

ANALISIS EFISIENSI PENGISIAN BATERAI PADA PLTS OFF GRID DENGAN SISTEM SCC PWM DAN MPPT MENGGUNAKAN SIMULINK

Dimas Wahyu Firmansyah¹, Kartiko Ardi Widodo², Ni Putu Agustini³

Teknik Elektro S-1, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang Indonesia

¹Dimaswahyufir@gmail.com, ²tiko_@lecturer.itn.ac.id, ³ni_putu_agustini@lecturer.itn.ac.id

Abstrak—Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid membutuhkan sistem pengisian baterai yang efisien agar energi yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan secara maksimal. Salah satu komponen kunci dalam sistem ini adalah Solar Charge Controller (SCC), yang berperan dalam mengatur aliran daya dari panel surya ke baterai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efisiensi pengisian baterai pada sistem PLTS off-grid dengan menggunakan dua jenis SCC, yakni PWM (Pulse Width Modulation) dan MPPT (Maximum Power Point Tracking). Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink dengan parameter input berupa tegangan, arus, dan kapasitas baterai yang identik untuk masing-masing metode. Hasil simulasi menunjukkan bahwa SCC tipe MPPT mampu mencapai efisiensi pengisian sebesar 96,12% dan mengisi baterai penuh dalam waktu 10 jam, sedangkan SCC tipe PWM hanya mencapai efisiensi 76,89% dengan waktu pengisian sekitar 12,5 jam. Berdasarkan temuan tersebut, SCC tipe MPPT dinilai lebih unggul dalam efisiensi transfer energi dan kecepatan pengisian baterai, sehingga sangat direkomendasikan untuk sistem PLTS off-grid yang mengutamakan performa optimal.

Kata Kunci: PLTS off-grid, baterai, SCC, efisiensi, Simulink

I. PENDAHULUAN

Penggunaan energi terbarukan kini semakin menjadi sorotan utama dalam agenda pembangunan berkelanjutan di tingkat global. Hal ini didorong oleh meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak lingkungan dari penggunaan energi fosil serta kebutuhan akan sumber energi yang bersih, efisien, dan berkelanjutan dalam jangka panjang. Salah satu sumber energi terbarukan yang terus mengalami pertumbuhan signifikan adalah energi surya. Di berbagai negara, termasuk Indonesia yang terletak di wilayah khatulistiwa dan memiliki intensitas cahaya matahari yang tinggi sepanjang tahun, pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi solusi yang sangat potensial untuk diversifikasi energi nasional dan pengurangan emisi karbon. PLTS bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui panel surya berbasis teknologi *fotovoltaik* [1]. Energi listrik yang dihasilkan ini dapat langsung digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, industri, fasilitas umum,

hingga pengisian baterai sebagai media penyimpanan energi untuk digunakan di malam hari atau saat kondisi cuaca tidak mendukung.

Sistem PLTS tidak hanya menawarkan sumber daya yang melimpah dan gratis dari alam, tetapi juga memiliki karakteristik yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi karbon maupun polusi udara [2]. Salah satu komponen kunci dalam sistem PLTS yang menentukan efisiensi dan keandalan kinerjanya adalah *Solar Charge Controller* (SCC). SCC berfungsi sebagai pengatur aliran daya dari panel surya menuju baterai, dengan tujuan untuk mencegah kerusakan akibat kelebihan pengisian (*overcharging*) maupun pengosongan daya yang berlebihan (*over-discharging*). Dengan mengatur tegangan dan arus pengisian secara optimal, SCC berkontribusi terhadap kestabilan sistem dan umur pakai baterai yang lebih panjang. Terdapat dua metode utama yang umum digunakan dalam teknologi SCC, yaitu *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Metode PWM bekerja dengan cara menyesuaikan tegangan output panel surya agar sesuai dengan tegangan baterai melalui teknik modulasi pulsa. Keunggulan metode ini terletak pada kesederhanaan rangkaian dan biaya implementasi yang relatif rendah, sehingga cocok digunakan pada sistem skala kecil atau kebutuhan yang tidak terlalu sensitif terhadap efisiensi energi. Namun demikian, metode PWM memiliki keterbatasan signifikan dalam hal pemanfaatan daya maksimum [3], khususnya pada kondisi pencahayaan matahari yang tidak stabil, seperti saat mendung atau tertutup bayangan. Berbeda dengan itu, metode MPPT menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dengan memaksimalkan daya yang dihasilkan panel surya melalui penyesuaian titik daya maksimum (*maximum power point*) secara dinamis sesuai dengan kondisi lingkungan yang berubah-ubah, seperti suhu dan intensitas cahaya. Meskipun memerlukan algoritma kontrol yang lebih kompleks dan biaya perangkat yang lebih tinggi, metode MPPT mampu meningkatkan efisiensi sistem hingga 30% dibandingkan dengan PWM, menjadikannya

pilihan yang lebih unggul untuk aplikasi skala menengah hingga besar, terutama di wilayah dengan variabilitas cuaca yang tinggi.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk menganalisis performa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang menggunakan *Solar Charge Controller* (SCC) dengan metode PWM maupun MPPT. Namun, sebagian besar studi tersebut cenderung hanya berfokus pada aspek keluaran daya dari panel surya, tanpa memberikan perhatian yang mendalam terhadap proses pengisian baterai sebagai bagian penting dalam sistem PLTS, khususnya pada sistem *off-grid* yang sangat bergantung pada penyimpanan energi. Sebagai contoh, penelitian oleh Perdana Fianti dkk. (2020) mengevaluasi kinerja daya keluaran dari panel surya dengan SCC PWM dan MPPT, namun tidak melibatkan baterai dalam pengujian, sehingga belum memberikan gambaran nyata mengenai bagaimana kedua metode tersebut mempengaruhi efisiensi pengisian dan kondisi baterai dalam jangka waktu tertentu. Di sisi lain, studi yang dilakukan oleh Galih Ismoyo (2021) memang membahas efisiensi pengisian baterai menggunakan SCC tipe PWM dalam konteks pengisian baterai sepeda listrik, tetapi penelitian tersebut tidak menyertakan perbandingan dengan metode MPPT, sehingga belum dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai keunggulan relatif dari masing-masing metode [4]. Melihat adanya celah dalam penelitian-penelitian sebelumnya, studi ini bertujuan untuk memberikan kontribusi yang lebih lengkap dan menyeluruh dengan menganalisis serta membandingkan efisiensi pengisian baterai pada sistem PLTS *off-grid* yang menggunakan dua jenis SCC, yaitu tipe PWM dan MPPT.

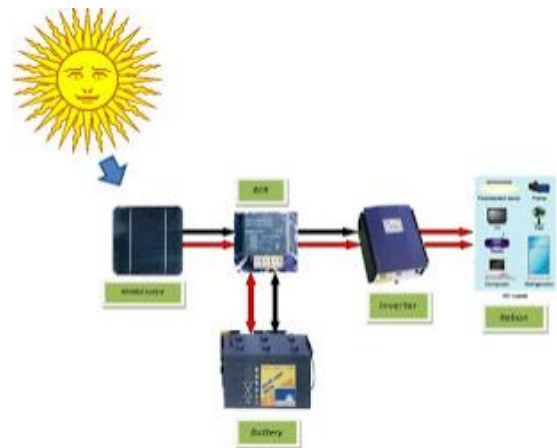
Penelitian ini dilakukan melalui simulasi berbasis MATLAB Simulink, yang memungkinkan visualisasi dan analisis performa sistem secara dinamis dan akurat. Simulasi akan mempertimbangkan berbagai skenario nyata, seperti fluktuasi intensitas cahaya matahari dan variasi beban listrik, guna mengevaluasi respons dan efisiensi dari masing-masing metode dalam mengisi baterai [5]. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan wawasan yang lebih dalam terkait efektivitas metode SCC dalam mengoptimalkan sistem PLTS, serta menjadi acuan dalam pemilihan teknologi yang sesuai untuk implementasi energi surya yang efisien dan andal di lapangan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit energi listrik yang memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi utama. Teknologi ini tergolong dalam sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dan memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah dan tidak terbatas. Sistem PLTS bekerja dengan mengandalkan panel surya (solar panel) yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (DC) melalui efek *fotovoltaik*. Energi listrik DC yang dihasilkan dapat langsung digunakan oleh perangkat atau beban yang kompatibel, dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) melalui *inverter* agar dapat digunakan oleh peralatan rumah tangga atau industri, atau disimpan ke dalam sistem

penyimpanan energi seperti baterai untuk pemanfaatan di kemudian hari [7].



Gambar 1. PLTS

Pada gambar 1 menunjukkan sistem PLTS tipe *off-grid*, yaitu sistem yang tidak terhubung ke jaringan listrik umum (PLN), keberadaan baterai menjadi komponen esensial. Baterai berperan sebagai media penyimpanan energi yang sangat krusial, terutama untuk memastikan kontinuitas suplai listrik saat malam hari, ketika cuaca mendung, atau ketika intensitas cahaya matahari tidak mencukupi. Agar proses pengisian dan pengosongan baterai dapat berjalan secara aman, stabil, dan efisien, maka diperlukan perangkat pengatur arus dan tegangan yang dikenal dengan sebutan *Solar Charge Controller* (SCC). SCC berfungsi untuk mengontrol proses pengisian baterai dengan memastikan bahwa tegangan dan arus yang masuk tetap dalam batas aman, sehingga dapat mencegah terjadinya *overcharge* (pengisian berlebih) yang dapat merusak struktur internal baterai serta *overdischarge* (pengosongan berlebih) yang dapat mengurangi kapasitas penyimpanan secara permanen. Lebih lanjut, SCC juga memiliki fitur-fitur pelindung seperti proteksi terhadap arus balik, pemutus otomatis saat baterai penuh, dan pengaturan tingkat tegangan sesuai jenis baterai (misalnya baterai asam timbal, lithium-ion, dan lainnya). Dengan demikian, integrasi antara panel surya, SCC, baterai, dan inverter menciptakan sebuah sistem kelistrikan mandiri yang handal, efisien, dan dapat digunakan di wilayah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik nasional maupun sebagai cadangan listrik di daerah perkotaan [8].

