Photovoltaic (PV) atau panel surya (Maka & Alabid, 2022).

Teknologi PV memanfaatkan fenomena fisika fotovoltaiik di mana sinar matahari yang mengenai permukaan panel surya akan menghasilkan arus listrik. Energi yang dihasilkan dari panel ini dapat disimpan dalam baterai untuk penggunaan di masa mendatang, atau dapat langsung digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi (Feron, 2016). Dalam beberapa dekade terakhir, sistem PV telah diterapkan pada berbagai skala, baik untuk kebutuhan perumahan hingga industri besar. Namun, penerapan teknologi ini sering mengalami tantangan, terutama dalam hal efisiensi pengisian dan penyimpanan energi, khususnya pada sistem yang tidak terhubung ke jaringan listrik pusat atau sering disebut sistem off-grid.

Sistem PV off-grid menjadi solusi yang sangat penting terutama di wilayah-wilayah terpencil yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik konvensional. Dalam sistem ini, panel surya bekerja secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik pusat, sehingga dapat menyediakan akses energi yang terjangkau dan mandiri bagi masyarakat di wilayah tersebut. Namun, untuk dapat beroperasi dengan efisien, sistem ini membutuhkan penyimpanan energi dalam bentuk baterai yang berfungsi untuk menyimpan daya yang dihasilkan ketika intensitas sinar matahari tinggi dan menggunakannya kembali ketika intensitas cahaya menurun atau saat malam hari.

Pada sistem konvensional, baterai dalam sistem off-grid biasanya dihubungkan secara paralel dalam konfigurasi tetap (Watil, 2024). Meskipun konfigurasi ini memungkinkan setiap baterai diisi pada waktu yang bersamaan, sistem ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, baterai yang terhubung secara paralel cenderung memiliki persentase pengisian dan tegangan yang sama, tanpa mempertimbangkan kebutuhan kapasitas masing-masing baterai. Hal ini dapat mengakibatkan ketidakseimbangan beban dan menurunkan umur baterai dalam jangka panjang. Selain itu, konfigurasi tetap juga menyulitkan dalam hal penambahan unit baterai atau PV baru, karena semua elemen harus disesuaikan ulang untuk menjaga keseimbangan dan performa sistem secara keseluruhan.

Selain itu, sistem paralel tetap membuat PV sulit untuk mencapai titik daya maksimum atau Maximum Power Point (MPP) secara konsisten, terutama saat intensitas sinar matahari berubah-ubah (Hien dkk., 2023). Ketika kapasitas baterai tidak optimal sesuai dengan daya yang dihasilkan PV, potensi maksimum dari PV tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya. Hal ini mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan dan menyebabkan terjadinya pemborosan energi. Oleh karena itu, diperlukan sebuah model pengisian dinamis yang mampu menyesuaikan kapasitas baterai sesuai dengan kondisi daya yang dihasilkan oleh PV secara real-time.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model pengisian dinamis paralel baterai yang memungkinkan baterai untuk secara otomatis terhubung atau terputus dari sistem berdasarkan daya yang dihasilkan oleh PV dan kapasitas penyimpanan yang tersedia. Dengan menggunakan model ini, kapasitas baterai dapat disesuaikan secara fleksibel dan optimal mengikuti perubahan intensitas sinar matahari, sehingga PV dapat bekerja pada titik daya maksimum sepanjang waktu. Model ini tidak hanya menawarkan peningkatan efisiensi penggunaan daya, tetapi juga menyediakan fleksibilitas lebih besar bagi sistem PV off-grid dalam menghadapi perubahan kebutuhan energi atau perluasan kapasitas sistem di masa depan.

Untuk menguji efektivitas model ini, penelitian ini melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink. Simulasi dilakukan dengan sistem PV berkapasitas maksimum 200 Watt dan tiga baterai berkapasitas masing-masing 12 V, 10 Ah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model pengisian dinamis paralel baterai mampu meningkatkan efisiensi sistem dengan menjaga agar PV tetap beroperasi pada titik daya maksimum. Melalui artikel ini, akan dijelaskan proses pengembangan, simulasi, dan hasil uji coba dari model pengisian dinamis ini untuk optimasi sistem PV off-grid. Diharapkan, penelitian ini dapat menjadi landasan untuk pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan mudah diadaptasi sesuai dengan kebutuhan masyarakat, khususnya di daerah-daerah terpencil.

Dengan semakin berkembangnya kebutuhan energi yang ramah lingkungan dan efisien, teknologi seperti pengisian dinamis paralel baterai menjadi salah satu inovasi penting yang dapat mendorong implementasi energi terbarukan lebih luas. Melalui pengembangan dan pengujian model ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi karbon, penghematan energi, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat yang mengandalkan energi terbarukan sebagai sumber daya utama.

