

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.1.1 Pengertian PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit listrik yang menggunakan energi radiasi matahari sebagai sumber utama dalam menghasilkan energi listrik. Energi cahaya matahari tersebut diubah secara langsung menjadi energi listrik melalui teknologi fotovoltaik (photovoltaic/PV) yang terdapat pada modul surya. Proses perubahan ini berlangsung ketika foton dari cahaya matahari mengenai sel surya sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC). (Alamsyah et al., 2025)

PLTS juga dapat didefinisikan sebagai suatu sistem pembangkit energi listrik yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti panel surya, inverter, sistem penyimpanan energi (baterai), serta komponen pendukung lainnya yang bekerja secara terintegrasi. Panel surya berfungsi sebagai komponen utama yang menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik, sedangkan inverter digunakan untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh beban listrik (Pijoh, 2024)

2.1.2 Prinsip Kerja Sistem PLTS

Prinsip kerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) didasarkan pada efek fotovoltai, yaitu proses konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan sel surya. Ketika radiasi matahari mengenai permukaan panel surya, foton akan diserap oleh material semikonduktor (umumnya silikon), sehingga menyebabkan terjadinya pergerakan elektron dan menghasilkan arus listrik searah (DC). Proses ini merupakan dasar utama dalam pembangkitan energi listrik pada sistem PLTS (Alamsyah et al., 2025)

Arus listrik DC yang dihasilkan oleh panel surya selanjutnya dialirkan menuju komponen pengatur seperti solar charge controller, yang berfungsi untuk mengatur tegangan dan arus agar sesuai dengan kebutuhan sistem serta melindungi baterai dari overcharging maupun overdischarging. Pada sistem yang menggunakan penyimpanan energi, listrik DC tersebut disimpan dalam baterai untuk digunakan saat intensitas cahaya matahari rendah atau pada malam hari (Pijoh, 2024)

Selanjutnya, untuk dapat digunakan oleh peralatan listrik rumah tangga atau industri yang umumnya menggunakan arus bolak-balik (AC), listrik DC dari panel atau baterai akan dikonversi menggunakan inverter menjadi listrik AC. Inverter merupakan komponen penting dalam sistem PLTS karena menentukan kualitas daya listrik yang dihasilkan agar sesuai dengan standar tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan oleh beban

Secara keseluruhan, alur kerja sistem PLTS dimulai dari penyerapan energi matahari oleh panel surya, konversi menjadi listrik DC, pengaturan dan penyimpanan energi (jika menggunakan baterai), hingga proses konversi menjadi listrik AC oleh inverter untuk kemudian digunakan oleh beban. Sistem ini dapat bekerja secara mandiri (off-grid) maupun terhubung dengan jaringan listrik (*on-grid*), sehingga memberikan fleksibilitas dalam pemanfaatannya sesuai dengan kebutuhan energi (Dusun & Hutumuri, 2025)

2.1.2 Komponen utama pembangkit listrik tenaga surya

Komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terdiri dari beberapa bagian yang saling terintegrasi untuk menghasilkan energi listrik secara optimal. Komponen utama tersebut meliputi panel surya (modul fotovoltaik), solar charge controller, baterai (penyimpanan energi), dan inverter. Masing-masing komponen memiliki fungsi spesifik dalam proses konversi dan distribusi energi listrik dari matahari hingga dapat digunakan oleh beban (Alamsyah et al., 2025)

2.1.2.1 Panel Surya

Panel surya atau modul fotovoltaik merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Ketika foton dari sinar matahari mengenai material semikonduktor, elektron akan bergerak sehingga menghasilkan arus listrik



Gambar 2. 1 Panel Surya

searah (DC). Teknologi ini menjadi komponen utama dalam sistem PLTS karena berperan langsung dalam proses konversi energi terbarukan menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan. (Rahmanta et al., 2023)