B. Daya dan Energi

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*, pemahaman mengenai konsep dasar daya dan energi sangat penting, terutama dalam konteks pengukuran efisiensi sistem dan optimalisasi proses pengisian baterai. Daya dan energi merupakan dua besaran fisika utama yang sering digunakan dalam analisis kinerja sistem kelistrikan, termasuk pada sistem berbasis energi terbarukan seperti PLTS. Daya dalam konteks kelistrikan didefinisikan sebagai laju perubahan energi terhadap waktu. Secara matematis, daya (P) dirumuskan sebagai [8]:

$$P = \frac{E}{t} \quad (1)$$

di mana

P adalah daya dalam satuan watt (W),

E adalah energi dalam satuan joule (J), dan

t adalah waktu dalam satuan detik (s).

Dalam sistem tenaga surya, daya biasanya dinyatakan sebagai hasil perkalian antara tegangan (V) dan arus (I), sehingga rumus daya listrik menjadi [8]:

$$P = V \times I \quad (2)$$

Dengan kata lain, daya listrik adalah ukuran seberapa cepat energi listrik dikonsumsi atau dihasilkan dalam suatu rangkaian listrik. Sementara itu, energi adalah kapasitas untuk melakukan kerja atau usaha, yang dalam konteks listrik merupakan jumlah total daya yang digunakan atau disimpan selama periode waktu tertentu. Dalam sistem PLTS, energi sering kali dinyatakan dalam satuan watt-jam (Wh) atau kilowatt-jam (kWh), yang merupakan hasil perkalian antara daya dan waktu, yaitu:

$$E = P \times t \quad (3)$$

di mana

P adalah daya dalam satuan watt (W),

E adalah energi dalam satuan joule (J),

t adalah waktu dalam satuan detik (s).

Energi yang dihasilkan oleh panel surya pada siang hari akan disimpan dalam baterai untuk digunakan pada malam hari atau saat tidak ada sinar matahari. Oleh karena itu, efisiensi sistem sangat bergantung pada kemampuan komponen-komponen seperti *Solar Charge Controller* (SCC) dalam mengelola dan mengarahkan energi dari panel ke baterai dengan kehilangan seminimal mungkin. Dalam sistem PLTS *off-grid*, energi yang dihasilkan oleh modul *fotovoltaik* (PV) tidak langsung digunakan oleh beban, melainkan terlebih dahulu disalurkan ke baterai melalui perangkat pengatur seperti SCC jenis PWM atau MPPT. Di sinilah konsep efisiensi energi mulai berperan penting. Tidak seluruh energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat disimpan dalam baterai, karena terdapat kerugian energi akibat konversi, panas, dan komponen internal sistem.

Oleh karena itu, efisiensi pengisian baterai, yang merupakan rasio antara energi yang benar-benar tersimpan di baterai (E_{stored}) dengan total energi input dari panel surya (E_{input}), menjadi ukuran utama dalam menilai kinerja suatu sistem PLTS. Selain itu, penting untuk membedakan antara daya instan dan energi kumulatif dalam pengamatan sistem. Daya instan berguna untuk mengetahui seberapa besar energi yang sedang dihasilkan atau dikonsumsi pada saat tertentu, sementara energi kumulatif memberikan informasi mengenai total energi yang telah dihasilkan atau digunakan selama suatu periode waktu. Dalam simulasi menggunakan Simulink, kedua besaran ini dapat dianalisis secara visual dan numerik, sehingga memungkinkan perbandingan performa antara teknologi SCC PWM dan MPPT dalam kondisi yang berbeda-

beda. Dengan pemahaman yang mendalam tentang daya dan energi, peneliti dapat melakukan analisis yang lebih akurat terhadap performa sistem pengisian baterai dalam PLTS *off-grid*. Hal ini sangat penting untuk mendukung pengembangan sistem energi surya yang efisien, andal, dan sesuai dengan kebutuhan energi masyarakat di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional.

C. Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya pada konfigurasi *off-grid* atau *hybrid*. Perangkat ini memiliki peran vital dalam mengatur dan mengontrol aliran energi listrik dari panel surya menuju baterai penyimpanan. Fungsi utamanya adalah untuk menjaga stabilitas proses pengisian baterai agar tetap berada dalam batas tegangan dan arus yang aman. Dengan kata lain, SCC bertugas mencegah terjadinya *overcharge* (pengisian berlebih) maupun *deep discharge* (pengosongan berlebih) yang berpotensi merusak elemen kimia di dalam baterai, memperpendek umur pakai, serta menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. Solar Charge Controller

Pada gambar 2 terdapat dua tipe utama dari SCC yang banyak digunakan saat ini, yaitu Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). Masing-masing memiliki karakteristik dan efisiensi kerja yang berbeda.

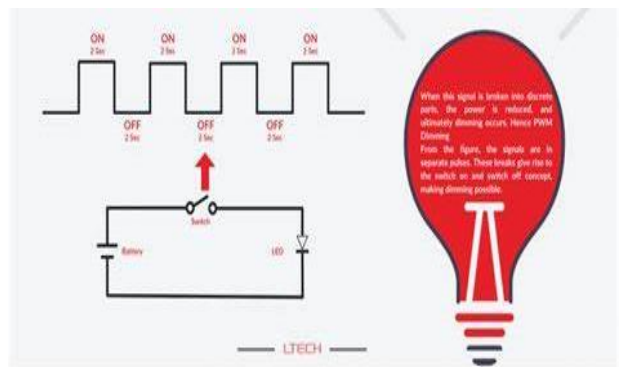
- *Pulse Width Modulation* (PWM) adalah teknologi pengontrol daya yang bekerja dengan cara mengatur lebar pulsa tegangan yang dikirimkan ke baterai. SCC tipe ini secara langsung menghubungkan panel surya dengan baterai, dan ketika baterai sudah hampir penuh, SCC mulai memutus-mutus aliran arus secara cepat untuk mempertahankan level pengisian [9]. Keunggulan utama dari SCC tipe PWM adalah konstruksinya yang sederhana, harga yang lebih ekonomis, serta kehandalan dalam penggunaan pada sistem kecil atau dengan kebutuhan daya rendah. Namun, pada penelitian yang dilakukan (R.W Sikumbang., 2024) oleh efisiensinya relatif lebih rendah dengan rentang efisiensi 75-80% terutama ketika tegangan panel surya jauh lebih tinggi daripada tegangan baterai[10]
- *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan teknologi SCC yang lebih canggih dan efisien. MPPT bekerja dengan cara melacak titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) dari panel surya untuk

memastikan bahwa energi yang diambil dari panel berada pada tingkat optimal. Setelah menemukan titik daya maksimum, MPPT mengonversi tegangan tinggi dari panel menjadi tegangan yang sesuai dengan baterai sambil tetap mempertahankan arus maksimum [11]. Pada penelitian yang dilakukan (Faizal E., 2022) didapatkan dengan rentang efisiensi 95-98% hal ini memungkinkan efisiensi konversi energi hingga 30% atau lebih tinggi dibandingkan PWM, terutama dalam kondisi cuaca tidak stabil atau ketika suhu panel berubah-ubah. SCC tipe MPPT sangat direkomendasikan untuk sistem PLTS berkapasitas menengah hingga besar, atau ketika perbedaan tegangan antara panel dan baterai cukup signifikan[12]

Pemilihan antara PWM dan MPPT harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem, kapasitas daya, kondisi lingkungan, serta anggaran yang tersedia. Dalam penerapan praktis, SCC yang tepat akan sangat berpengaruh terhadap performa jangka panjang sistem PLTS, baik dari sisi efisiensi pengisian baterai maupun ketahanan komponen penyimpanan energi.

D. Metode PWM (Pulse Width Modulation)

Metode Pulse Width Modulation (PWM) merupakan salah satu teknologi dasar yang digunakan dalam sistem *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengatur proses pengisian daya ke baterai. Prinsip kerja dari metode ini adalah dengan mengatur lebar pulsa tegangan (*duty cycle*) yang dikirimkan dari panel surya ke baterai, sehingga arus pengisian dapat dikendalikan secara bertahap. Ketika baterai belum terisi penuh, SCC dengan metode PWM akan mengalirkan arus pengisian secara penuh. Namun, seiring meningkatnya kapasitas baterai yang terisi, lebar pulsa dikurangi secara bertahap untuk mencegah pengisian berlebih, hingga akhirnya arus dihentikan ketika baterai mencapai tegangan maksimum yang ditentukan. PWM dikenal sebagai teknologi yang sederhana, handal, dan ekonomis, menjadikannya pilihan populer untuk sistem PLTS berskala kecil hingga menengah, terutama pada aplikasi rumah tangga atau di daerah pedesaan yang belum terjangkau jaringan listrik. Keunggulan utama dari metode ini adalah biaya implementasi yang rendah serta kemudahan dalam perawatan karena komponennya tidak kompleks. PWM juga cukup efisien jika digunakan pada sistem dengan tegangan panel yang relatif sama atau sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan baterai. Dalam kondisi ini, energi dapat ditransfer dengan minim kehilangan.



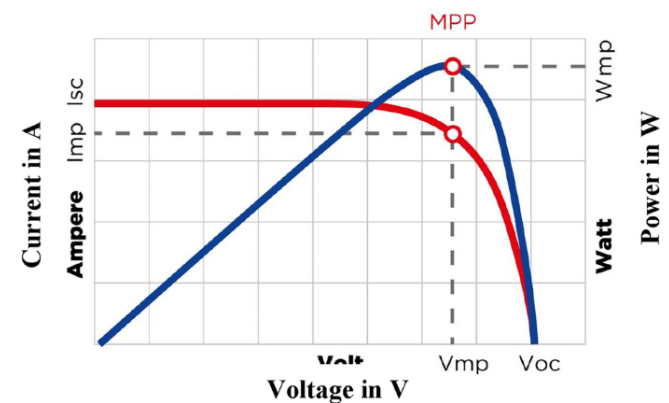
Gambar 3. Metode PWM

Pada gambar 3 Metode PWM memiliki keterbatasan dalam hal kemampuan adaptasi terhadap variasi kondisi lingkungan, terutama pada saat intensitas cahaya matahari berubah-ubah secara dinamis, seperti pada cuaca berawan atau saat pagi dan sore hari. PWM tidak memiliki kemampuan untuk melacak dan menyesuaikan diri terhadap *Maximum Power Point* (MPP) dari panel surya, yaitu titik di mana panel dapat menghasilkan daya maksimum berdasarkan kombinasi tegangan dan arus tertentu. Akibatnya, ketika terjadi perubahan suhu panel atau fluktuasi sinar matahari, sistem PWM tidak dapat mengoptimalkan output energi yang dihasilkan oleh panel, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dengan kata lain, metode PWM bekerja secara langsung dan “apa adanya”, tanpa melakukan penyesuaian terhadap karakteristik variatif dari sumber energi matahari. Oleh karena itu, meskipun cocok untuk penggunaan dasar dengan kebutuhan daya rendah dan konfigurasi sistem yang sederhana, PWM kurang ideal jika diterapkan pada sistem PLTS berkapasitas besar atau dalam kondisi geografis dan iklim yang tidak stabil [14]. Dalam kasus seperti itu, metode MPPT yang lebih canggih dan adaptif akan memberikan kinerja yang jauh lebih optimal.