2. KAJIAN PUSTAKA

Berbagai strategi pengisian baterai telah dibandingkan untuk meningkatkan kinerja sistem PV off-grid (Dorel dkk., 2023). Strategi-strategi tersebut mencakup pengisian tegangan konstan, arus konstan, modulasi lebar pulsa (PWM), dan metode hibrida yang menggabungkan beberapa teknik pengisian.

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/RC}$$

Dalam metode Constant Voltage Charging (CVC), tegangan dijaga tetap konstan selama arus secara bertahap berkurang hingga baterai mencapai kapasitas penuh. Sebaliknya, metode Constant Current Charging (CCC) menjaga arus konstan sementara tegangan naik hingga mencapai batas aman baterai. Metode ini memungkinkan baterai terisi penuh dalam waktu yang lebih cepat namun menuntut pengaturan yang lebih hati-hati untuk menghindari overcharging yang dapat merusak sel baterai.

Metode PWM, yang lebih dinamis, berfungsi mengontrol aliran arus secara terputus-putus untuk menghindari pengisian berlebih dan memperpanjang umur baterai. PWM mengatur kecepatan pengisian dengan menggunakan sinyal berdenyut yang memungkinkan arus dialirkan dalam jeda waktu tertentu. Teknik ini sangat berguna pada sistem PV yang harus mengoptimalkan daya yang dihasilkan selama periode intensitas cahaya yang rendah atau kondisi cuaca yang berubah-ubah.

Penelitian (Chtita dkk., 2021) lebih lanjut juga menyoroti pentingnya pengontrol pengisian untuk menjaga kestabilan aliran daya pada sistem PV off-grid. Pengontrol pengisian harus mampu mengimbangi variasi intensitas cahaya dan permintaan beban, yang dapat menyebabkan fluktuasi daya dan mengurangi efisiensi pengisian. Untuk mencapai kontrol yang optimal, kompensator

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau$$

Proportional-Integral (PI) sering digunakan dalam sistem PV off-grid. Pengontrol PI berfungsi untuk memastikan aliran daya stabil dengan cara mengurangi error antara daya output aktual dan nilai referensi.

Melalui pengaturan ini, sistem dapat mempertahankan titik daya maksimum (Maximum Power Point - MPP) yang diperlukan untuk menjaga efisiensi pada kondisi cuaca yang berubah-ubah.

Algoritma Incremental Conductance (IC-MPPT) diterapkan untuk memaksimalkan pemanfaatan daya PV dengan mendeteksi perubahan konduktansi terhadap tegangan (Mirza dkk., 2020). Algoritma ini sangat penting untuk memastikan bahwa PV beroperasi di MPP dalam berbagai kondisi cuaca, sehingga daya yang dihasilkan dapat dimanfaatkan dengan optimal. Dengan algoritma IC-MPPT, sistem PV off-grid dapat menjaga tingkat pengisian baterai pada kondisi optimal serta menyesuaikan pengisian daya sesuai kebutuhan yang berubah-ubah.

Sistem yang menggunakan pengontrol PI dan algoritma IC-MPPT menunjukkan efisiensi yang sangat tinggi. Dalam penelitian yang telah dilakukan, sistem ini mampu mencapai efisiensi hingga 99,79% dengan osilasi daya yang sangat rendah. Pendekatan ini tidak hanya menjaga keseimbangan daya secara optimal tetapi juga memperpanjang umur baterai, terutama di lingkungan off-grid yang rentan terhadap fluktuasi cuaca dan permintaan energi. Selain itu, simulasi yang dilakukan pada beberapa studi menunjukkan bahwa waktu konvergensi untuk mencapai MPP dapat dipercepat dengan algoritma ini, yang sangat membantu dalam menjaga stabilitas daya pada sistem PV off-grid (A. I. M. Ali dkk., 2021).

$$t_c \approx \min \left(\frac{dP}{dV} + \frac{I}{V} \right) = 0$$

Rumus tersebut menunjukkan bahwa waktu konvergensi (t_c) adalah waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai titik daya maksimum atau Maximum Power Point (MPP), yang merupakan kondisi optimal di mana panel surya menghasilkan daya maksimum (Worku dkk., 2023). Semakin kecil nilai t_c , semakin cepat sistem mencapai MPP, yang berarti sistem dapat segera beroperasi pada efisiensi tertinggi. Variabel dP/dV adalah turunan daya (P) terhadap tegangan (V), yang menunjukkan laju perubahan daya terhadap perubahan tegangan. Di titik MPP, nilai $dP/dV = 0$, yang berarti daya mencapai maksimum untuk nilai tegangan tertentu.

