

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utama melalui penggunaan panel surya (fotovoltaik). Panel surya bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotolistrik. Energi listrik yang dihasilkan berupa arus searah (DC), yang kemudian dapat digunakan langsung atau diubah menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter sesuai kebutuhan beban (Lestari et al., 2021; Rahmat, 2020)

Dalam sistem PLTS, terdapat beberapa komponen utama yang saling mendukung, yaitu panel surya, solar charge controller, baterai, dan inverter. Panel surya berfungsi sebagai penghasil energi listrik, sedangkan solar charge controller berperan mengatur arus dan tegangan dari panel menuju baterai agar tidak terjadi overcharge maupun overdischarge. Baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik sehingga dapat digunakan saat malam hari atau ketika intensitas matahari rendah. Inverter berfungsi mengubah arus DC menjadi AC agar dapat digunakan oleh peralatan listrik konvensional. (Lestari et al., 2022)

2.2 Tipe PLTS

2.2.1 PLTS On-grid

PLTS on-grid adalah sistem yang terhubung langsung dengan jaringan listrik umum (PLN). Pada sistem ini, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban, dan kelebihan energi dapat disalurkan ke jaringan listrik. Sistem ini umumnya tidak menggunakan baterai karena jaringan PLN berfungsi sebagai penyimpan energi cadangan.

Keunggulan PLTS on-grid adalah biaya investasi yang lebih rendah karena tidak memerlukan baterai, serta efisiensi yang tinggi dalam pemanfaatan energi. Namun, kelemahannya adalah sistem ini tidak dapat beroperasi saat terjadi pemadaman listrik, karena alasan keamanan (anti-islanding). Oleh karena itu, sistem ini lebih cocok digunakan di daerah yang memiliki jaringan listrik stabil. (Nurjaman & Purnama, 2022).

2.2.2 PLTS Off-Grid

PLTS off-grid merupakan sistem yang berdiri sendiri tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN. Semua kebutuhan energi dipenuhi dari panel surya dan disimpan dalam baterai. Sistem ini biasanya digunakan di daerah terpencil atau lokasi yang tidak terjangkau listrik, termasuk pada aplikasi pertanian seperti zero farming.

Keunggulan utama PLTS off-grid adalah kemandirian energi, sehingga tidak bergantung pada jaringan listrik. Sistem ini sangat cocok untuk pengoperasian pompa air, irigasi, dan sistem otomatisasi pertanian.

Namun, kekurangannya adalah biaya awal yang cukup tinggi karena membutuhkan baterai dan sistem penyimpanan energi yang memadai. (Arbiyani et al., 2026).

2.2.3 PLTS Hybrid

PLTS hybrid merupakan gabungan antara sistem on-grid dan off-grid. Sistem ini dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN sekaligus menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi. Selain itu, sistem hybrid juga dapat dikombinasikan dengan sumber energi lain seperti genset

Keunggulan PLTS hybrid adalah fleksibilitas dan keandalan yang tinggi, karena sistem tetap dapat beroperasi saat terjadi pemadaman listrik. Energi dapat diambil dari berbagai sumber sesuai kondisi, sehingga suplai listrik lebih stabil. Namun, sistem ini memiliki biaya investasi dan kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan tipe lainnya. (Arrais & Suwoyo, 2024).

2.3 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.3.1 Panel Surya (Solar Cell / Photovoltaic)

Panel surya atau fotovoltaik merupakan teknologi yang mampu mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Panel surya terdiri dari beberapa sel surya yang bekerja dengan menyerap radiasi matahari dan menghasilkan arus listrik searah (DC). Perkembangan teknologi panel surya menjadi faktor utama dalam mendukung pemanfaatan energi terbarukan, khususnya dalam sistem PLTS yang

semakin banyak diterapkan di berbagai sektor, termasuk rumah tangga dan industri (Lestari et al., 2021)

Pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi alternatif dinilai sangat potensial terutama untuk daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik. Panel surya mampu menyediakan energi listrik secara mandiri dengan memanfaatkan sumber energi yang melimpah dan ramah lingkungan. Dalam penelitian eksperimental, parameter seperti tegangan, arus, dan intensitas radiasi matahari digunakan untuk mengevaluasi kinerja panel surya dalam menghasilkan energi listrik (Sari et al., 2025)

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama intensitas cahaya matahari dan suhu. Pada daerah tropis seperti Indonesia, fluktuasi cuaca dan suhu yang tinggi dapat menyebabkan perubahan signifikan terhadap output daya panel surya. Oleh karena itu, diperlukan teknologi seperti Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan panel agar tetap berada pada titik daya maksimum (Sampe et al., 2024)