E. Metode MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan teknologi canggih dalam sistem *Solar Charge Controller* (SCC) yang dirancang untuk mengoptimalkan penyerapan daya dari panel surya dengan cara melacak titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) secara dinamis. Teknologi ini bekerja dengan menyesuaikan tegangan dan arus output dari panel surya agar selalu berada pada kombinasi yang menghasilkan daya listrik tertinggi, sesuai dengan kondisi lingkungan saat itu, seperti intensitas cahaya matahari dan suhu permukaan panel. MPPT menggunakan algoritma kontrol yang kompleks untuk melaksanakan fungsinya. Dua algoritma yang paling umum digunakan adalah *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (INC) [15]. Algoritma P&O bekerja dengan cara mencoba-coba (*perturbasi*) perubahan kecil pada tegangan dan memantau perubahan daya yang dihasilkan.

Jika perubahan tersebut menghasilkan peningkatan daya, maka sistem melanjutkan perubahan ke arah yang sama; jika tidak, arah perubahan dibalik. Sementara itu, algoritma INC menghitung perubahan daya dan konduktansi (perbandingan antara arus dan tegangan) secara simultan untuk menentukan secara lebih akurat apakah sistem sudah berada pada titik daya maksimum atau belum. Kedua metode ini memungkinkan



sistem MPPT untuk terus menyesuaikan diri secara real-time terhadap perubahan lingkungan yang cepat, seperti mendung yang datang-tiba atau fluktuasi suhu [13].

Gambar 4. Metode MPPT

Pada gambar 4 Respon efisiensi keluaran dari *Solar Charge Controller* (SCC) merupakan aspek krusial yang menentukan kinerja keseluruhan sistem pengisian baterai dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*. *Solar Charge Controller* berfungsi sebagai pengatur aliran energi antara panel surya dan baterai agar pengisian berlangsung secara aman dan optimal. Terdapat dua jenis utama SCC yang sering dibandingkan, yaitu PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), yang masing-masing memiliki karakteristik efisiensi yang berbeda tergantung pada kondisi lingkungan dan beban sistem. Efisiensi keluaran SCC dapat diartikan sebagai perbandingan antara energi yang berhasil disalurkan ke baterai (output) terhadap energi yang diterima dari panel surya (input).

Dalam simulasi menggunakan Simulink, efisiensi ini dapat dianalisis dengan mengamati seberapa besar daya yang dapat dimanfaatkan oleh baterai dari total daya yang tersedia dari panel, serta bagaimana pengontrol merespons perubahan intensitas cahaya matahari, temperatur, dan kondisi beban. Pada sistem PWM, SCC bekerja dengan menyalurkan tegangan panel langsung ke baterai ketika tegangan cocok, lalu memodulasi lebar pulsa untuk mengatur aliran arus. Sistem ini cenderung lebih sederhana, namun efisiensinya menurun ketika perbedaan tegangan antara panel dan baterai cukup besar, karena energi potensial tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal. Sebaliknya, sistem MPPT yang ditunjukkan pada gambar 4 memiliki algoritma yang lebih kompleks yang mampu melacak titik daya maksimum dari panel surya dan menyesuaikan tegangan dan arus agar mendekati titik tersebut. Dengan cara ini, MPPT dapat mengoptimalkan energi yang dikonversi dan disimpan dalam baterai, bahkan ketika kondisi lingkungan berubah-ubah. Respon efisiensi MPPT dalam simulasi Simulink biasanya menunjukkan hasil yang lebih tinggi dan stabil dibandingkan PWM, khususnya ketika panel bekerja dalam kondisi tidak ideal seperti intensitas cahaya yang *fluktuatif* atau suhu tinggi. Oleh karena itu, simulasi dalam skripsi ini bertujuan untuk membandingkan bagaimana kedua jenis SCC merespon terhadap berbagai skenario operasional dalam sistem PLTS *off-grid*, serta mengukur sejauh mana masing-masing dapat memaksimalkan efisiensi pengisian baterai. Hasil analisis ini akan memberikan wawasan penting dalam pemilihan teknologi yang tepat untuk implementasi sistem PLTS yang efisien dan andal.

Keunggulan utama dari metode MPPT adalah efisiensi konversi energi yang sangat tinggi, terutama saat terdapat perbedaan besar antara tegangan output panel surya dan tegangan nominal baterai. Sistem ini mampu mengkonversi kelebihan tegangan menjadi arus yang lebih besar, sehingga energi tidak terbuang sia-sia seperti pada metode PWM. MPPT sangat efektif digunakan pada sistem PLTS dengan tegangan panel yang jauh lebih tinggi daripada tegangan

baterai, sistem berdaya menengah hingga besar, atau di wilayah dengan cuaca yang berubah-ubah dan suhu ekstrem. Namun demikian, metode MPPT juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu dipertimbangkan. Dari segi biaya, implementasi MPPT relatif lebih mahal dibandingkan PWM karena memerlukan komponen elektronik yang lebih kompleks, termasuk mikroprosesor untuk menjalankan algoritma kontrol dan konverter daya yang canggih. Selain itu, proses instalasi dan kalibrasi sistem MPPT juga lebih menantang karena memerlukan pemahaman teknis yang lebih mendalam serta pemantauan performa secara berkala untuk memastikan sistem bekerja optimal. Meskipun demikian, kelebihan MPPT dalam hal efisiensi energi, adaptabilitas terhadap kondisi lingkungan, dan kemampuan memaksimalkan output panel surya menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi profesional, industri, atau sistem PLTS skala besar yang menuntut keandalan dan performa tinggi sepanjang waktu [14].

F. Simulasi Sistem PLTS dengan MATLAB Simulink

MATLAB Simulink merupakan sebuah perangkat lunak simulasi berbasis grafik yang sangat populer dalam dunia teknik dan sains, khususnya untuk pemodelan sistem dinamis, kontrol, dan analisis sinyal. Simulink menyediakan antarmuka blok diagram yang intuitif, memungkinkan pengguna untuk merancang, menguji, dan mengevaluasi berbagai sistem teknik secara visual dan modular. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Simulink menjadi alat yang sangat powerful karena mampu merepresentasikan perilaku sistem secara real-time berdasarkan parameter fisik dan lingkungan yang realistis. Salah satu manfaat utama penggunaan Simulink dalam studi PLTS adalah kemampuannya untuk mensimulasikan pengaruh perubahan intensitas iradiasi matahari terhadap keluaran daya dari panel surya. Dalam dunia nyata, intensitas cahaya matahari sangat bervariasi sepanjang hari akibat pergerakan matahari, awan, cuaca, atau bahkan polusi udara [17]. Dengan menggunakan Simulink, pengguna dapat memodelkan berbagai skenario perubahan iradiasi secara dinamis, termasuk efek suhu terhadap efisiensi panel, serta mempelajari bagaimana perubahan tersebut memengaruhi tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan.



Gambar 5. MATLAB Simulink

Pada gambar 5 menunjukkan Simulink juga memungkinkan integrasi model komponen penting lainnya dalam sistem PLTS seperti *Solar Charge Controller* (SCC), baik yang menggunakan metode PWM maupun MPPT, untuk

menganalisis karakteristik kerjanya. Dengan memanfaatkan pustaka Simscape Electrical dan Power Systems Toolbox, pengguna dapat memvisualisasikan bagaimana SCC merespons kondisi input dari panel surya dan bagaimana output-nya mengisi baterai. Proses seperti overcharging protection, mode float charging, hingga response time dari SCC terhadap perubahan beban atau iradiasi, semuanya dapat dimodelkan secara presisi. Selain itu, efisiensi pengisian daya ke baterai juga dapat dievaluasi dengan berbagai pendekatan, misalnya membandingkan efisiensi antara metode PWM dan MPPT dalam berbagai kondisi. Pengguna dapat mengamati bagaimana fluktuasi tegangan memengaruhi durasi pengisian baterai, tingkat daya hilang, dan total energi tersimpan. Energi tersimpan adalah jumlah energi listrik yang berhasil disimpan di dalam baterai setelah proses pengisian, dan siap digunakan untuk menjalankan beban atau perangkat listrik. Energi ini biasanya diukur dalam satuan Watt-jam (Wh). Semua itu dapat dianalisis secara numerik dan grafis menggunakan Simulink, tanpa harus melakukan eksperimen fisik yang umumnya memerlukan peralatan mahal, ruang uji yang memadai, serta waktu yang cukup lama. Keunggulan lain dari MATLAB Simulink adalah kemampuannya untuk diintegrasikan dengan bahasa pemrograman MATLAB, sehingga simulasi yang kompleks pun dapat dikendalikan dan dianalisis menggunakan skrip MATLAB. Ini membuka peluang untuk mengembangkan sistem PLTS yang lebih adaptif dan cerdas, misalnya dengan mengimplementasikan logika kendali berbasis fuzzy, neural network, atau algoritma optimasi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Secara keseluruhan, MATLAB Simulink memberikan lingkungan virtual yang sangat mendekati kondisi nyata, memungkinkan perancang sistem PLTS untuk melakukan eksperimen, validasi desain, dan pengambilan keputusan teknis secara efisien dan hemat biaya sebelum masuk ke tahap implementasi fisik.