Studi tambahan juga menunjukkan bahwa sistem penyimpanan energi berbasis PV harus mempertimbangkan faktor lingkungan seperti suhu dan intensitas radiasi matahari. Perubahan suhu dapat mempengaruhi resistensi internal baterai dan mengubah kapasitas penyimpanan, sedangkan intensitas radiasi matahari yang bervariasi dapat memengaruhi jumlah energi yang dihasilkan oleh panel surya. Oleh karena itu, pemantauan suhu dan radiasi matahari sangat penting dalam sistem PV untuk memastikan baterai diisi dengan aman dan efisien. Dengan menambahkan sensor suhu dan radiasi, pengontrol dapat menyesuaikan pengisian untuk menghindari potensi overcharging atau undercharging yang dapat merusak baterai.

Selain itu, beberapa penelitian mengemukakan perlunya penggunaan metode penyimpanan yang lebih fleksibel, seperti baterai lithium-ion yang memiliki efisiensi pengisian tinggi dan dapat diisi ulang dengan cepat dibandingkan dengan baterai lead-acid tradisional. Penggunaan baterai lithium-ion dalam sistem PV off-grid memungkinkan penyesuaian yang lebih cepat terhadap perubahan beban dan cuaca. Baterai ini juga memiliki siklus hidup yang lebih panjang dan efisiensi yang lebih tinggi, sehingga menjadi pilihan yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan dalam jangka panjang.

Teknologi kontrol daya juga terus berkembang dengan penerapan algoritma canggih seperti Fuzzy Logic Control (FLC) dan Artificial Neural Network (ANN) untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem. FLC memungkinkan pengontrol untuk menyesuaikan aliran daya dengan cepat dalam kondisi yang tidak pasti, sementara ANN dapat memprediksi kondisi optimal berdasarkan data historis (M. N. Ali dkk., 2021). Penggunaan teknologi ini dalam sistem PV off-grid tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga memberikan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan cuaca yang mendadak dan permintaan energi yang bervariasi.

Secara keseluruhan, perkembangan teknologi dalam pengisian dan penyimpanan energi melalui PV telah memberikan kontribusi signifikan terhadap keberlanjutan dan efektivitas energi terbarukan. Dengan memanfaatkan pengontrol yang adaptif, algoritma MPP yang efisien, dan teknologi baterai yang canggih, sistem PV off-grid diharapkan dapat mendukung kebutuhan energi di wilayah-wilayah terpencil dan membantu mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.

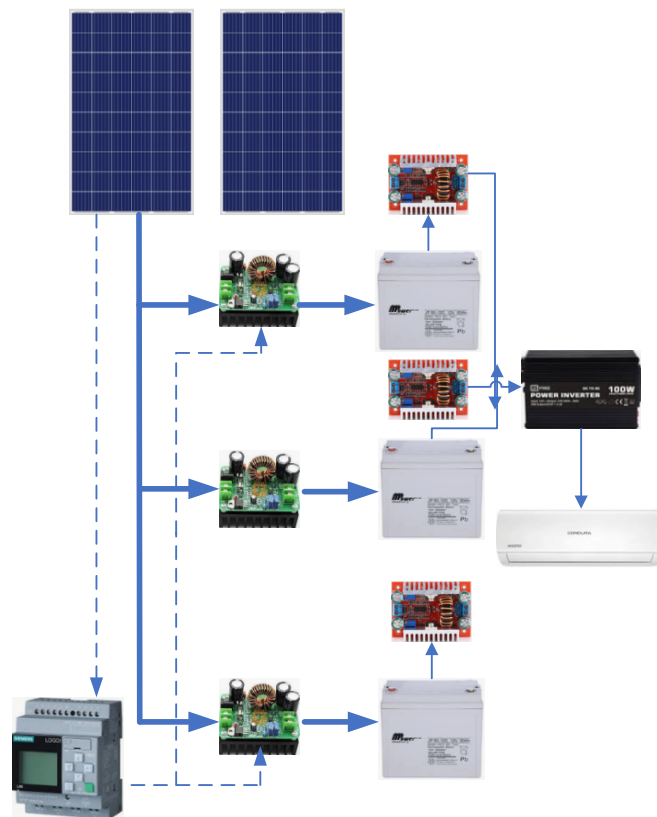
3. METODE

Gambar 1 menunjukkan skema sistem Rooftop PV Off-Grid dengan metode dinamik paralel baterai untuk meningkatkan efisiensi pengisian daya dan ketercapaian produksi daya maksimum. Panel surya berperan sebagai sumber energi utama yang mengubah sinar matahari menjadi listrik dalam bentuk arus searah (DC). Energi dari panel ini kemudian disalurkan ke beberapa komponen pengisian melalui DC-DC converter atau modul regulator, yang bertugas mengatur tegangan output agar sesuai dengan kebutuhan

baterai dan perangkat lain. Metode dinamik paralel memungkinkan beberapa baterai dihubungkan dan dikendalikan secara efisien dengan pembagian beban yang seimbang, sehingga meningkatkan kapasitas penyimpanan energi dan memaksimalkan kinerja sistem.