Selain faktor radiasi dan suhu, perubahan iklim juga memberikan dampak terhadap efisiensi panel surya. Variasi cuaca seperti peningkatan suhu dan perubahan pola radiasi matahari dapat menurunkan performa panel dalam jangka panjang. Oleh karena itu, analisis terhadap kondisi lingkungan menjadi penting dalam perancangan dan evaluasi sistem panel surya agar dapat bekerja secara optimal (Nurhasanah et al., 2023)

Dalam pengaplikasiannya, panel surya sering digunakan dalam sistem PLTS baik on-grid maupun off-grid. Studi menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu menghasilkan energi listrik secara optimal jika didukung oleh kondisi radiasi matahari yang baik. Namun, faktor cuaca seperti musim hujan dapat menurunkan produksi energi hingga 40–50%, sehingga perlu dilakukan analisis performa secara berkala untuk memastikan efisiensi sistem tetap terjaga (Sikken et al., 2023)

Berdasarkan jenis material silikonnya, panel surya dibedakan menjadi dua jenis yang paling umum digunakan, yaitu monocrystalline (mono) dan polycrystalline (poli). Kedua jenis panel tersebut memiliki karakteristik, tingkat efisiensi, serta biaya yang berbeda sehingga pemilihannya disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi instalasi.

Panel surya monocrystalline merupakan panel yang dibuat dari satu kristal silikon murni (single-crystal silicon). Struktur kristal yang seragam memungkinkan elektron bergerak lebih efisien sehingga menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan panel polycrystalline. Panel ini umumnya memiliki warna hitam dengan bentuk sel yang sudutnya membulat. Efisiensi panel monocrystalline berkisar antara 18% hingga 23%, sehingga mampu menghasilkan daya yang lebih besar meskipun dipasang pada lahan yang relatif sempit. Selain itu, panel jenis ini memiliki umur pakai yang panjang dan mampu mempertahankan kinerja yang baik pada kondisi intensitas cahaya yang rendah. Namun, proses pembuatannya yang lebih kompleks menyebabkan harga panel

monocrystalline relatif lebih mahal dibandingkan jenis polycrystalline (Maulana et al., 2024).

Sementara itu, panel surya polycrystalline dibuat dari beberapa kristal silikon yang dilebur dan dicetak menjadi satu. Struktur kristal yang tidak seragam menyebabkan pergerakan elektron menjadi kurang optimal sehingga efisiensinya lebih rendah dibandingkan panel monocrystalline. Panel ini umumnya berwarna biru dengan pola kristal yang terlihat pada permukaannya. Efisiensi panel polycrystalline berada pada kisaran 15% hingga 18%, sehingga memerlukan luas pemasangan yang lebih besar untuk menghasilkan daya yang sama. Meskipun demikian, biaya produksinya lebih rendah sehingga harga jualnya lebih ekonomis dan banyak digunakan pada sistem PLTS yang memiliki area pemasangan yang cukup luas (Maulana et al., 2024).

Secara umum, panel surya monocrystalline memiliki keunggulan dalam hal efisiensi, kebutuhan luas pemasangan yang lebih kecil, serta performa yang lebih baik dibandingkan panel polycrystalline. Namun, kedua jenis panel sama-sama mengalami penurunan kinerja ketika suhu permukaan panel meningkat. Oleh karena itu, pemilihan jenis panel surya harus mempertimbangkan faktor efisiensi, biaya investasi, kondisi lingkungan, serta kebutuhan daya pada sistem PLTS agar diperoleh kinerja yang optimal (Atikah et al., 2024; Zulkakim, 2025).



Gambar 2. 1 panel surya

2.3.2 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengatur proses pengisian energi dari panel surya ke baterai. SCC berperan dalam menjaga kestabilan tegangan dan arus agar tidak terjadi overcharge maupun overdischarge yang dapat merusak baterai. Selain itu, SCC juga berfungsi untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya yang cenderung berubah-ubah akibat fluktuasi intensitas radiasi matahari (Faizal et al., 2023)

Dalam sistem PLTS, keberadaan SCC sangat penting karena output dari panel surya tidak stabil dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti cuaca, suhu, dan waktu penyinaran. Tanpa SCC, energi yang dihasilkan panel tidak dapat dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi merusak komponen sistem, terutama baterai. Oleh karena itu, SCC menjadi penghubung utama antara panel surya dan sistem penyimpanan energi (Putra et al., 2022)