G. Efisiensi Pengisian Baterai

Efisiensi pengisian baterai dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan indikator penting yang menunjukkan seberapa efektif energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat disimpan ke dalam baterai untuk kemudian digunakan sesuai kebutuhan [16]. Semakin tinggi efisiensi pengisian, semakin sedikit energi yang terbuang selama proses konversi dan penyimpanan, yang secara langsung berkontribusi terhadap kinerja dan keandalan sistem PLTS secara keseluruhan. Efisiensi ini dipengaruhi oleh sejumlah faktor teknis dan lingkungan, seperti:

- Jenis *Solar Charge Controller* (SCC): Teknologi seperti MPPT biasanya menghasilkan efisiensi pengisian yang lebih tinggi dibandingkan dengan PWM, terutama saat terdapat selisih besar antara tegangan output panel dan tegangan baterai.
- Suhu lingkungan: Panel surya bersifat sensitif terhadap suhu. Ketika suhu meningkat, efisiensi konversi *fotovoltaik* cenderung menurun, sehingga mempengaruhi daya yang tersedia untuk pengisian baterai.
- Tingkat iradiasi matahari: Intensitas radiasi matahari yang *fluktuatif* akan mempengaruhi daya output panel

secara langsung. Efisiensi juga akan bervariasi berdasarkan kondisi cuaca dan waktu.

- Kondisi baterai: Umur baterai, tingkat sulfasi, resistansi internal, dan teknologi penyimpanan (misalnya AGM, gel, atau lithium-ion) memengaruhi seberapa baik energi dapat diterima dan disimpan.

Secara umum, efisiensi pengisian PLTS dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut [19]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

Dengan keterangan:

η : Efisiensi sistem (%)

P_{out} : Daya yang mengalir dari SCC ke baterai atau beban (Watt)

P_{in} : Daya yang diterima SCC dari panel surya (Watt)

Namun demikian, rumus tersebut hanya mempresentasikan efisiensi dasar dari konversi sinar matahari ke energi listrik per satuan luas. Untuk menghitung efisiensi pengisian baterai secara lebih *komprehensif*, perlu ditinjau juga faktor kehilangan energi dalam proses pengisian, yaitu[20]:

$$\eta_{charge} = \frac{E_{output}}{E_{input}} \times 100\% \quad (5)$$

Dengan:

η_{charge} : Efisiensi pengisian baterai (%)

E_{output} : Energi yang mengalir dari SCC ke baterai (Wh)

E_{input} : Energi total yang dikirim ke sistem dari panel (Wh)

Efisiensi pengisian baterai, yang dilambangkan dengan η_{charge} , merupakan parameter penting yang menggambarkan seberapa efektif energi listrik yang berasal dari sumber, seperti panel surya, dapat disimpan ke dalam baterai. Rumus efisiensi ini dinyatakan sebagai perbandingan antara energi yang benar-benar berhasil disimpan di dalam baterai (E_{stored}) dengan total energi yang masuk ke sistem dari sumber energi (E_{input}), kemudian dikalikan 100% agar hasilnya dinyatakan dalam bentuk persentase. Nilai efisiensi ini memberikan gambaran tentang sejauh mana sistem pengisian bekerja secara optimal. Jika nilai efisiensi mendekati 100%, artinya hampir seluruh energi yang dikirimkan ke sistem dapat disimpan secara efektif di dalam baterai, sedangkan nilai efisiensi yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar energi hilang, kemungkinan akibat panas, resistansi internal, atau proses konversi energi yang tidak sempurna. Energi tersimpan (E_{stored}) adalah jumlah energi aktual yang berhasil ditampung oleh baterai setelah proses pengisian berlangsung, dan biasanya diukur dalam satuan Watt-jam (Wh). Nilai ini mencerminkan kapasitas efektif dari baterai dalam menyimpan energi yang bisa dimanfaatkan oleh perangkat atau sistem lain. Di sisi lain, energi masukan (E_{input}) adalah total energi yang dikirimkan dari sumber, seperti panel surya, ke sistem penyimpanan. Energi ini merupakan input mentah yang belum tentu seluruhnya bisa dimanfaatkan atau disimpan karena adanya kerugian dalam sistem.

Dengan membandingkan E_{stored} dan E_{input} , efisiensi pengisian dapat dihitung untuk menilai performa sistem pengisian daya. Penilaian ini penting terutama dalam sistem energi terbarukan atau portabel, di mana efisiensi menjadi faktor krusial dalam pengelolaan daya dan keberlangsungan operasi perangkat. Pengukuran energi tersimpan biasanya dilakukan dengan mencatat tegangan dan arus masuk ke baterai dalam kurun waktu tertentu, lalu mengintegrasikannya untuk mendapatkan total energi dalam satuan watt-jam (Wh). Kehilangan energi bisa terjadi karena konversi DC-DC, efisiensi SCC, resistansi kabel, serta efisiensi kimiawi baterai itu sendiri. Untuk pengembangan sistem PLTS yang optimal, efisiensi pengisian ini sangat penting dievaluasi secara berkala melalui data logging, simulasi menggunakan MATLAB Simulink, atau penggunaan alat ukur digital seperti coulomb counter atau wattmeter. Dan untuk batasan efisiensi adalah 5%. Waktu Pengisian Baterai dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [21]:

$$\begin{aligned} \text{Lama Waktu Pengisian Baterai} \\ = \frac{\text{Kapasitas Baterai (Ah)}}{\text{Output Arus Charge (A)}} \end{aligned} \quad (6)$$

dimana:

Lama Waktu Pengisian(h) : Waktu Pengisian (h)

Kapasitas Baterai : Kapasitas Baterai (Ah)

Output Arus Charge : arus keluaran (Ampere)

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan metode simulasi komparatif berbasis MATLAB Simulink guna menganalisis dan mengevaluasi kinerja efisiensi pengisian baterai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* dengan membandingkan dua jenis teknologi *Solar Charge Controller* (SCC), yaitu PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Simulasi ini bertujuan untuk memahami perbedaan performa antara kedua jenis SCC dalam mengelola energi yang dihasilkan panel surya dan menyalurkannya ke baterai penyimpanan. Untuk mencapai tujuan tersebut, simulasi dilakukan dengan mengintegrasikan berbagai parameter teknis dari sistem PLTS, termasuk spesifikasi panel surya, kapasitas baterai, dan karakteristik masing-masing SCC. Selain itu, kondisi lingkungan seperti intensitas radiasi matahari dan suhu sekitar turut dimasukkan sebagai variabel dinamis dalam model simulasi untuk merepresentasikan variasi kondisi nyata di lapangan.

Melalui skenario simulasi yang mencakup kondisi standar dan ekstrem, penelitian ini memungkinkan analisis menyeluruh terhadap efisiensi konversi daya dan efektivitas pengisian baterai yang dicapai oleh masing-masing metode SCC. Hasil dari simulasi diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai keunggulan dan keterbatasan teknologi PWM dan MPPT dalam konteks sistem PLTS *off-grid*, serta menjadi dasar pertimbangan teknis

dalam pemilihan sistem pengatur pengisian daya yang paling sesuai untuk aplikasi energi terbarukan di daerah terpencil atau tidak terjangkau jaringan listrik konvensional.

B. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang terstruktur sebagai berikut:

1. Studi Pustaka mengenai Prinsip Kerja PLTS, SCC PWM, dan SCC MPPT. Tahapan pertama yang dilakukan adalah studi pustaka yang mendalam mengenai prinsip dasar dan komponen-komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penelitian ini juga membahas dua jenis *Solar Charge Controller* (SCC), yaitu PWM (*Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), untuk memahami perbedaan cara kerja dan keunggulannya dalam mengoptimalkan pengisian baterai. Studi pustaka ini mencakup referensi dari berbagai literatur yang membahas teori dasar konversi energi surya, pengaturan daya surya, dan teknik-teknik efisiensi dalam sistem tenaga surya.
2. Penentuan Spesifikasi Sistem PLTS dan Baterai. Setelah memahami prinsip kerja dasar, tahapan selanjutnya adalah penentuan spesifikasi teknis dari sistem PLTS dan baterai yang akan digunakan dalam penelitian ini. Spesifikasi ini mencakup pemilihan jenis panel surya yang sesuai, kapasitas baterai, dan daya output yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi sistem *off-grid*. Pemilihan spesifikasi ini juga mempertimbangkan faktor-faktor seperti efisiensi konversi energi surya, daya yang dapat disimpan oleh baterai, dan ketahanan sistem terhadap kondisi lingkungan ekstrem.
3. Perancangan Model Simulasi PLTS Off-Grid pada MATLAB Simulink. Tahapan berikutnya adalah perancangan model simulasi sistem PLTS *Off-Grid* menggunakan MATLAB Simulink. Pada tahap ini, model matematis dari komponen-komponen sistem seperti panel surya, SCC, dan baterai akan dikembangkan dan dimodelkan dalam lingkungan Simulink. Perancangan ini melibatkan pemrograman simulasi untuk menggambarkan aliran energi dari panel surya menuju baterai, dengan mempertimbangkan variasi kondisi seperti intensitas cahaya, suhu, dan parameter teknis lainnya yang mempengaruhi performa sistem.
4. Implementasi Simulasi dengan Dua Tipe SCC. Setelah model simulasi PLTS *Off-Grid* selesai dirancang, simulasi akan di Implementasikan dengan dua tipe SCC, yaitu PWM dan MPPT, untuk membandingkan efisiensi pengisian baterai. Pada tahap ini, kedua tipe SCC akan diterapkan pada model simulasi secara terpisah untuk melihat bagaimana masing-masing teknologi mengelola pengisian baterai dalam kondisi yang berbeda. Setiap tipe SCC akan diuji dalam berbagai skenario, termasuk variasi intensitas cahaya dan suhu untuk mensimulasikan kondisi dunia nyata.
5. Pengambilan Data Hasil Simulasi berupa Arus, Tegangan, dan Daya Pengisian Baterai. Data hasil simulasi, yang mencakup nilai arus, tegangan, dan daya yang diterima baterai, akan dikumpulkan secara sistematis. Pengambilan data ini dilakukan dalam berbagai kondisi operasi untuk menganalisis performa sistem di bawah pengaturan PWM

dan MPPT. Data yang diperoleh akan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi efisiensi dan efektivitas pengisian baterai pada masing-masing metode SCC.

- Analisis Perbandingan Efisiensi Pengisian Baterai dari Masing-Masing SCC. Tahapan terakhir adalah analisis perbandingan efisiensi pengisian baterai antara SCC PWM dan MPPT. Efisiensi pengisian akan dihitung berdasarkan parameter arus, tegangan, dan daya yang masuk ke dalam baterai, serta waktu pengisian yang diperlukan untuk mencapai kapasitas penuh. Hasil analisis ini akan menunjukkan perbedaan dalam efisiensi pengisian, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti perubahan intensitas cahaya dan suhu yang mempengaruhi kinerja kedua jenis SCC.