Sumber: <https://atonergi.com/plts-atap-grid-tie-vs-off-grid/>
2.1.2.2 Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) adalah perangkat yang berfungsi mengatur dan mengontrol aliran energi listrik dari panel surya ke baterai serta ke beban. SCC menjaga kestabilan tegangan dan arus agar sesuai dengan karakteristik sistem, serta melindungi baterai dari kerusakan akibat overcharging dan overdischarging. (Setiawan et al., 2025)

Solar Charge Controller (SCC) dibedakan menjadi dua tipe utama, yaitu:

1. Pulse Width Modulation (PWM)

Solar Charge Controller tipe *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan pengontrol pengisian yang bekerja dengan menghubungkan panel surya secara langsung ke baterai melalui proses pensaklaran (*switching*). Ketika baterai mendekati kondisi penuh, SCC PWM mengurangi arus pengisian dengan mengatur lebar pulsa (*pulse width*) sehingga proses pengisian berlangsung secara bertahap.

Pada SCC PWM, tegangan panel surya akan mengikuti tegangan baterai sehingga panel tidak selalu beroperasi pada titik daya maksimumnya. Kondisi ini menyebabkan sebagian daya potensial panel surya tidak dapat dimanfaatkan secara

optimal, terutama ketika tegangan panel lebih tinggi daripada tegangan baterai. Meskipun demikian, SCC PWM memiliki konstruksi yang sederhana, biaya lebih rendah, serta cocok digunakan pada sistem PLTS berkapasitas kecil yang tidak memerlukan efisiensi tinggi. (Majaw et al., 2021)



Gambar 2. 2 SCC Tipe PWM

Sumber: https://shopdelta.eu/shop_image/product/

2. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Solar Charge Controller tipe Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan pengontrol pengisian yang menggunakan algoritma pencarian titik daya maksimum (Maximum Power Point) pada panel surya. MPPT mengombinasikan pengendalian elektronik dengan konverter DC-DC sehingga panel surya tetap bekerja pada titik daya maksimum meskipun terjadi perubahan intensitas cahaya matahari maupun suhu lingkungan.

Berbeda dengan PWM, MPPT tidak memaksa tegangan panel mengikuti tegangan baterai. Tegangan panel tetap dipertahankan pada nilai optimum, sedangkan konverter DC-

DC mengubah tegangan tersebut menjadi tegangan yang sesuai untuk pengisian baterai. Dengan metode ini, energi yang diperoleh dari panel surya dapat dimanfaatkan secara lebih maksimal sehingga efisiensi sistem meningkat.(Acharya & Aithal, 2020)



Gambar 2. 3 SCC tipe MPPT

<https://energi depot.ca/cdn/shop/files/61N80CbVoLL.jpg>

2.1.2.3 Baterai

Baterai dalam sistem PLTS berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya sehingga energi tersebut dapat digunakan saat tidak ada sinar matahari. Penyimpanan energi ini memungkinkan sistem tetap menyuplai beban secara kontinu. Dalam pengembangannya, sistem PLTS modern menggunakan berbagai jenis baterai dengan efisiensi dan umur pakai yang semakin baik untuk mendukung keandalan sistem energi terbarukan. (Dan et al., 2024)



Gambar 2. 4 Aki

Sumber: <https://pusatakimobil.com/wp->

2.1.2.4 Inverter

Inverter merupakan perangkat yang berfungsi mengubah arus listrik searah (DC) dari panel surya atau baterai menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh peralatan listrik. Inverter juga berperan dalam menyesuaikan tegangan dan frekuensi agar sesuai dengan standar jaringan listrik atau kebutuhan beban, sehingga menjadi komponen penting dalam memastikan kualitas daya pada sistem PLTS. (Journal et al., 2023)



Gambar 2. 5 Inverter

Sumber: https://shopdelta.eu/shop_image/product/

2.1.3 Jenis-Jenis Sistem PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat diklasifikasikan berdasarkan sistem operasinya menjadi beberapa jenis, yaitu PLTS *off-grid*, *on-grid*, dan *hybrid*. Klasifikasi ini didasarkan pada bagaimana sistem PLTS tersebut terhubung dengan jaringan listrik serta cara pengelolaan energi yang dihasilkan. Pemilihan jenis sistem PLTS sangat bergantung pada kebutuhan energi, kondisi lokasi, serta ketersediaan jaringan listrik konvensional. (Setiawan et al., 2025)