Setiap baterai pada sistem ini memiliki modul pengatur arus atau tegangan tersendiri untuk memastikan proses pengisian berlangsung optimal tanpa terjadi overcharging. Energi yang tersimpan dalam baterai dapat diubah menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter, sehingga bisa digunakan untuk mengoperasikan peralatan rumah tangga, seperti AC (air conditioner) yang terlihat pada diagram. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan Programmable Logic Controller (PLC), yang berfungsi mengatur alur energi secara otomatis. PLC memastikan pengisian daya berjalan efisien, mengatur kapan setiap baterai harus diisi, dan menjaga agar sistem bekerja secara optimal.

Keunggulan dari metode dinamik paralel baterai ini adalah optimalisasi pengisian, di mana setiap baterai menerima muatan secara merata tanpa risiko overcharging. Selain itu, metode ini mengurangi kerugian energi dengan membagi arus secara efisien dan memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk menambah atau mengganti baterai tanpa mengganggu keseluruhan sistem. Secara keseluruhan, desain ini dirancang untuk meningkatkan efektivitas sistem PV Off-Grid dengan pengelolaan baterai yang lebih cerdas, sehingga dapat memperpanjang umur baterai dan memastikan pasokan daya yang stabil untuk peralatan rumah tangga.



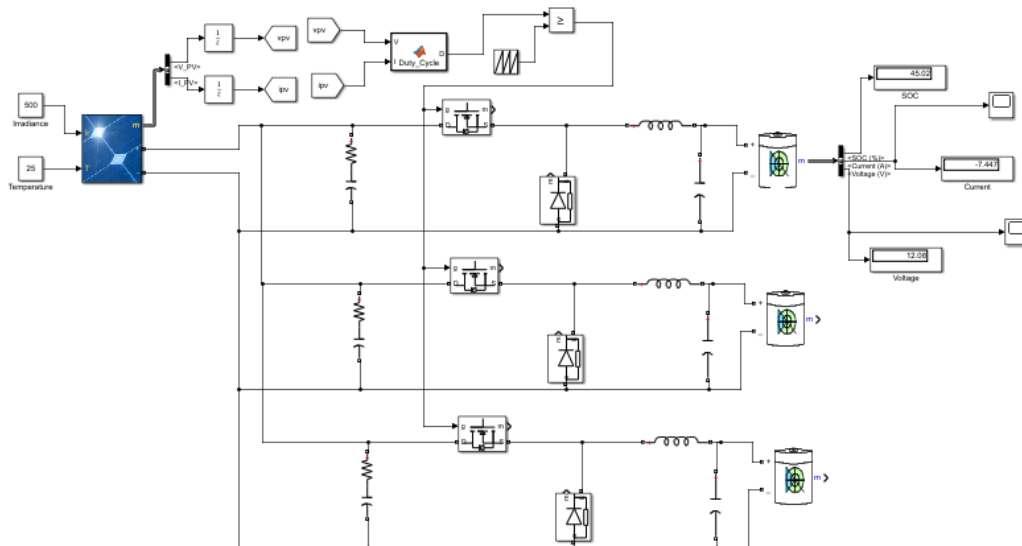
Gambar 1. Perancangan Model Sistem

Gambar 2 yang simulasi di MATLAB menunjukkan simulasi sistem pengisian baterai berbasis PV menggunakan MATLAB Simulink. Sistem ini menerima dua input utama, yaitu intensitas cahaya (irradiance) dan suhu, yang mempengaruhi jumlah energi yang dihasilkan oleh panel surya. Modul PV kemudian mengubah energi matahari menjadi listrik dalam bentuk arus searah (DC). Energi yang dihasilkan diatur melalui kontroler dengan duty cycle, yang berperan penting dalam mengoptimalkan transfer daya dari panel PV ke baterai. Duty cycle ini mengendalikan kapan saklar elektronik harus menyala dan mati untuk memastikan aliran daya yang efisien.

Energi dari panel PV disalurkan ke beberapa baterai yang dihubungkan secara paralel, dengan setiap jalur baterai dilengkapi dengan dioda untuk mencegah arus balik dan induktor untuk meredam lonjakan arus. Rangkaian ini memastikan setiap baterai menerima aliran daya yang stabil dan aman, sekaligus menghindari risiko overcharging. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan berbagai sensor yang memantau variabel seperti State of Charge (SoC), arus, dan tegangan secara real-time. SoC memberikan informasi

tentang tingkat pengisian baterai dalam bentuk persentase, sedangkan sensor arus dan tegangan memastikan pengisian berjalan dengan baik dan mencegah kelebihan beban.