C. Spesifikasi Sistem

Tabel 1. Spesifikasi Alat

NO	Nama Alat	Spesifikasi
1	Panel Surya Monocrystalline	- Daya maksimum (Pmax): 200 Wp - Tegangan maksimum (Vmp): 37.5V - Arus maksimum (Imp): 5.33A
2	SCC (<i>Solar Charge Controller</i>)	- Tipe 1: PWM - Tipe 2: MPPT (Metode:PID Controller)
3	Baterai	- Tegangan nominal: 12 V - Kapasitas: 100 Ah - Jenis: <i>Li-ion</i>

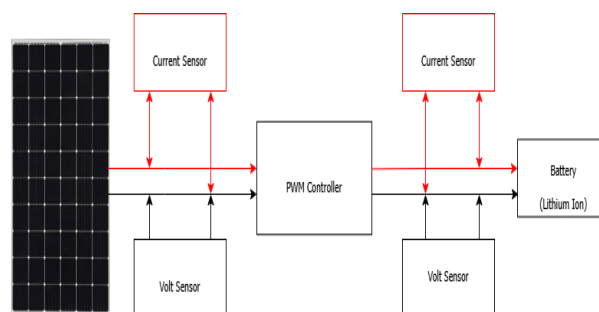
Pada tabel 1 sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dirancang menggunakan berbagai komponen untuk menghasilkan dan mengelola energi listrik yang dihasilkan dari sinar matahari. Salah satu komponen utama adalah panel surya yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Parameter utama yang dipertimbangkan dalam pemilihan panel surya meliputi daya, tegangan, dan arus yang dihasilkan oleh panel, yang kemudian dihubungkan ke *Solar Charge Controller* (SCC) untuk pengaturan pengisian daya. Kapasitas panel surya yang dipilih dalam sistem ini adalah 200 Wp, disesuaikan dengan kapasitas baterai yang digunakan serta kebutuhan daya yang akan disuplai. Dalam hal ini, kapasitas baterai yang digunakan adalah 12V 100Ah, yang dirancang untuk menyimpan energi yang cukup dari panel surya untuk kebutuhan operasional sistem.

Sistem ini menggunakan dua tipe kontrol pengisian daya melalui SCC untuk memastikan pengisian yang optimal dan efisien. Tipe pertama adalah PWM (*Pulse Width Modulation*), yang bekerja dengan cara mengatur pengisian daya dengan modulasi lebar pulsa, menawarkan solusi yang lebih sederhana dan ekonomis. Sementara itu, tipe kedua adalah MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dengan metode *Perturb & Observe*, yang lebih canggih karena dapat memantau dan mengatur pengisian daya untuk mencari titik daya maksimum dari panel surya, sehingga dapat meningkatkan efisiensi transfer daya dari panel ke baterai. Kedua jenis kontrol pengisian ini bekerja secara bersamaan untuk memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel

surya dapat disimpan secara optimal dan siap digunakan dengan efisiensi tinggi.

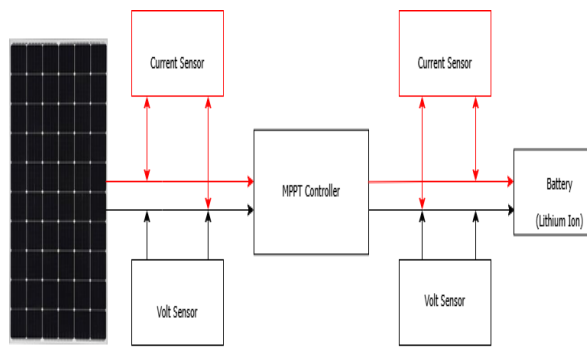
D. Rancangan Sistem

Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah sistem pengontrol daya yang digunakan untuk mengatur proses pengisian baterai dengan mengatur lebar pulsa dari sinyal yang dikirimkan ke baterai. Teknologi PWM ini bekerja dengan cara mengubah durasi atau lebar pulsa untuk mengatur seberapa banyak daya yang dialirkan dari panel surya ke baterai. Dalam sistem ini yang terdapat pada gambar 6, kontroler mengoptimalkan proses pengisian daya dengan cara yang sederhana namun efektif, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan solusi yang lebih ekonomis dan efisien dalam pengisian baterai. Pengujian dari SCC tipe PWM ini dapat dilakukan menggunakan simulasi simulink MATLAB, yang memungkinkan untuk menganalisis kinerja sistem secara lebih mendalam sebelum diimplementasikan. Diagram blok dari SCC PWM Control yang akan disimulasikan di MATLAB menunjukkan alur pengaturan daya mulai dari input panel surya hingga pengisian baterai, dengan modulasi lebar pulsa yang mengatur proses tersebut.



Gambar 6. Blok Diagram PWM control

Sementara itu, untuk meningkatkan efisiensi pengisian daya, *Solar Charge Controller* tipe MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) menggunakan algoritma *Perturb and Observation* (P&O). Algoritma ini bekerja dengan cara mengubah parameter operasional sistem secara periodik dan memonitor respons daya yang dihasilkan untuk menemukan titik daya maksimum yang optimal pada panel surya. Dengan cara ini, SCC tipe MPPT dapat meningkatkan efisiensi pengisian baterai dengan menyesuaikan kondisi operasional panel surya yang berubah-ubah seiring waktu dan kondisi lingkungan. Diagram blok MPPT *Controller* yang ditunjukkan gambar 7 akan dianalisis dalam simulasi menunjukkan bagaimana proses pencarian titik daya maksimum dilakukan, dengan adanya feedback dari panel surya yang terus dianalisis untuk menentukan pengaturan terbaik dalam pengisian daya. Algoritma P&O yang digunakan dalam SCC tipe MPPT memiliki keuntungan dalam mengoptimalkan pengisian daya, menjadikannya lebih efisien dibandingkan dengan tipe PWM, terutama pada kondisi cahaya matahari yang tidak stabil.



Gambar 7. Blok Diagram MPPT control

E. Desain Controller SCC

Setiap *Solar Charge Controller* (SCC) pada sistem ini menggunakan sumber energi berupa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Untuk menjaga agar tegangan yang dihasilkan dapat memenuhi kebutuhan sistem, pada setiap SCC dipasang *Buck-Boost Converter* yang berfungsi menyesuaikan tegangan input menjadi tegangan output yang dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan sumber, sesuai dengan kebutuhan Baterai. Setiap *Buck-Boost Converter* dilengkapi dua tingkat pengendalian utama, yaitu *primary control* dan *secondary control*. *Primary control* berperan menjaga agar tegangan keluaran konverter tetap berada dalam batas yang telah ditentukan. Sementara itu, *secondary control* bertugas mendeteksi dan mengoreksi selisih antara tegangan bus DC (VDC) dengan tegangan referensi (V_{ref}) yang diinginkan. Dengan adanya *secondary control*, kestabilan tegangan sistem dapat tetap terjaga meskipun terjadi perubahan pada daya keluaran sumber energi maupun fluktuasi beban yang terhubung ke sistem.

1) Desain Controller SCC Tipe *Pulse Width Modulation* (PWM)

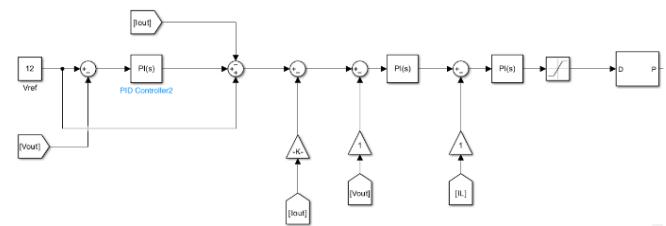


Gambar 8. Desain Controller SCC PWM

Gambar 8 merupakan simbol dari PWM (*Pulse Width Modulation*) atau Modulasi Lebar Pulsa, yang umumnya digunakan dalam sistem pengaturan daya seperti pengaturan *duty cycle* pada sistem PLTS. PWM bekerja dengan cara mengubah rasio antara waktu sinyal aktif (*high*) dan waktu sinyal tidak aktif (*low*) dalam satu periode pulsa. Rasio ini dikenal sebagai *duty cycle*, yang dinyatakan dalam persen (%). Dalam konteks pengisian baterai pada PLTS, PWM digunakan untuk mengatur jumlah energi yang dialirkan dari panel surya ke baterai. Semakin besar *duty cycle*, semakin banyak energi yang disalurkan. Blok PWM dalam simulasi MATLAB Simulink biasanya menerima sinyal kontrol (misalnya hasil keluaran dari pengendali PI) dan mengubahnya menjadi sinyal pulsa digital yang mengatur switching dari konverter daya (seperti *buck*, *boost*, atau *buck-boost converter*). Dengan demikian, blok PWM menjadi

elemen penting dalam mengontrol efisiensi dan kestabilan pengisian daya ke baterai.