2.1.3.1 PLTS off-grid

PLTS *off-grid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang bekerja secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan baterai sebagai media penyimpanan energi untuk menjaga kontinuitas suplai listrik saat tidak ada sinar matahari. PLTS *off-grid* banyak digunakan di daerah terpencil atau wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional karena sifatnya yang independen dan fleksibel. (Rahmanta et al., 2023)

2.1.3.2 PLTS on-grid

PLTS *on-grid* adalah sistem PLTS yang terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN tanpa menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya akan digunakan langsung oleh beban, dan kelebihan energi dapat disalurkan kembali ke jaringan listrik. Sistem ini umumnya digunakan pada area perkotaan yang

telah memiliki akses jaringan listrik, karena lebih efisien dari segi biaya dan perawatan dibandingkan sistem *off-grid*.(Journal et al., 2023)

2.1.3.3 PLTS Hybird

PLTS *hybrid* merupakan kombinasi antara sistem *off-grid* dan *on-grid*, yaitu sistem yang terhubung dengan jaringan listrik namun juga dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpanan energi. Sistem ini memungkinkan pemanfaatan energi matahari secara optimal dengan tetap menjaga keandalan suplai listrik melalui cadangan energi dari baterai maupun jaringan PLN. PLTS hybrid banyak digunakan pada sistem yang membutuhkan keandalan tinggi, seperti fasilitas industri atau layanan publik. (Dan et al., 2024)

2.2 Sistem PLTS *off-grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* merupakan sistem pembangkit listrik yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung dengan jaringan listrik umum (PLN). Sistem ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di lokasi yang tidak memiliki akses terhadap jaringan distribusi listrik, seperti daerah terpencil atau wilayah kepulauan. PLTS *off-grid* memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utama dan mengandalkan sistem penyimpanan energi untuk menjaga kontinuitas suplai listrik. (Setiawan et al., 2025)

2.2.1 Cara Kerja Sistem PLTS *off-grid*

Cara kerja sistem PLTS *off-grid* diawali dengan penyerapan energi matahari oleh panel surya yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik

dalam bentuk arus searah (DC) melalui efek fotovoltaiik, dimana besar energi yang dihasilkan bergantung pada intensitas penyinaran matahari. Energi listrik tersebut selanjutnya dialirkan ke solar charge controller (SCC) untuk diatur agar proses pengisian ke baterai berlangsung aman dan efisien, serta untuk mencegah terjadinya overcharging dan overdischarging. Energi yang telah diatur kemudian disimpan dalam baterai sebagai cadangan daya yang dapat digunakan saat tidak terdapat sinar matahari, seperti pada malam hari atau kondisi cuaca mendung. Pada saat energi dibutuhkan oleh beban, listrik dari baterai akan digunakan secara langsung dalam bentuk DC atau dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter agar sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik. Dengan demikian, sistem PLTS *off-grid* mampu menyediakan energi listrik secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik konvensional, sehingga sangat sesuai untuk daerah terpencil atau wilayah yang belum terjangkau listrik. (Umar, 2023)

2.2.2 Alur Energi PLTS *off-grid*

Alur energi pada sistem PLTS *off-grid* dimulai dari radiasi matahari yang diterima oleh panel surya dan dikonversi menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (DC) melalui proses fotovoltaiik. Energi listrik tersebut kemudian dialirkan menuju solar charge controller (SCC) yang berfungsi untuk mengatur dan menstabilkan tegangan serta arus sebelum disimpan ke dalam baterai. Baterai berperan sebagai media penyimpanan energi yang akan menyuplai listrik ketika tidak tersedia sinar matahari. Selanjutnya, energi listrik yang tersimpan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan

beban, baik secara langsung dalam bentuk DC maupun setelah dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter. Alur ini menunjukkan bahwa energi mengalir secara bertahap dari sumber utama yaitu matahari, kemudian diproses dan disimpan hingga akhirnya digunakan oleh beban, sehingga sistem PLTS *off-grid* mampu bekerja secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.(R.Pido B.H. Rahmad, 2023)