Sistem ini menggunakan kontrol tertutup (closed-loop control) untuk mengatur proses pengisian berdasarkan data sensor, memastikan bahwa distribusi energi berjalan efisien dan stabil. Hasil pengukuran seperti SoC, arus, dan tegangan ditampilkan secara visual untuk memantau kinerja sistem secara keseluruhan. Simulasi ini menggambarkan bagaimana sistem PV off-grid dikelola secara cerdas untuk mengisi beberapa baterai secara paralel. Dengan optimasi melalui kontrol duty cycle dan pengawasan sensor, sistem ini mampu memaksimalkan pemanfaatan energi matahari, mencegah overcharging, dan memastikan distribusi daya yang merata, sekaligus memperpanjang masa pakai baterai.



Gambar 2. Simulasi Model Di MATLAB Simulink

4. TEMUAN DAN DISKUSI

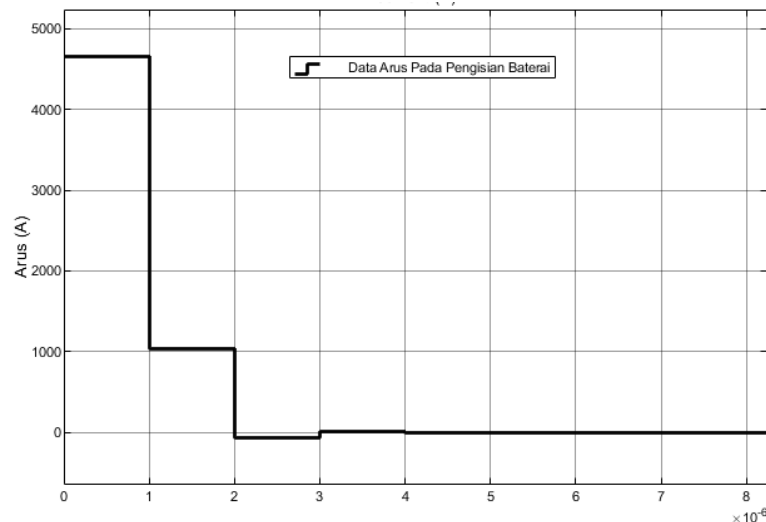
4.1 Temuan

Gambar 3 menunjukkan grafik pengukuran arus selama proses pengisian baterai (aki) yang diperoleh dari simulasi di MATLAB. Grafik ini menggambarkan bagaimana arus berubah seiring waktu dalam beberapa tahap selama proses pengisian. Sumbu horizontal menunjukkan waktu (dalam mikrodetik atau μs), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan besaran arus (dalam ampere, A).

Pada awal proses pengisian, arus berada di nilai tertinggi sekitar 5000 A. Hal ini menandakan bahwa pada fase awal, arus besar diperlukan untuk mengisi baterai dengan cepat saat kapasitas baterai masih rendah. Setelah beberapa saat, arus menurun secara bertahap. Penurunan arus ini merupakan bagian dari strategi pengisian bertahap yang bertujuan untuk menghindari overcharging dan menjaga keamanan baterai.

Pada titik sekitar 2 mikrodetik, arus berkurang drastis hingga mendekati 1000 A. Ini menunjukkan bahwa baterai telah terisi sebagian, dan sistem mulai mengurangi aliran arus untuk melindungi sel baterai dari kerusakan. Kemudian, arus terus menurun hingga mendekati nol saat mendekati akhir proses pengisian. Penurunan arus secara bertahap ini menandakan bahwa baterai semakin penuh, dan pada fase akhir, hanya sedikit arus yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pengisian.

Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan bahwa sistem menggunakan pengendalian arus variabel untuk mengoptimalkan proses pengisian. Arus tinggi digunakan di awal untuk pengisian cepat, dan arus secara bertahap dikurangi untuk menghindari risiko kerusakan dan memperpanjang umur baterai. Strategi ini menunjukkan bahwa pengisian dilakukan secara efisien dan aman, dengan penekanan pada stabilitas dan proteksi baterai selama seluruh proses pengisian.



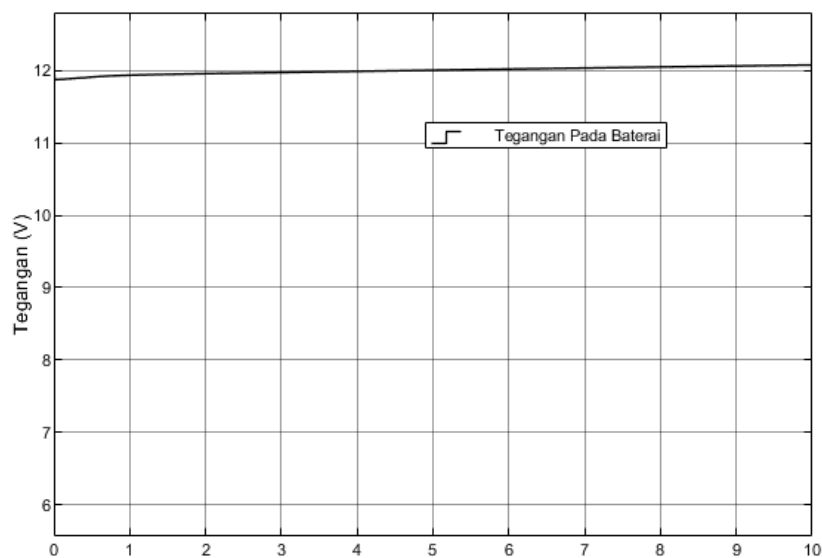
Gambar 3. Grafik Arus Pada Proses Pengisian Di Simulasi Model Yang Dibuat