Secara umum, Solar Charge Controller dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu tipe ON/OFF, Pulse Width Modulation (PWM), dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). SCC tipe PWM bekerja dengan cara mengatur lebar pulsa untuk mengontrol tegangan dan arus yang masuk ke baterai, sedangkan MPPT bekerja dengan mencari titik daya maksimum dari panel surya sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal. MPPT dikenal memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan PWM, terutama pada kondisi intensitas cahaya yang berubah-ubah (Sikumbang, 2024)

Penelitian menunjukkan bahwa SCC tipe MPPT memiliki performa yang lebih baik dibandingkan PWM dalam hal efisiensi dan output daya. Hal ini disebabkan oleh kemampuan MPPT dalam menyesuaikan titik kerja panel surya agar selalu berada pada kondisi daya maksimum. Dalam pengujian, efisiensi SCC tipe MPPT dapat mencapai sekitar 84%, sedangkan PWM berada di bawahnya, sehingga MPPT lebih direkomendasikan untuk sistem PLTS yang membutuhkan efisiensi tinggi (Faizal et al., 2023)



Gambar 2. 2 solar charge controller

Sumber: <https://share.google/MfALm7uLCR3kyAiUQ>

2.3.3 Aki

Aki atau baterai merupakan komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya pada sistem off-grid, yang berfungsi sebagai penyimpan energi listrik dari panel surya untuk digunakan saat tidak ada sinar matahari. Energi listrik yang dihasilkan panel surya pada siang hari akan disimpan dalam baterai dan digunakan pada malam hari atau saat kondisi cuaca mendung. Oleh karena itu, baterai memiliki peran vital dalam menjaga kontinuitas suplai energi pada sistem PLTS (Soedjarwanto et al., 2022)

Dalam sistem PLTS, proses pengisian baterai harus dikontrol dengan baik agar tidak terjadi kerusakan akibat overcharge dan overdischarge. Sistem pengisian baterai umumnya terdiri dari beberapa tahap, yaitu fase bulk, absorption, dan float. Pada fase bulk, baterai diisi dengan arus konstan hingga mencapai sekitar 70% kapasitas, kemudian dilanjutkan dengan fase absorption untuk menyempurnakan pengisian

hingga penuh secara bertahap. Proses ini bertujuan untuk menjaga umur pakai baterai agar lebih lama (Khasan, 2023)

Jenis baterai yang umum digunakan dalam PLTS antara lain baterai timbal-asam (lead-acid) dan baterai lithium. Baterai lead-acid masih banyak digunakan karena harganya relatif murah dan mudah didapat, namun memiliki kelemahan seperti umur pakai yang lebih pendek dan tidak tahan terhadap kondisi deep discharge. Sementara itu, baterai lithium memiliki efisiensi lebih tinggi, umur pakai lebih lama, dan perawatan yang lebih mudah, meskipun biaya awalnya lebih mahal (Ken et al., 2023)

Kinerja baterai sangat berpengaruh terhadap keandalan sistem PLTS. Kapasitas baterai harus dirancang sesuai dengan kebutuhan beban dan lama waktu penggunaan energi. Selain itu, kondisi baterai seperti tegangan, arus, dan tingkat pengosongan (Depth of Discharge/DoD) harus dipantau secara berkala untuk menghindari kerusakan. Penggunaan sistem monitoring berbasis teknologi seperti Internet of Things (IoT) dapat membantu dalam memantau kondisi baterai secara real-time sehingga meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem (Zulkhairi et al., 2025)

Selain itu, baterai juga berperan penting dalam sistem microgrid berbasis energi terbarukan. Integrasi antara panel surya, solar charge controller, dan baterai memungkinkan sistem bekerja secara stabil meskipun terjadi fluktuasi pada sumber energi. Namun, degradasi baterai seiring waktu menjadi salah satu tantangan utama dalam pengembangan

sistem PLTS, sehingga diperlukan analisis dan manajemen energi yang tepat untuk meningkatkan umur pakai baterai (Mulyana et al., 2024)



Gambar 2. 3 aki

Sumber: <https://share.google/FpN5QcvHDfpa8NPPI>

2.3.4 Inverter

Inverter merupakan komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) agar dapat digunakan oleh peralatan listrik. Peran inverter sangat krusial karena menentukan kualitas daya listrik yang dihasilkan, termasuk tegangan, frekuensi, dan harmonisa. Oleh karena itu, inverter harus memenuhi standar tertentu agar sistem PLTS dapat bekerja secara optimal dan aman (Priajana et al., 2020)