2.2.3 Keunggulan dan Keterbatasan PLTS *off-grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya alternatif yang efektif dalam penyediaan energi listrik, khususnya di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional. Salah satu kelebihan utama sistem ini adalah kemampuannya beroperasi secara independen tanpa bergantung pada jaringan PLN. Selain itu, PLTS *off-grid* memanfaatkan sumber energi terbarukan berupa sinar matahari yang tersedia secara melimpah dan tidak berbayar, serta memiliki biaya operasional yang relatif rendah setelah instalasi. Dari sisi lingkungan, sistem ini juga tergolong ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi, serta berkontribusi dalam meningkatkan akses energi dan kesejahteraan masyarakat di daerah terpencil. (Putri, 2023)

Namun demikian, sistem PLTS *off-grid* juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu menjadi perhatian dalam implementasinya. Biaya investasi awal yang cukup besar, terutama pada komponen panel surya dan baterai, menjadi salah satu tantangan utama. Selain itu, kinerja sistem sangat

dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan tingkat intensitas radiasi matahari, sehingga menyebabkan output energi bersifat tidak stabil. Keterbatasan kapasitas penyimpanan pada baterai juga dapat mempengaruhi kontinuitas suplai listrik, terutama saat tidak ada sinar matahari. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan dan perancangan sistem yang matang agar keseimbangan antara kebutuhan energi dan kapasitas sistem dapat tercapai secara optimal.

2.2.4 kesesuaian PLTS *off-grid* Untuk Daerah Pertanian

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* merupakan salah satu solusi yang tepat untuk diterapkan pada sektor pertanian, khususnya di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional. Sistem ini mampu menyediakan pasokan energi listrik secara mandiri untuk mendukung berbagai kegiatan pertanian seperti sistem irigasi, pencahayaan, serta pengoperasian peralatan pertanian. Pemanfaatan PLTS *off-grid* terbukti dapat meningkatkan efisiensi kerja dan produktivitas karena mampu menyediakan energi secara berkelanjutan sesuai kebutuhan lapangan.

Selain itu, penggunaan PLTS *off-grid* dalam sektor pertanian sejalan dengan konsep pertanian berkelanjutan karena memanfaatkan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Pemanfaatan energi matahari dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta menekan biaya operasional dalam jangka panjang, terutama pada sistem irigasi dan rumah kaca (greenhouse). Implementasi teknologi ini juga berkontribusi dalam

meningkatkan pemahaman teknologi di kalangan petani serta mendorong penerapan sistem pertanian modern.(Sihombing et al., 2026)

Kesesuaian penerapan PLTS *off-grid* di daerah pertanian juga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti potensi radiasi matahari, kondisi geografis, serta kebutuhan energi dari aktivitas pertanian yang dilakukan. Oleh karena itu, perencanaan sistem yang matang, termasuk penentuan kapasitas panel surya, baterai, dan inverter, sangat diperlukan agar sistem dapat bekerja secara optimal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem ini dapat dirancang sesuai kebutuhan beban, seperti untuk pompa air irigasi, sehingga layak diterapkan baik dari sisi teknis maupun ekonomi.

Dengan demikian, penerapan PLTS *off-grid* pada sektor pertanian memiliki potensi yang besar sebagai solusi penyediaan energi yang mandiri, efisien, dan berkelanjutan. Selain mendukung kegiatan operasional pertanian, sistem ini juga berperan dalam meningkatkan kemandirian energi, efisiensi biaya, serta menjaga kelestarian lingkungan di wilayah pedesaan. (Arifin et al., 2023)

2.3 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan teknik yang digunakan dalam sistem fotovoltaik untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya agar selalu berada pada kondisi daya maksimum. Pada sistem PLTS, daya yang dihasilkan panel sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari dan suhu lingkungan, sehingga titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP) bersifat dinamis. Oleh karena itu, MPPT berperan penting

dalam menyesuaikan titik operasi panel secara terus-menerus agar energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal.