2) Desain Controller SCC Tipe *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)



Gambar 9. Desain Controller SCC MPPT

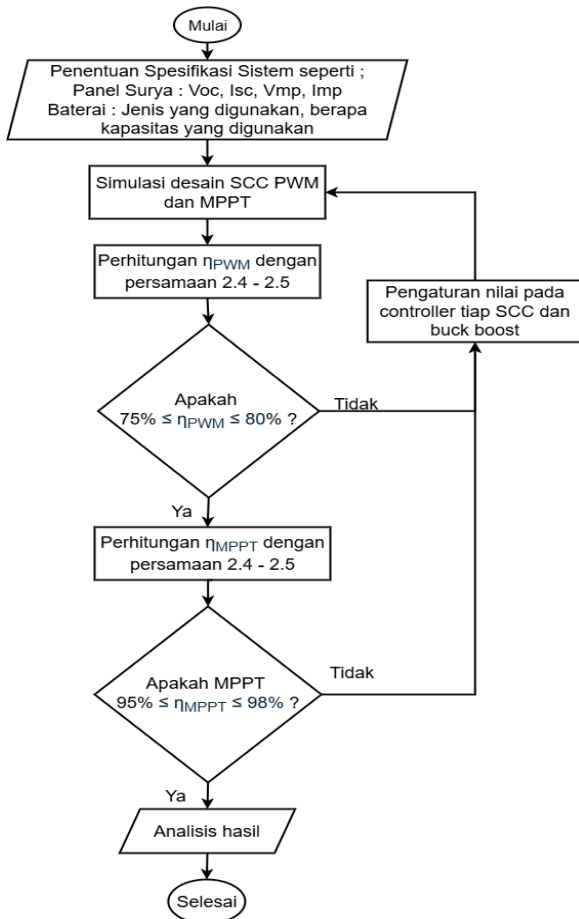
Gambar 9 merupakan diagram blok sistem kendali PI (*Proportional-Integral*) yang digunakan dalam simulasi pengaturan tegangan dan arus, kemungkinan besar dalam konteks pengisian baterai pada sistem PLTS *off-grid* menggunakan MATLAB Simulink. Tujuan utama dari pengendali ini adalah untuk menjaga agar tegangan output sistem tetap stabil pada nilai referensi yang telah ditentukan (misalnya 12V), meskipun terjadi perubahan beban atau gangguan eksternal lainnya. Simulasi dimulai dari input tegangan referensi ($V_{ref} = 12V$) yang dibandingkan dengan tegangan output aktual (V_{out}). Selisih keduanya menghasilkan sinyal error tegangan, yang kemudian diproses oleh blok PI Controller pertama untuk menghasilkan sinyal kontrol awal. Sinyal ini kemudian dijumlahkan dengan sinyal arus output aktual (I_{out}) yang menjadi bagian dari umpan balik sistem. Selanjutnya, sinyal dikoreksi kembali oleh blok pengali negatif ($-K$) untuk mengurangi pengaruh arus yang berlebihan dan menjaga kestabilan. Sinyal kemudian melewati serangkaian penyesuaian tambahan yang menggabungkan umpan balik dari tegangan (V_{out}) dan arus induktor (IL) guna meningkatkan presisi dan respons sistem. Masing-masing umpan balik ini juga dibandingkan melalui pengurang, kemudian dimasukkan ke dalam PI Controller kedua dan ketiga untuk menghasilkan koreksi lanjutan terhadap sinyal kontrol. Akhirnya, sinyal kontrol hasil koreksi melewati blok pembatas atau saturasi (yang tampak berbentuk kurva tangga), berfungsi untuk mencegah sinyal output melampaui batas maksimum atau minimum tertentu. Output akhir berupa sinyal kontrol *duty cycle* (D) yang digunakan untuk mengatur kinerja konverter daya atau pengisian baterai dalam sistem PLTS. Dengan pengaturan ini, sistem diharapkan mampu menjaga tegangan baterai tetap stabil, meningkatkan efisiensi pengisian, serta merespons secara adaptif terhadap variasi beban dan iradiasi surya.

3) Desain Buck-Boost Converter

Gambar 10. Desain Buck-Boost Converter

Pada gambar 10 *converter* ini, terdapat dua mode operasi, yaitu mode *buck* dan *boost*, sehingga keluaran tegangan dapat tetap stabil meskipun terjadi perubahan pada tegangan *input*. *Duty cycle* mengatur kerja *converter* sehingga perangkat dapat secara otomatis berpindah antara mode *buck* maupun *boost*. Pada saat mode *buck*, tegangan *input* lebih tinggi dibandingkan tegangan *output*, sedangkan pada mode *boost*, tegangan *input* lebih rendah daripada tegangan *output*.

F. Flowchart Sistem

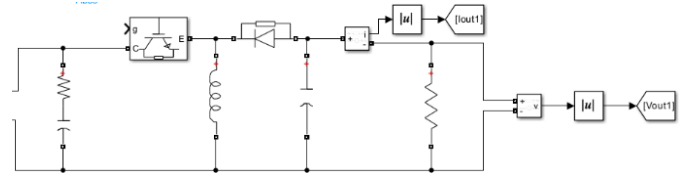


Gambar 11. Flowchart Sistem

Berikut penjelasan dari gambar 11 *Flowchart* sistem:

1. Start Proses diawali dengan memulai keseluruhan simulasi dan analisis sistem.
2. Menentukan parameter teknis yang akan digunakan dalam simulasi: Panel Surya: Tegangan *Open Circuit* (Voc) Arus *Short Circuit* (Isc) Tegangan pada daya maksimum (Vmp) Arus pada daya maksimum (Imp) Baterai: Jenis baterai (misalnya *Lithium-ion* atau *Lead Acid*) Kapasitas baterai (Ah). Tegangan

nominal Spesifikasi ini digunakan untuk membuat



model simulasi yang akurat..

3. Simulasi Desain SCC PWM dan MPPT Membuat model sistem PLTS di MATLAB Simulink dengan dua konfigurasi berbeda..
4. Perhitungan Efisiensi PWM (η_{PWM}): Pada tahap ini dihitung efisiensi dari SCC tipe PWM menggunakan persamaan 2.4–2.5 yang telah ditentukan dalam metodologi penelitian..
5. Apakah η_{PWM} dalam rentang 75% – 80%?
 - a) Jika Ya, maka perhitungan efisiensi dilanjutkan ke SCC tipe MPPT.
 - b) Jika Tidak, dilakukan pengaturan ulang nilai pada controller tiap SCC dan juga pada rangkaian buck-boost agar kinerja PWM sesuai target, kemudian kembali ke tahap simulasi.
6. Perhitungan Efisiensi MPPT (η_{MPPT}) Setelah efisiensi PWM sesuai rentang, maka dilakukan perhitungan efisiensi SCC tipe MPPT dengan persamaan yang sama (2.4–2.5).
7. Apakah η_{MPPT} dalam rentang 95% – 98%?
 - a) Jika Ya, maka hasil simulasi dianggap valid dan dilanjutkan pada tahap analisis hasil.
 - b) Jika Tidak, maka sama seperti sebelumnya dilakukan pengaturan ulang pada controller SCC MPPT maupun buck-boost, kemudian kembali ke tahap simulasi untuk memperoleh hasil sesuai target.
8. Analisis Hasil Setelah kedua tipe SCC memenuhi kriteria efisiensi masing-masing, dilakukan analisis dan perbandingan hasil efisiensi serta kinerja pengisian baterai antara PWM dan MPPT.
9. Selesai Proses berakhir setelah seluruh tahapan simulasi, perhitungan, dan analisis selesai. Kesimpulan dan rekomendasi dapat disampaikan berdasarkan hasil yang diperoleh dari setiap tahapan di atas.

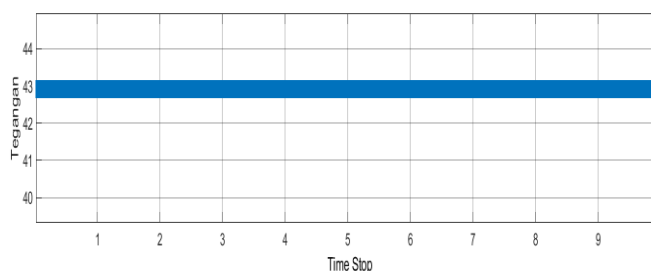
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dipaparkan hasil simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid yang memanfaatkan dua tipe Solar Charge Controller (SCC), yakni PWM (Pulse Width Modulation) dan MPPT (Maximum Power Point Tracking), beserta analisis efisiensi pengisian baterai berdasarkan data keluaran dari masing-masing simulasi. Model sistem dibangun menggunakan MATLAB Simulink dengan parameter input berupa tegangan dan arus dari panel surya dan spesifikasi baterai sebagai elemen penyimpanan.

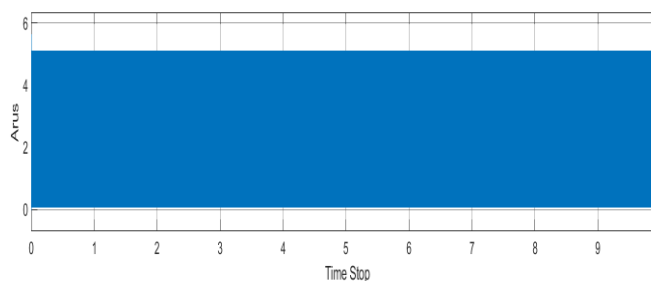
Hasil simulasi yang diperoleh meliputi tegangan output, arus pengisian, serta daya yang masuk ke baterai, kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat efisiensi proses pengisian energi. Analisis ini dilakukan untuk membandingkan kinerja kedua metode SCC dalam kondisi simulasi yang setara, serta menilai efektivitas masing-masing metode dalam mentransfer daya dari panel surya ke baterai secara optimal.

A. Hasil Simulasi Sistem dengan SCC PWM

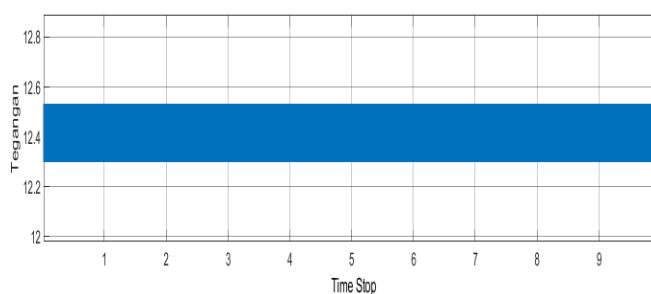
Solar charging control tipe PWM adalah metode yang digunakan untuk memanipulasi width pulse (lebar pulsa) tinggi dan rendah yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu periode untuk mendapatkan nilai tegangan rata-rata yang berbeda. Berikut pengujian SCC tipe PWM pada simulasi simulink MATLAB :



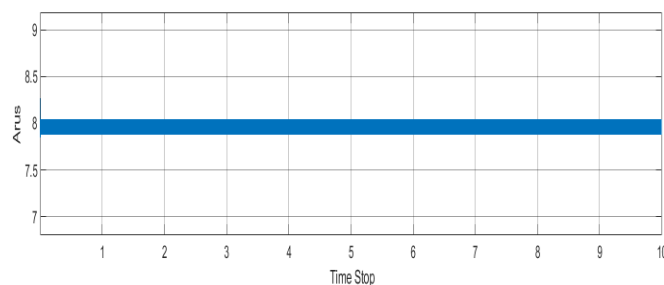
Gambar 12. Grafik Tegangan Input dari Panel Surya