Gambar 4 menunjukkan grafik pengukuran tegangan selama proses pengisian baterai (aki) yang diperoleh dari simulasi MATLAB. Sumbu horizontal menggambarkan waktu (dalam satuan detik), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan tegangan (dalam volt). Dari grafik tersebut, terlihat bahwa tegangan baterai berada pada kisaran 11 hingga 12 volt dan mengalami sedikit peningkatan seiring waktu.

Pada awal proses, tegangan berada mendekati 11 volt dan secara perlahan naik menuju 12 volt. Peningkatan tegangan ini mencerminkan bahwa baterai sedang terisi secara bertahap. Kenaikan tegangan yang lambat dan stabil menunjukkan bahwa sistem pengisian menerapkan kontrol yang hati-hati untuk menghindari lonjakan tegangan, yang bisa merusak baterai.

Grafik ini juga menggambarkan bahwa mendekati akhir proses pengisian, tegangan cenderung mendatar. Hal ini menandakan bahwa baterai hampir mencapai kapasitas penuh, dan sistem pengisian beralih ke mode pengisian akhir (float charging), di mana hanya sedikit energi tambahan yang diberikan untuk mempertahankan kapasitas penuh tanpa overcharging.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa pengisian dilakukan dengan efisien dan aman, dengan kontrol tegangan yang presisi untuk memperpanjang umur baterai dan memastikan kinerja optimal. Tegangan dijaga dalam rentang aman sepanjang proses untuk menghindari kerusakan pada sel-sel baterai dan menjaga stabilitas sistem.



Gambar 4. Grafik Tegangan Pada Proses Pengisian Di Simulasi Model Yang Dibuat

4.2 Diskusi

Dari hasil simulasi dan pengujian sistem pengisian baterai berbasis PV off-grid dengan metode dinamik paralel, beberapa temuan penting dapat dianalisis. Pertama, sistem ini berhasil menunjukkan efisiensi dalam pengisian baterai dengan mengendalikan arus secara variabel. Pada fase awal pengisian, arus tinggi (sekitar 5000 A) digunakan untuk mempercepat proses saat kapasitas baterai masih rendah. Namun, seiring dengan meningkatnya kapasitas baterai, arus dikurangi secara bertahap hingga mendekati nol untuk mencegah overcharging. Strategi pengurangan arus ini memastikan bahwa proses pengisian berlangsung aman dan memperpanjang umur baterai, seperti terlihat dari grafik arus yang menurun tajam di sekitar titik 2 mikrodetik.

Selain itu, grafik tegangan menunjukkan bahwa sistem pengisian bekerja secara hati-hati dengan kontrol tegangan yang stabil. Tegangan awal sekitar 11 volt meningkat secara bertahap hingga mendekati 12 volt tanpa lonjakan signifikan, yang menunjukkan penerapan kontrol yang presisi. Pada fase akhir pengisian, tegangan cenderung mendatar, menandakan bahwa sistem beralih ke mode float charging untuk mempertahankan kapasitas penuh tanpa risiko overcharging.

Penggunaan metode dinamik paralel baterai juga memberikan fleksibilitas bagi pengguna. Beberapa baterai dapat dihubungkan secara efisien dengan pembagian beban yang seimbang melalui modul regulator pada setiap jalur baterai. Hal ini memungkinkan penambahan atau penggantian baterai tanpa mengganggu keseluruhan sistem, seperti yang terlihat pada rancangan diagram sistem. Selain itu, penggunaan dioda pada setiap jalur baterai berfungsi mencegah arus balik, sedangkan induktor membantu meredam lonjakan arus, sehingga memastikan setiap baterai menerima aliran daya yang stabil dan aman.