Secara umum, MPPT bekerja dengan cara memantau nilai tegangan dan arus keluaran dari panel surya, kemudian menghitung daya yang dihasilkan untuk menentukan posisi titik daya maksimum. Setelah titik tersebut teridentifikasi, sistem akan mengatur kondisi operasi melalui konverter DC-DC sehingga panel tetap bekerja pada titik optimal. Proses ini berlangsung secara berkelanjutan, sehingga sistem mampu merespons perubahan kondisi lingkungan seperti variasi intensitas cahaya dan temperatur. (Ali et al., 2025)

2.3.1 Cara Kerja *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Cara kerja *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada sistem fotovoltaik didasarkan pada kemampuan sistem dalam melacak dan mempertahankan titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP) secara dinamis. Proses ini dilakukan dengan memantau nilai tegangan dan arus keluaran panel surya, kemudian menghitung daya yang dihasilkan untuk menentukan posisi titik optimum. Karena karakteristik panel surya dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari dan suhu, maka MPPT secara kontinu menyesuaikan kondisi operasi agar panel tetap menghasilkan daya maksimum.

Dalam penerapannya, MPPT biasanya diimplementasikan menggunakan konverter DC-DC yang berfungsi untuk menyesuaikan nilai tegangan dan arus dari panel surya agar sesuai dengan kebutuhan beban atau baterai. Pengaturan ini dilakukan melalui pengendalian duty cycle pada

konverter yang dikontrol oleh algoritma MPPT. Dengan mekanisme tersebut, sistem mampu mengekstraksi daya maksimum dari panel surya dan menyalurkannya secara efisien ke sistem penyimpanan maupun beban.

Proses pelacakan titik daya maksimum dilakukan secara berulang menggunakan metode tertentu, seperti Perturb and Observe (P&O) atau Incremental Conductance. Metode ini bekerja dengan memberikan perubahan kecil pada tegangan atau arus, kemudian mengamati perubahan daya yang dihasilkan. Jika terjadi peningkatan daya, maka perubahan dilanjutkan ke arah yang sama, sedangkan jika daya menurun, arah perubahan akan dibalik. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk terus mendekati dan mempertahankan kondisi daya maksimum secara real-time.

Selain itu, MPPT juga umumnya terintegrasi dalam solar charge controller untuk mengoptimalkan proses pengisian baterai. Sistem ini tidak hanya menjaga agar panel bekerja pada titik optimal, tetapi juga mengatur aliran energi sehingga baterai dapat diisi secara efisien dan aman. Dengan demikian, penggunaan MPPT tidak hanya meningkatkan efisiensi konversi energi, tetapi juga berkontribusi dalam memperpanjang umur komponen sistem PLTS.

Secara umum, cara kerja MPPT melibatkan proses pengukuran parameter listrik, analisis titik daya maksimum, serta pengendalian konverter untuk menjaga kondisi operasi yang optimal. Dengan mekanisme ini, sistem PLTS mampu menghasilkan energi listrik secara maksimal meskipun terjadi perubahan kondisi lingkungan, sehingga MPPT menjadi

elemen penting dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem fotovoltaik. (Sikumbang et al., 2024)

2.3.2 Peran MPPT Dalam Meningkatkan Efisiensi PLTS *off-grid*

Maximum Power Point Tracking (MPPT) memiliki peranan penting dalam meningkatkan efisiensi sistem PLTS *off-grid*, terutama dalam mengoptimalkan daya keluaran panel surya. Pada sistem tanpa MPPT, energi yang dihasilkan sering kali tidak berada pada kondisi maksimum karena titik operasi panel tidak menyesuaikan perubahan lingkungan. Dengan penerapan MPPT, sistem mampu mengatur titik kerja panel secara dinamis sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih optimal sesuai dengan kondisi radiasi matahari dan suhu yang berubah-ubah.