Dalam sistem PLTS, inverter juga berfungsi sebagai pengatur sinkronisasi antara energi yang dihasilkan panel surya dengan jaringan listrik, khususnya pada sistem on-grid. Inverter yang digunakan harus memiliki efisiensi tinggi (lebih dari 95%) dan nilai Total Harmonic

Distortion (THD) yang rendah agar tidak mengganggu kualitas jaringan listrik. Penggunaan inverter yang sesuai standar terbukti mampu meningkatkan stabilitas sistem serta efisiensi energi secara keseluruhan (Napitupulu et al., 2025)

Berdasarkan jenisnya, inverter pada PLTS dibedakan menjadi beberapa tipe, seperti central inverter, string inverter, dan micro inverter. Central inverter biasanya digunakan untuk sistem skala besar dengan banyak panel yang terhubung dalam satu sistem, sedangkan micro inverter dipasang pada setiap panel untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem. Pemilihan jenis inverter harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem serta skala instalasi yang digunakan (Asri et al., 2023)

Selain itu, kinerja inverter juga dapat dianalisis melalui parameter seperti efisiensi, daya output, serta kualitas gelombang listrik yang dihasilkan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan inverter yang tepat dapat meningkatkan performa sistem PLTS secara signifikan, terutama dalam hal konversi energi dari DC ke AC. Pengujian inverter dilakukan dengan mengukur tegangan, arus, daya, frekuensi, dan harmonisa untuk memastikan kualitas daya yang dihasilkan tetap stabil (Nurhadi et al., 2023)

Dalam pengembangan sistem PLTS modern, inverter juga dikombinasikan dengan teknologi lain seperti boost converter dan sistem kontrol berbasis perangkat lunak untuk meningkatkan efisiensi sistem. Simulasi menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink

menunjukkan bahwa integrasi inverter dengan sistem kontrol dapat menghasilkan suplai listrik yang stabil sesuai kebutuhan beban rumah tangga maupun industri (Silalahi, 2024)

Selain itu, pemilihan jenis inverter juga berpengaruh terhadap kualitas daya yang dihasilkan. Penelitian menunjukkan bahwa inverter dengan frekuensi tinggi memiliki karakteristik tertentu yang dapat mempengaruhi efisiensi sistem, terutama pada beban induktif. Oleh karena itu, pemilihan inverter harus mempertimbangkan jenis beban serta kondisisistem agar performa PLTS tetap optimal (Aulia et al., 2024)



Gambar 2. 4 inverter

Sumber: <https://share.google/mguQDZDasSPV2t6tr>

2.4 Langkah -Langkah Penentuan Panel Surya

2.4.1 Analisis Beban Sistem

Tahap pertama adalah mengidentifikasi beban listrik yang akan digunakan dalam sistem PLTS. Analisis beban bertujuan untuk mengetahui

kebutuhan daya sistem sehingga kapasitas panel surya dapat ditentukan secara tepat.

Rumus total daya beban:

$$P_{total} = \sum P_{beban}$$

keterangan :

P total = total daya beban

Σ (Sigma) = jumlah semua beban

P beban = Daya beban

Rumus ini digunakan untuk mengetahui jumlah total daya listrik yang dibutuhkan oleh seluruh beban dalam sistem. Dalam perancangan sistem tenaga listrik, langkah pertama yang harus dilakukan adalah mengidentifikasi dan menjumlahkan seluruh daya peralatan yang akan digunakan. Hal ini penting karena kapasitas sistem pembangkit, termasuk panel surya, harus mampu menyuplai daya yang dibutuhkan oleh beban. Tanpa mengetahui total daya beban, perancangan sistem dapat menjadi tidak tepat sehingga sistem berpotensi mengalami kekurangan daya saat beroperasi.

2.4.2 Menentukan Energi yang Dibutuhkan

Setelah diketahui daya beban, langkah berikutnya adalah menghitung energi listrik yang dibutuhkan untuk mengoperasikan pompa selama proses pengisian tandon.

Untuk mengetahui lama waktu pengisian tandon digunakan rumus debit air:

$$t = \frac{V}{Q}$$

Dimana:

t= waktu pengisian (menit)

V= volume tandon (L)

Q= debit pompa (L/menit)

Rumus debit air digunakan untuk mengetahui hubungan antara volume air, waktu, dan kapasitas aliran pompa. Dalam sistem pompa air, debit menunjukkan seberapa banyak air yang dapat dipindahkan oleh pompa dalam satu satuan waktu. Dengan menggunakan rumus ini dapat diketahui waktu yang diperlukan pompa untuk mengisi tandon air dengan volume tertentu. Informasi ini penting karena lama waktu operasi pompa akan menentukan jumlah energi listrik yang dikonsumsi oleh pompa selama proses pengisian air.