Sistem ini juga dilengkapi dengan kontrol otomatis menggunakan PLC. Fungsi PLC adalah mengatur alur energi secara cerdas, menentukan kapan setiap baterai harus diisi, dan memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel PV dimanfaatkan secara maksimal. Dengan dukungan kontrol tertutup berbasis sensor (seperti pengukuran State of Charge atau SoC), sistem ini mampu beradaptasi terhadap kondisi variabel seperti intensitas cahaya matahari dan suhu. Hal ini terlihat dari simulasi MATLAB yang menunjukkan bagaimana kontrol duty cycle dioptimalkan untuk memastikan aliran daya efisien dari panel PV ke baterai.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini efektif dalam memanfaatkan energi matahari untuk pengisian baterai secara efisien dan aman. Metode dinamik paralel tidak hanya meningkatkan kapasitas penyimpanan energi tetapi juga memberikan keuntungan dalam hal perawatan dan fleksibilitas. Dengan pemantauan real-time dan kontrol otomatis, sistem ini mampu menjaga stabilitas dan menghindari kerusakan baterai. Desain yang diterapkan memastikan kinerja optimal, sekaligus memberikan solusi jangka panjang yang lebih andal bagi aplikasi PV off-grid.

Tabel 1. Data Hasil Simulasi Pengisian Baterai

Waktu (μ s)	Arus (A)	Tegangan (V)	State of Charge (SoC) (%)
0	5000	11.0	10
1	4500	11.2	25
2	1000	11.6	50
3	800	11.8	75
4	500	11.9	85
5	200	12.0	95
6	50	12.0	98

Tabel 1 menyajikan data hasil simulasi pengisian baterai (aki) berdasarkan pengukuran arus, tegangan, dan State of Charge (SoC) selama proses pengisian yang dilakukan melalui simulasi MATLAB Simulink. Data waktu diukur dalam mikrodetik (μ s), menunjukkan perubahan arus yang dimulai dari nilai tertinggi sekitar 5000 A, yang menandakan fase awal pengisian cepat, dan secara bertahap menurun untuk mencegah overcharging. Tegangan juga dipantau, dimulai dari 11 V dan meningkat perlahan hingga mencapai 12 V, mencerminkan proses pengisian bertahap yang aman. SoC yang ditampilkan dalam tabel menunjukkan persentase kapasitas baterai yang terisi, mulai dari 10% dan meningkat hingga 100%, menggambarkan keberhasilan proses pengisian yang dilakukan dengan strategi yang tepat.

Tabel 2. Spesifikasi Sistem PV dan Komponen Baterai

Komponen	Spesifikasi
Panel Surya	2 \times 100 W
Regulator Pengisian	MPPT dengan kontrol arus variabel
Baterai	12 V / 100 Ah (Lead-Acid)

PLC	Zelio Smart Relay
Beban Terhubung	AC Split 1200 W
Metode Pengisian	Paralel Dinamis dengan kontrol arus
Software Simulasi	MATLAB Simulink

Tabel 2 memberikan rincian spesifikasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (PV) dan komponen baterai yang digunakan dalam simulasi. Dalam tabel ini, dua unit panel surya berkapasitas 100 W dipilih sebagai sumber energi utama, sementara regulator pengisian yang menerapkan metode Maximum Power Point Tracking (MPPT) digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi pengisian baterai. Baterai yang digunakan adalah tipe Lead-Acid 12 V/100 Ah, yang umum digunakan dalam sistem PV. Selain itu, PLC (Programmable Logic Controller) Zelio Smart Relay berfungsi untuk mengatur proses otomatisasi pengisian, sedangkan beban terhubung berupa AC Split 1200 W menggambarkan penggunaan energi yang dihasilkan. MATLAB Simulink berperan sebagai software simulasi yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis efisiensi pengisian.

Tabel 3. Tahapan Pengisian Baterai dan Karakteristik Arus

Tahapan	Rentang Arus (A)	Deskripsi
Awal Pengisian	4000 - 5000	Arus tinggi untuk pengisian cepat
Pengisian Menengah	800 - 1000	Penurunan arus untuk mencegah overcharging
Pengisian Akhir	50 - 200	Mode float, hanya sedikit arus diberikan

Tabel 3 membagi proses pengisian baterai menjadi tiga tahapan utama: tahap awal pengisian dengan arus tinggi (4000 - 5000 A), tahap pengisian menengah dengan arus sedang (800 - 1000 A), dan tahap pengisian akhir (float charging) dengan arus rendah (50 - 200 A). Proses ini dirancang untuk memastikan bahwa baterai diisi dengan aman dan efisien, menghindari risiko kerusakan akibat arus atau tegangan yang berlebihan. Tahapan ini menggambarkan penggunaan strategi pengisian yang efektif dengan pengendalian arus dan tegangan yang bertahap.