Dalam sistem PLTS *off-grid*, MPPT juga berperan dalam meningkatkan efisiensi proses pengisian baterai melalui pengaturan arus dan tegangan yang optimal. Solar charge controller berbasis MPPT mampu mengontrol aliran energi dari panel ke baterai secara adaptif, sehingga proses pengisian menjadi lebih stabil dan efisien. Hal ini sangat penting mengingat sistem *off-grid* sangat bergantung pada baterai sebagai media penyimpanan energi utama.

Penerapan MPPT juga terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan dibandingkan dengan metode konvensional. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan algoritma MPPT seperti

Perturb and Observe (P&O) dapat meningkatkan efisiensi daya hingga lebih dari 80%, bahkan mendekati 90% pada metode yang telah dikembangkan lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa MPPT efektif dalam mengoptimalkan kinerja sistem PLTS *off-grid* pada berbagai kondisi operasi.

Selain meningkatkan efisiensi energi, MPPT juga berkontribusi dalam menjaga keandalan dan umur pakai komponen sistem PLTS. Dengan memastikan panel surya dan baterai beroperasi pada kondisi optimal, MPPT dapat mengurangi kerugian energi serta mencegah beban berlebih pada sistem. Hal ini memberikan dampak positif terhadap stabilitas sistem, terutama pada aplikasi *off-grid* yang memerlukan suplai energi secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, MPPT merupakan teknologi penting dalam sistem PLTS *off-grid* yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi, mengoptimalkan proses penyimpanan energi, serta menjaga kestabilan sistem dalam menghadapi perubahan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan MPPT menjadi faktor utama dalam perancangan sistem PLTS *off-grid* yang efisien dan andal. (Yorlanda et al., 2025)

2.4 Penentuan MPPT

Penentuan MPPT merupakan proses identifikasi titik daya maksimum (Maximum Power Point / MPP) pada panel surya dengan cara menganalisis hubungan antara tegangan (V), arus (I), dan daya (P). Secara matematis, daya keluaran panel dirumuskan sebagai:

$$P = V \times I$$

Titik daya maksimum terjadi ketika turunan daya terhadap tegangan sama dengan nol, yaitu kondisi:

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Karena $P = V \cdot I$, maka:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0$$

Dari persamaan tersebut diperoleh kondisi utama MPP:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Persamaan ini menjadi dasar dalam analisis penentuan MPPT, khususnya pada metode Incremental Conductance (IC), dimana sistem membandingkan konduktansi instan (I/V) dengan konduktansi inkremental (dI/dV) untuk menentukan apakah titik operasi sudah berada di MPP atau belum.

Penentuan MPPT dilakukan dengan memanfaatkan sensor tegangan dan arus yang terpasang pada panel surya. Data yang diperoleh kemudian diproses oleh kontroler untuk menghitung daya secara real-time. Sistem akan terus melakukan penyesuaian terhadap titik kerja dengan mengubah duty cycle pada DC-DC converter hingga tercapai kondisi daya maksimum. Proses ini bersifat iteratif dan berlangsung secara kontinu karena kondisi lingkungan seperti irradiansi dan suhu selalu berubah (Esrarn & Chapman, 2021; Kumar et al., 2022)

2.5 Evaluasi Kinerja MPPT

2.5.1 Daya Maximum (Pmax)

Daya maksimum pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan kondisi dimana panel surya menghasilkan daya listrik tertinggi berdasarkan kombinasi tegangan dan arus tertentu. Titik ini dikenal sebagai Maximum Power Point (MPP), yaitu titik operasi optimal pada kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) panel surya. Pada titik ini, hasil perkalian antara tegangan dan arus mencapai nilai tertinggi dibandingkan titik operasi lainnya. Secara matematis, daya listrik yang dihasilkan dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian antara tegangan dan arus keluaran panel surya.

$$P = V \times I$$

Cara menghitung daya maksimum adalah menggunakan data dari pabrik:

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$$

Keterangan:

V_{mp} = tegangan saat MPP (Volt)