2.4.3 Memperhitungkan Lama Penyinaran Matahari

Panel surya menghasilkan energi listrik hanya saat menerima radiasi matahari. Oleh karena itu dalam perancangan sistem PLTS perlu

mempertimbangkan lama penyinaran matahari efektif atau Peak Sun Hour (PSH).

Di Indonesia nilai rata-rata PSH sekitar 4 jam per hari. Nilai ini digunakan untuk memperkirakan energi listrik yang dapat dihasilkan oleh panel surya dalam satu hari.

2.4.4 Menghitung Kebutuhan Daya Panel Surya

Sebelum menentukan kapasitas panel, terlebih dahulu dihitung energi yang harus dihasilkan panel dengan memperhitungkan efisiensi sistem.

Rumus energi sistem:

$$E_{total} = \frac{E}{\eta}$$

Keterangan :

E_{total} = energi yang di hasilkan panel

E = Energi yang di gunakan beban

η = efisien keseluruhan rangka

Rumus ini digunakan untuk menghitung jumlah energi listrik yang digunakan oleh suatu beban dalam periode waktu tertentu. Energi listrik merupakan hasil perkalian antara daya listrik dan lama waktu penggunaan. Dalam sistem PLTS, parameter energi sangat penting karena panel surya menghasilkan energi listrik secara bertahap selama waktu penyinaran matahari. Dengan mengetahui energi yang dibutuhkan oleh pompa, maka

dapat ditentukan berapa energi yang harus dihasilkan oleh panel surya setiap hari agar sistem dapat beroperasi dengan baik.

Selanjutnya kapasitas panel dihitung dengan rumus:

$$P_{panel} = \frac{E_{total}}{PSH}$$

keterangan :

P_{panel} = total daya panel

E_{total} = energi yang harus di hasilkan panel

PSH = lama penyinaran sinar matahari

Rumus ini digunakan untuk menentukan kapasitas daya panel surya yang diperlukan untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan sistem. Panel surya hanya dapat menghasilkan energi listrik ketika menerima radiasi matahari, sehingga produksi energinya bergantung pada lama penyinaran matahari efektif yang disebut Peak Sun Hour (PSH). Dengan membagi total kebutuhan energi harian dengan nilai PSH, dapat diketahui berapa kapasitas panel yang harus dipasang agar mampu menghasilkan energi yang cukup dalam satu hari. Rumus ini menjadi dasar dalam perancangan sistem PLTS karena menghubungkan antara kebutuhan energi beban dengan potensi energi matahari yang tersedia di lokasi pemasangan.

2.5 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Lestari et al. (2021)	Analisis Kinerja Panel Surya pada Sistem PLTS Off-Grid	Panel surya mampu menghasilkan daya optimal pada intensitas tinggi, namun efisiensi enurun saat suhu meningkat.
2	Sari et al. (2022)	Evaluasi Sistem PLTS pada Daerah Pertanian	Evaluasi Sistem PLTS pada Daerah Pertanian
3	Pratama et al. (2023)	Pengaruh Intensitas Matahari terhadap Daya Panel Surya	Daya output meningkat seiring peningkatan intensitas radiasi matahari.
4	Nugroho et al. (2020)	Analisis PLTS Off-Grid untuk Pompa Air	Daya output meningkat seiring peningkatan intensitas radiasi
5	Hidayat et al. (2024)	Evaluasi Efisiensi Panel Surya pada Sistem Off-Grid	Efisiensi panel dipengaruhi oleh suhu dan sudut kemiringan panel.
6	Ramadhan et al. (2023)	Analisis Energi Harian PLTS pada Lahan Pertanian Analisis Energi Harian PLTS pada Lahan Pertanian	Energi harian cukup untuk kebutuhan irigasi sederhana dengan kapasitas panel yang sesuai.
7	Putra et al. (2022)	Studi Kinerja PLTS Off-Grid Berbasis Baterai	Sistem baterai mampu menyimpan energi untuk penggunaan malam hari, namun terjadi rugi-rugi energi.
8	Saputra et al. (2021)	Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya	Sudut optimal meningkatkan daya hingga 10–20% dibanding posisi datar.
9	Wijaya et al. (2023)	Evaluasi Sistem PLTS untuk Irigasi Pertanian	PLTS mampu menjadi solusi energi mandiri untuk sistem irigasi di daerah terpencil.

10	Kurniawan et al. (2022)	Analisis Performa Panel Surya terhadap Cuaca	Kondisi mendung menurunkan daya hingga 40–60% dibanding kondisi cerah
----	----------------------------	--	--