Gambar 13. Grafik Arus Input dari Panel Surya



Gambar 14. Grafik Tegangan Output dari SCC PWM



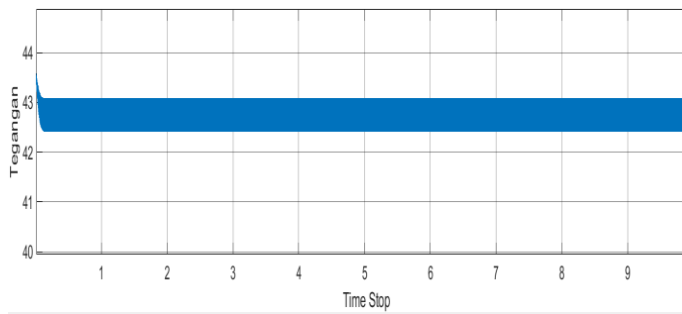
Gambar 15. Grafik Arus Output dari SCC PWM

Pada gambar diatas menunjukkan hasil pengamatan dari empat parameter sistem pengisian baterai menggunakan PWM, yang kemungkinan besar mencakup:

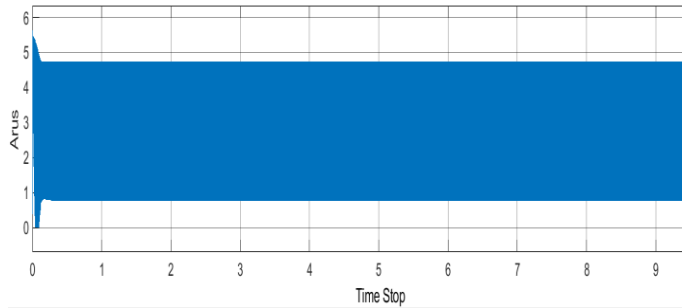
- Gambar grafik 12 (Vinput) Grafik pertama menunjukkan tegangan input (Vinput) dari panel surya ke SCC PWM. Nilai Vinput terlihat stabil pada sekitar 43 V sepanjang waktu simulasi. Hal ini menandakan bahwa panel surya menghasilkan tegangan konstan dan tidak mengalami fluktuasi signifikan selama proses pengisian.
- Gambar grafik 13 (Iinput) Grafik kedua menampilkan arus input (Iinput) yang masuk ke SCC PWM dari panel surya. Nilai Iinput stabil di sekitar 10 A. Arus input yang konstan ini menunjukkan bahwa SCC PWM bekerja secara optimal dalam mengatur arus yang masuk dari panel surya ke sistem
- Gambar grafik 14 (Voutput) Grafik ketiga merupakan tegangan output (Voutput) dari SCC PWM menuju baterai. Nilai Voutput stabil di sekitar 12,4 V. Tegangan output yang lebih rendah dari input ini sesuai dengan karakteristik SCC PWM, di mana tegangan output diatur agar sesuai dengan tegangan nominal baterai untuk mencegah overcharging.
- Gambar grafik 15 (Ioutput) Grafik keempat menunjukkan arus output (Ioutput) yang dialirkan ke baterai. Nilai Ioutput juga stabil di sekitar 8 A. Arus output yang lebih kecil dari arus input mengindikasikan adanya penyesuaian daya oleh SCC PWM agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai dan efisiensi sistem.

B. Hasil Simulasi Sistem dengan SCC MPPT

MPPT digunakan untuk mengidentifikasi titik daya maksimum (*Maximum Power Point*/MMP). Metode yang digunakan dalam pengendalian ini adalah algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Dalam pendekatan ini, kontroler secara bertahap melakukan perubahan kecil pada parameter tegangan, kemudian memantau perubahan daya yang terjadi. Jika daya yang dihasilkan meningkat, maka tegangan akan terus dinaikkan hingga tercapai titik di mana daya tidak lagi bertambah maupun berkurang. Berikut pengujian SCC tipe MPPT pada simulasi simulink MATLAB :

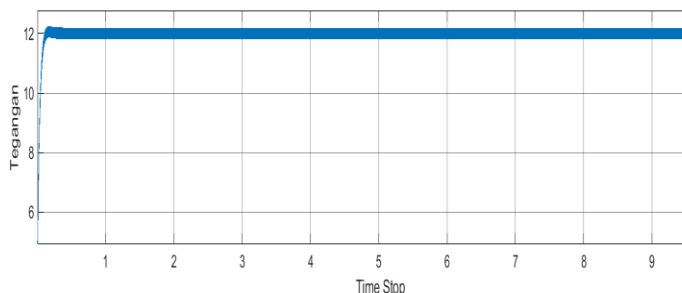


Gambar 16. Grafik Tegangan *Input* dari Panel Surya

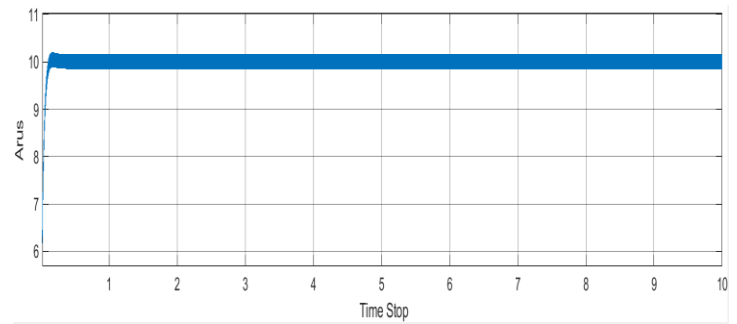


Gambar 17. Grafik Arus *Input* dari Panel Surya

$$\begin{aligned} P_{in} &= V \times I \\ P_{in} &= 43 \times 3 \\ P_{in} &= 129 \text{ W} \end{aligned}$$



Gambar 18. Grafik Tegangan *Output* dari SCC MPPT



Gambar 19. Grafik Arus *Output* dari SCC MPPT

Pada gambar diatas menunjukkan hasil pengamatan dari empat parameter sistem pengisian baterai menggunakan MPPT, yang kemungkinan besar mencakup:

- Gambar grafik 16 (V_{input}) Grafik pertama menunjukkan tegangan input (V_{input}) dari panel surya ke SCC MPPT. Nilai V_{input} berada pada kisaran 43 V dan menunjukkan kenaikan sedikit naik seiring 39 waktu. Hal ini menandakan bahwa panel surya beroperasi mendekati titik daya maksimum (Maximum Power Point), sesuai dengan karakteristik kerja MPPT yang selalu menyesuaikan titik kerja panel agar daya output maksimal.
- Gambar grafik 17 (I_{input}) Grafik kedua menunjukkan arus input (I_{input}) dari panel surya ke SCC MPPT. Nilai I_{input} stabil di sekitar 3 A. Arus input yang relatif tinggi ini menunjukkan bahwa MPPT mampu menarik arus maksimum dari panel surya, sehingga daya yang diambil dari panel lebih optimal dibandingkan metode PWM.
- Gambar grafik 18 (V_{output}) Grafik ketiga adalah tegangan output (V_{output}) dari SCC MPPT ke baterai. Nilai V_{output} stabil di sekitar 12,4 V. Tegangan output ini sesuai dengan tegangan nominal baterai yang diisi. Stabilitas tegangan output menandakan MPPT mampu mengatur tegangan agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai, serta mencegah overcharging.
- Gambar grafik 19 (I_{output}) Grafik keempat adalah arus output (I_{output}) dari SCC MPPT ke baterai. Nilai I_{output} stabil di sekitar 10 A. Arus output ini lebih kecil dari arus input, sesuai prinsip konversi daya pada MPPT, di mana tegangan output lebih rendah dari input namun arus output cukup besar untuk efisiensi pengisian baterai.

C. Perbandingan dan Pembahasan Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan menggunakan MATLAB Simulink, diperoleh data performa dari dua jenis *Solar Charge Controller*, yaitu SCC PWM dan SCC MPPT. Keduanya diuji dalam kondisi yang sama, dengan *input* tegangan dan arus dari panel surya.

1. Perhitungan Efisiensi SCC

Perhitungan Efisiensi SCC tipe PWM dengan rumus (4) :

$$\begin{aligned} P_{out} &= V \times I \\ P_{out} &= 12,4 \times 8 \\ P_{out} &= 99,2 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{99,2}{129} \times 100\% = 76,89\%$$

Perhitungan Efisiensi SCC tipe MPPT dengan rumus (4) :

$$\begin{aligned} P_{out} &= V \times I & P_{in} &= V \times I \\ P_{out} &= 12,4 \times 10 & P_{in} &= 43 \times 3 \\ P_{out} &= 124 \text{ W} & P_{in} &= 129 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{124}{129} \times 100\% = 96,12\%$$

2. Perhitungan Lama Pengisian Waktu SCC

Perhitungan Lama Pengisian Waktu SCC tipe PWM dengan rumus (6) :

$$\text{Lama Waktu Pengisian Baterai} = \frac{100}{8} = 12,5 \text{ jam}$$

Perhitungan Lama Pengisian Waktu SCC tipe MPPT dengan rumus (6) :

$$\text{Lama Waktu Pengisian Baterai} = \frac{100}{10} = 10 \text{ jam}$$

3. Perhitungan Efisiensi Pengisian Waktu SCC

Perhitungan Efisiensi Pengisian Waktu SCC tipe PWM dengan rumus (5) :

$$\begin{aligned} E_{out} &= V \times I \times t \\ E_{out} &= 12,4 \times 8 \times 12,5 \\ E_{out} &= 1240 \text{ Wh} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{1240}{1612,5} \times 100\% = 76,89\%$$

Perhitungan Efisiensi Pengisian Waktu SCC tipe MPPT dengan rumus (5) :

$$\begin{aligned} E_{out} &= V \times I \times t \\ E_{out} &= 12,4 \times 10 \times 10 \\ E_{out} &= 1240 \text{ Wh} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{1240}{1290} \times 100\% = 96,12\%$$

Tabel 2. Data Hasil Perhitungan

SCC	Efisiensi SCC	Lama Pengisian Waktu	Efisiensi Pengisian
PWM	76,89 %	12,5 jam	76,89 %
MPPT	96,12 %	10 jam	96,12 %

Berdasarkan data pada tabel 2, dapat disimpulkan bahwa jenis Solar Charge Controller (SCC) yang digunakan

berpengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem serta durasi pengisian baterai pada PLTS off grid. Penggunaan SCC tipe PWM menghasilkan efisiensi pengisian sebesar 76,89% dengan waktu pengisian mencapai 12,5 jam. Sebaliknya, SCC tipe MPPT menunjukkan kinerja yang lebih unggul, dengan efisiensi 42 mencapai 96,12% dan waktu pengisian yang lebih singkat, yaitu hanya 10 jam. Hasil ini mengindikasikan bahwa teknologi MPPT mampu mengoptimalkan transfer energi dari panel surya ke baterai secara lebih efektif, sekaligus mempercepat proses pengisian. Perbedaan efisiensi yang cukup mencolok menegaskan bahwa MPPT memiliki keunggulan dalam mengelola daya pada sistem off-grid yang menuntut efisiensi tinggi. Dengan demikian, meskipun biaya awal penerapan SCC tipe MPPT relatif lebih tinggi dibandingkan PWM, teknologi ini sangat direkomendasikan untuk meningkatkan kinerja dan keandalan sistem PLTS secara keseluruhan.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai Analisis Efisiensi Pengisian Baterai pada PLTS Off Grid dengan Sistem SCC PWM dan MPPT Menggunakan Simulink, maka pada bab ini akan disampaikan kesimpulan yang merupakan rangkuman dari keseluruhan analisis dan pembahasan sebelumnya. Kesimpulan ini disusun untuk menjawab tujuan penelitian serta memberikan gambaran umum mengenai efisiensi SCC pada PLTS.