I_{mp} = arus saat MPP (Ampere)

2.5.2 Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem merupakan salah satu indikator utama dalam mengevaluasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Efisiensi ini menunjukkan kemampuan sistem dalam mengkonversi energi radiasi

matahari menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Dalam evaluasi kinerja PLTS, efisiensi tidak hanya dilihat dari panel surya, tetapi juga mencakup keseluruhan sistem seperti inverter, kabel, dan komponen pendukung lainnya. Oleh karena itu, analisis efisiensi sistem menjadi penting untuk mengetahui tingkat performa aktual dibandingkan dengan kondisi ideal atau desain awal sistem. (Rosyadi et al., 2024)

Secara umum, efisiensi sistem PLTS dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukan dari radiasi matahari, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Dimana:

η = efisiensi sistem (%)

P_{out} = daya keluaran sistem (Watt)

P_{in} = daya masukan dari radiasi matahari (Watt)

Selain itu, dalam evaluasi kinerja PLTS sering digunakan parameter Performance Ratio (PR) sebagai indikator efisiensi keseluruhan sistem. PR merupakan rasio antara energi listrik yang dihasilkan terhadap energi teoritis yang dapat dihasilkan berdasarkan kondisi radiasi matahari. Nilai PR biasanya berada pada rentang 70%–90% untuk sistem yang bekerja dengan baik, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam menilai kualitas instalasi dan operasional PLTS. (Surya et al., 2024)

2.5.3 Tegangan Kerja

Tegangan kerja pada panel surya merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan performa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Tegangan ini dikenal sebagai tegangan pada titik daya maksimum (V_{mp}), yaitu tegangan saat panel menghasilkan daya tertinggi. Nilai V_{mp} diperoleh dari karakteristik panel surya yang menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan (kurva I–V), dimana titik optimum terjadi ketika hasil perkalian tegangan dan arus mencapai nilai maksimum. Nilai tegangan ini menjadi acuan utama dalam pengoperasian sistem, khususnya pada penggunaan MPPT untuk menjaga sistem tetap bekerja pada titik optimal. (Nayusrizal, Tony Koerniawan, 2025)

Tegangan kerja adalah tegangan saat panel surya beroperasi secara optimal, biasanya berada di sekitar:

$$V_{kerja} \approx V_{mp}$$

Artinya, tegangan kerja hampir sama dengan tegangan pada titik MPP (Maximum Power Point).

2.5.4 Arus kerja

Arus kerja pada panel surya merupakan parameter penting dalam menentukan besarnya daya listrik yang dihasilkan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Arus ini dikenal sebagai arus pada titik daya maksimum (I_{mp}), yaitu arus yang mengalir ketika panel beroperasi pada kondisi Maximum Power Point (MPP). Nilai I_{mp} diperoleh dari

karakteristik kurva arus-tegangan (I–V), dimana pada titik tersebut kombinasi arus dan tegangan menghasilkan daya maksimum. Oleh karena itu, arus kerja menjadi salah satu indikator utama dalam analisis performa sistem PLTS (Hossain et al., 2022).

Arus kerja adalah arus yang mengalir saat panel surya beroperasi pada kondisi optimal (MPP).

$$I_{kerja} \approx I_{mp}$$

Dimana:

I_{mp} = arus pada titik daya maksimum

I_{kerja} = arus operasi optimal

2.6 Sistem Pertanian *Zero Farming*

Sistem pertanian *zero farming* merupakan pendekatan pertanian berkelanjutan yang menekankan pada minimnya penggunaan input eksternal serta optimalisasi sumber daya lokal. Salah satu bentuk yang berkembang adalah *Zero Budget Natural Farming* (ZBNF), yaitu metode budidaya yang berupaya menghilangkan ketergantungan terhadap pupuk kimia dan pestisida sintetis dengan memanfaatkan bahan alami yang tersedia di lingkungan sekitar. Konsep ini bertujuan untuk menekan biaya produksi hingga mendekati nol sekaligus meningkatkan kesehatan tanah dan keberlanjutan ekosistem pertanian. Pendekatan ini juga dinilai mampu membantu petani keluar dari

permasalahan biaya produksi yang tinggi dan ketergantungan terhadap input eksternal. (Mondal & Paul, 2023)

Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam sistem pertanian *zero farming* merupakan salah satu bentuk integrasi teknologi energi terbarukan dengan konsep pertanian berkelanjutan. *Zero farming* menekankan kemandirian dan efisiensi penggunaan sumber daya, sehingga pemanfaatan energi surya menjadi solusi yang tepat untuk menggantikan ketergantungan terhadap energi fosil. Dalam konteks ini, PLTS digunakan sebagai sumber energi utama untuk mendukung berbagai aktivitas pertanian seperti sistem irigasi, pompa air, serta operasional peralatan pertanian lainnya. Dengan demikian, penggunaan PLTS tidak hanya menurunkan biaya operasional, tetapi juga mendukung prinsip *zero farming* yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Secara konsep, integrasi antara PLTS dan pertanian *zero farming* sering diwujudkan dalam bentuk sistem *agrivoltaics*, yaitu pemanfaatan lahan secara simultan untuk produksi energi listrik dan kegiatan budidaya tanaman. Dalam sistem ini, panel surya dipasang sedemikian rupa sehingga tetap memungkinkan aktivitas pertanian berlangsung secara optimal. Bahkan, dalam beberapa kondisi, keberadaan panel surya dapat membantu mengurangi penguapan air serta melindungi tanaman dari paparan radiasi matahari yang berlebihan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *zero farming* yang menekankan optimalisasi sumber daya tanpa meningkatkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Selain itu, penggunaan PLTS dalam sistem *zero farming* juga mendukung konsep pertanian dengan emisi rendah (*low carbon agriculture*). Dengan menggantikan penggunaan bahan bakar fosil, emisi gas rumah kaca dapat ditekan sehingga sistem pertanian menjadi lebih berkelanjutan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penerapan energi surya di sektor pertanian tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan secara signifikan.

Dalam implementasinya, sistem PLTS pada pertanian *zero farming* umumnya dirancang dalam bentuk *off-grid* maupun *hybrid system*, khususnya pada wilayah yang belum memiliki akses jaringan listrik. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan baterai sebagai media penyimpanan energi, sehingga suplai listrik tetap tersedia pada malam hari atau saat intensitas matahari rendah. Evaluasi terhadap kinerja sistem menunjukkan bahwa penggunaan PLTS mampu meningkatkan keandalan pasokan energi sekaligus menjaga efisiensi operasional pada kegiatan pertanian, terutama pada sistem irigasi berbasis tenaga surya.(Al-yafeai et al., 2020)

2.7 Penelitian Terkait

Tabel 2. 1 Peneliti terkait terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Boubaker (2023)	MPPT Techniques for Photovoltaic Systems	MPPT mampu mengoptimalkan daya pada berbagai kondisi iradiasi dan suhu
2	Kebbab et al. (2022)	Comparative Analysis of MPPT Techniques	Algoritma Beta memiliki tracking lebih cepat dan efisien dibanding metode lain
3	Sarang et al. (2024)	Analisis MPPT pada PV	MPPT meningkatkan output daya dengan menjaga titik daya maksimum pada kurva I-V
4	Paluga et al. (2024)	MPPT Inverter Optimization	Integrasi MPPT meningkatkan efisiensi dan stabilitas suplai energi
5	Guanghua et al. (2025)	MPPT Strategies for Solar PV Systems	MPPT meningkatkan performa sistem PV dalam kondisi dinamis

6	Ali et al. (2025)	Comprehensive Study of MPPT Methods	Pemilihan metode MPPT terbaik bergantung pada efisiensi dan biaya
7	Chandola et al. (2026)	Recent Advances in MPPT Techniques	MPPT berbasis AI meningkatkan efisiensi dan adaptasi sistem PV
8	Gunes et al. (2026)	Off-Grid Solar System Application	MPPT berperan penting dalam optimasi energi pada sistem <i>off-grid</i>