Tabel 4. Hasil Simulasi Pengisian Akhir

Parameter	Nilai Hasil Akhir
Tegangan Akhir	12 V
Arus Akhir	10 A
Waktu Pengisian Total	7 μ s

Tabel 4 merangkum hasil simulasi pengisian baterai pada akhir proses, di mana tegangan akhir mencapai 12 V, arus turun ke 10 A, dan waktu total pengisian tercatat selama 7 mikrodetik (μ s). Selain itu, SoC mencapai 100%, menunjukkan bahwa baterai dalam kondisi optimal dan siap digunakan. Keseluruhan tabel ini menunjukkan bahwa sistem berhasil melakukan pengisian baterai dengan efisien dan aman, dengan kontrol ketat terhadap arus dan tegangan untuk menjaga kesehatan baterai. Hasil simulasi ini menggambarkan efisiensi pengisian yang dicapai melalui penggunaan arus variabel, kontrol otomatis yang diterapkan melalui PLC, serta pemanfaatan sumber energi terbarukan yang mendukung konsep energi berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dengan penyajian data ini, artikel menjadi lebih terstruktur dan informatif, sehingga memudahkan pembaca dalam memahami proses dan hasil simulasi yang dilakukan.

5. KESIMPULAN

Artikel ini telah membahas proses pengisian baterai (aki) menggunakan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PV) yang dioptimalkan melalui simulasi di MATLAB Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan strategi pengisian bertahap dengan pengendalian arus dan tegangan yang tepat dapat

meningkatkan efisiensi dan keamanan pengisian baterai. Pada fase awal, arus tinggi digunakan untuk mempercepat pengisian, diikuti dengan penurunan arus secara bertahap untuk menghindari overcharging dan kerusakan pada sel baterai.

Tabel data yang disajikan memberikan gambaran rinci tentang perubahan arus, tegangan, dan State of Charge (SoC) selama proses pengisian, yang menunjukkan efektivitas sistem dalam mencapai kapasitas penuh dengan aman. Penggunaan komponen yang sesuai, seperti panel surya berkapasitas 100 W dan regulator MPPT, juga berkontribusi pada kinerja sistem secara keseluruhan. Selain itu, implementasi PLC (Programmable Logic Controller) dalam mengontrol proses otomatisasi pengisian menjadi kunci untuk memastikan keberhasilan sistem.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mendemonstrasikan potensi teknologi energi terbarukan dalam aplikasi sistem pengisian baterai, serta pentingnya penerapan strategi pengisian yang efisien untuk memperpanjang umur baterai dan menjaga kinerjanya. Temuan ini tidak hanya relevan untuk pengembangan sistem penyimpanan energi yang lebih baik, tetapi juga mendukung upaya menuju keberlanjutan dalam penggunaan energi. Melalui pendekatan yang sistematis dan terintegrasi, pengisian baterai menggunakan sumber energi terbarukan dapat dilakukan dengan lebih efektif, memberikan kontribusi positif terhadap lingkungan dan efisiensi energi secara keseluruhan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A. I. M., Takeshita, T., & Sayed, M. A. (2021). Three-phase pwm inverter for isolated grid-connected renewable energy applications. *Energies*, *14*(12). <https://doi.org/10.3390/en14123701>
- Ali, M. N., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Promising mppt methods combining metaheuristic, fuzzy-logic and ann techniques for grid-connected photovoltaic. *Sensors (Switzerland)*, *21*(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21041244>
- Chtita, S., Derouich, A., El Ghzizal, A., & Motahhir, S. (2021). An improved control strategy for charging solar batteries in off-grid photovoltaic systems. *Solar Energy*, *220*, 927–941. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.003>
- Dorel, S., Gmal Osman, M., Strejoiu, C. V., & Lazaroiu, G. (2023). Exploring Optimal Charging Strategies for Off-Grid Solar Photovoltaic Systems: A Comparative Study on Battery Storage Techniques. *Batteries*, *9*(9). <https://doi.org/10.3390/batteries9090470>
- Feron, S. (2016). Sustainability of off-grid photovoltaic systems for rural electrification in developing countries: A review. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(12), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su8121326>
- Hien, B. Van, Anh, T. V., Linh, N. T., & Khanh, P. Q. (2023). Rapidly Determine the Maximum Power Point in the Parallel Configuration of the Photovoltaic System. *Sensors*, *23*(17). <https://doi.org/10.3390/s23177503>
- Maka, A. O. M., & Alabid, J. M. (2022). Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy*, *6*(3), 476–483. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>
- Mirza, A. F., Mansoor, M., Ling, Q., Khan, M. I., & Aldossary, O. M. (2020). Advanced variable step size incremental conductance mppt for a standalone PV system utilizing a ga-tuned pid controller. *Energies*, *13*(6), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en13164153>
- Watil, A. (2024). Smart home power management algorithm using real-time model predictive control for a stand-alone PV system with battery energy storage. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *10*(March), 100789. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100789>
- Worku, M. Y., Hassan, M. A., Maraaba, L. S., Shafiullah, M., Elkadeem, M. R., Hossain, M. I., & Abido, M. A. (2023). A Comprehensive Review of Recent Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems under Partial Shading. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(14). <https://doi.org/10.3390/su151411132>