- Respon Efisiensi Keluaran SCC PWM Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan menggunakan MATLAB Simulink, sistem PLTS *off-grid* yang menggunakan Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM menghasilkan efisiensi pengisian baterai sebesar 76,89%. Nilai efisiensi ini diperoleh pada kondisi input tegangan sebesar 43 V dan arus 3 A, dengan waktu pengisian relatif lebih lama, yaitu sekitar 12,5 jam. Temuan ini menunjukkan bahwa SCC tipe PWM masih dapat digunakan untuk sistem dengan kebutuhan daya rendah, namun kurang optimal dalam proses transfer energi secara maksimal ke baterai, terutama pada sistem PLTS *off-grid* yang membutuhkan efisiensi tinggi.

$$\begin{aligned} E_{in} &= V \times I \times t \\ E_{in} &= 43 \times 3 \times 12,5 \\ E_{in} &= 1612,5 \text{ Wh} \end{aligned}$$
- Respon Efisiensi Keluaran SCC MPPT Simulasi pada sistem yang menggunakan SCC tipe MPPT menunjukkan efisiensi pengisian baterai yang lebih tinggi, yaitu sebesar 96,12%, dalam kondisi parameter input yang serupa dengan sistem PWM. Selain efisiensi yang meningkat, waktu pengisian baterai juga lebih singkat, yaitu hanya 10 jam. Hal ini menunjukkan bahwa metode MPPT mampu mempertahankan titik daya maksimum (*Maximum Power Point*), menjaga kestabilan tegangan output sesuai kebutuhan baterai, dan

$$\begin{aligned} E_{in} &= V \times I \times t \\ E_{in} &= 43 \times 3 \times 10 \\ E_{in} &= 1290 \text{ Wh} \end{aligned}$$

secara signifikan meningkatkan kinerja pengisian energi pada sistem PLTS *off-grid*.

- Perbandingan dan Kajian Efisiensi SCC PWM dan MPPT Hasil analisis perbandingan antara kedua jenis SCC menunjukkan bahwa MPPT memiliki keunggulan signifikan dalam efisiensi dan efektivitas pengisian baterai dibandingkan PWM. Efisiensi pengisian yang lebih tinggi dan waktu pengisian yang lebih singkat pada sistem MPPT membuktikan kemampuannya dalam mengoptimalkan transfer daya dari panel surya ke baterai. Oleh karena itu, SCC tipe MPPT sangat direkomendasikan untuk sistem PLTS *off-grid* yang menuntut performa tinggi, efisiensi optimal, dan pengisian energi yang cepat serta andal.

B. Saran

- Berdasarkan temuan dari penelitian ini, disarankan agar penelitian selanjutnya tidak hanya terbatas pada perbandingan efisiensi pengisian baterai antara SCC tipe PWM dan MPPT, tetapi juga mencakup pengujian terhadap berbagai variabel lain, seperti kapasitas baterai yang berbeda, jenis panel surya yang digunakan, serta variasi kondisi iradiasi. Selain itu, integrasi sistem kendali tambahan seperti proteksi *overcharge* dan pemantauan suhu baterai, baik dalam simulasi maupun pada implementasi nyata, diharapkan dapat memberikan analisis yang lebih menyeluruh terhadap performa sistem PLTS *off-grid* dalam berbagai skenario operasional.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Bosowa, M. Kivlan Wiguna, S. Musdalifah Katjong, F. Azis, and P. Bosowa Jl Kapasa Raya, "Teknologi Hybrid Energi angin dan Energi Matahari Sebagai Sumber Energi Listrik," *Journal Of Electrical Engginering (Joule)*, vol. 2, no. 2, 2021.
- [2] N. S. Gunawan *et al.*, "UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) 26,4 KWP PADA SISTEM SMART MICROGRID UNUD," 2019.
- [3] D. Liestyowati, I. Rachman, E. Firmansyah, and Mujiburrohman, "Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Berkapasitas 100 WP dengan Inverter 1000 Watt," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 5, pp. 623–634, Oct. 2022, doi: 10.55123/insologi.v1i5.1027.
- [4] M. Rizal Wira Kusuma, E. Apriakar, J. Teknik Elektro, F. Teknik, and U. Negeri Semarang, "Rancang Bangun Sistem Pembersih Otomatis Pada Solar Panel Menggunakan Wiper Berbasis Mikrokontroler."
- [5] C. I. Cahyadi *et al.*, "Efisiensi Recharger Baterai Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Edu Elekrika Journal*, vol. 9, no. 2.
- [6] Fianti, A. Y. Perdana, B. Astuti, and I. Akhlis, "Analysis of PWM- And MPPT-solar charge controller efficiency by simulation," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jun. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1918/2/022004.
- [7] A. Gunawan, M. Sahar, C. Kharisma Putri, P. Studi D-IV Teknik Listrik, and P. Caltex Riau, "JURNAL PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT Pelatihan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid Pure Sine Wave (Psw) Kapasitas 1000 Wp di Smk Negeri 1 Minas," vol. 5, no. 1, pp. 112–120, 2024, doi: 10.31849/fleksibel.v5i1.16597.
- [8] Samsurizal, K. Mauriraya, M. Fikri, P. Nurmiati, and Christiono, *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*, Edisi Pertama. Jakarta Barat: Institut Teknologi PLN, 2021.
- [9] P. Stasiun Pengisian Sepeda Listrik, "ANALISIS EFISIENSI SOLAR CHARGE CONTROLLER TIPE PWM."
- [10] R. W. Sikumbang, "Analisis Efisiensi Solar Charge Controller Menggunakan Integrasi Numerik dengan MATLAB Simulink," *KURVATEK*, vol. 9, no. 2, pp. 127–134, Nov. 2024, doi: 10.33579/krvtk.v9i2.5013.
- [11] E. Faizal, Y. Agus Winoko, M. S. Mustapa, and M. Kozin, "Solar Charger Controller Efficiency Analysis of Type Pulse Width Modulation (PWM) and Maximum Power Point Tracking (MPPT)." [Online]. Available: <https://attractivejournal.com/index.php/ajse>
- [12] E. Faizal, Y. Agus Winoko, M. S. Mustapa, and M. Kozin, "Solar Charger Controller Efficiency Analysis of Type Pulse Width Modulation (PWM) and Maximum Power Point Tracking (MPPT)." [Online]. Available: <https://attractivejournal.com/index.php/ajse>
- [13] E. Faizal, Y. Agus Winoko, M. S. Mustapa, and M. Kozin, "Solar Charger Controller Efficiency Analysis of Type Pulse Width Modulation (PWM) and Maximum Power Point Tracking (MPPT)." [Online]. Available: <https://attractivejournal.com/index.php/ajse>
- [14] N. S. Gunawan *et al.*, "UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) 26,4 KWP PADA SISTEM SMART MICROGRID UNUD," 2019.
- [15] G. Patrianaya Margayasa Wirsuyana, R. Sari Hartati, I. Bagus Gede Manuaba, and P. Studi Magister Teknik Elektro, "Metode Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya: Sebuah Tinjauan Literatur."
- [16] M. Ridho, B. Winardi, and B. Setiyono, "DESAIN DAN SIMULASI SISTEM PLTS DENGAN MAXIMUM POWER POINT TRACKING METODE PERTURB AND OBSERVE DI SMA NEGERI 4 SEMARANG MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK." [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [17] C. Pasaribu, *ANALISA PENGARUH PENDINGINAN PERMUKAAN PANEL SURYA TERHADAP DAYA KELUARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MATAHARI*, Edisi Pertama. Medan: Universitas Pembangunan Panca Budi, 2021.
- [18] C. I. Cahyadi *et al.*, "Efisiensi Recharger Baterai Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Edu Elekrika Journal*, vol. 9, no. 2.

- [19] M. Syah Putra, "Analisis Efisiensi Pembangkitan Daya Listrik Modul Surya terhadap Penyinaran Matahari Menggunakan Solar Power Meter."
- [20] ah Amalia, F. Hesty Sholihah, and H. Achmad Daffa, "Analysis of Integrated Battery Energy Storage System with 1 MW Solar Power Plant," *Analysis of Integrated Battery Energy Storage System with 1 MW Solar Power Plant. Journal of Research and Technology*, vol. 9, no. Desember, pp. 261–268, 2023.
- [21] M. Suyanto, S. Priyambodo, P. E.P, and A. Purnama Aji, "Optimalisasi Pengisian Accu Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Dengan Solar Charge Controller (MPPT)," *J Teknol*, vol. 15, no. 1, pp. 22–29, Jul. 2022, doi: 10.34151/jurtek.v15i1.3929.

VII. BIODATA PENULIS



Dimas Wahyu Firmansyah lahir di Malang dengan tanggal 02 September 2003. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK PGRI 03 Tlogomas Malang dengan lulus di tahun 2021. Selanjutnya pada tahun 2021 penulis melanjutkan Pendidikan Studi di perguruan tinggi swasta Institut Teknologi Nasional Malang program studi Teknik Elektro S-1 dengan konsentrasi Energi Listrik. Diakhir kata dari penulis mengucapkan terimakasih dan rasa syukur yang sebanyak-banyaknya atasa selesainya penelitian ini dengan judul Analisis Efisiensi Pengisian Baterai Pada PLTS Off Grid Dengan Sistem SCC PWM Dan MPPT Menggunakan Simulink.