

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad et al. (2025) membahas perancangan dan implementasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* berkapasitas 200 Wp untuk memenuhi kebutuhan beban penerangan dan *submersible pump*. Penelitian ini menganalisis kinerja sistem dengan mengukur parameter tegangan, arus, dan daya, serta membandingkan hasil aktual dengan estimasi dari *Global Solar Atlas*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya rata-rata aktual yang dihasilkan sebesar 334,77 W, lebih rendah sekitar 36,11% dibandingkan estimasi sebesar 524 W. Perbedaan ini dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas radiasi matahari, kondisi cuaca, serta sudut kemiringan panel surya. Selain itu, penggunaan beban yang melebihi kapasitas sistem dapat menyebabkan penurunan kinerja dan berpotensi merusak komponen. Namun, penelitian tersebut belum membahas secara spesifik pengaruh variasi daya beban terhadap efisiensi panel surya.

Penelitian kedua oleh Kurnia et al. (2024) menganalisis kinerja sistem PLTS dengan meninjau hubungan antara daya yang dihasilkan dan beban yang digunakan. Hasilnya menunjukkan adanya perbedaan antara daya teoritis dan daya aktual di lapangan akibat faktor lingkungan serta karakteristik beban. Penggunaan beban yang tidak sesuai kapasitas juga terbukti menurunkan performa sistem PLTS. Sementara itu, Firmansyah et al. (2025) meneliti implementasi sistem PLTS dengan fokus pada parameter tegangan, arus, dan daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa performa panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional dan karakteristik beban, sehingga diperlukan penyesuaian antara sumber energi dan beban agar sistem bekerja optimal.

Selain itu, beberapa penelitian terbaru juga mengkaji faktor-

faktor lain yang mempengaruhi kinerja panel surya. Wulansari et al. (2021) menunjukkan bahwa sudut kemiringan panel dan intensitas radiasi matahari berpengaruh signifikan terhadap tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan. Penelitian lain oleh Hossain et al. (2022) mengungkapkan bahwa variasi kondisi lingkungan, khususnya suhu dan iradiasi, memiliki dampak langsung terhadap efisiensi konversi energi panel surya. Selanjutnya, penelitian oleh Kumar et al. (2023) menyoroti bahwa ketidaksesuaian antara beban dan kapasitas sistem dapat menyebabkan *mismatch losses* yang menurunkan efisiensi keseluruhan sistem PLTS. Studi oleh Rahman et al. (2021) juga menunjukkan bahwa fluktuasi beban listrik mempengaruhi stabilitas output daya panel surya, terutama pada sistem off-grid. Selain itu, Zhang et al. (2024) menemukan bahwa karakteristik beban DC memiliki pengaruh signifikan terhadap performa sistem *fotoVoltaik*, terutama dalam hal efisiensi energi dan kestabilan tegangan output.

Penelitian lain juga menyoroti pentingnya hubungan antara karakteristik beban dan performa sistem *fotoVoltaik*. Gupta et al. (2022) menyatakan bahwa variasi beban pada sistem PLTS dapat menyebabkan perubahan titik kerja (*operating point*) panel surya yang berdampak langsung pada efisiensi konversi energi. Penelitian oleh Ali et al. (2023) menunjukkan bahwa sistem PLTS dengan beban dinamis cenderung mengalami fluktuasi daya output yang lebih signifikan dibandingkan dengan beban konstan, sehingga diperlukan pengelolaan beban yang optimal. studi oleh Prasetyo et al. (2021) mengungkapkan bahwa ketidakseimbangan antara suplai energi dari panel surya dan kebutuhan beban dapat menyebabkan penurunan efisiensi sistem secara keseluruhan. Hal ini diperkuat oleh penelitian Singh et al. (2024) yang menemukan bahwa variasi beban DC berpengaruh terhadap stabilitas tegangan dan arus keluaran

panel surya, terutama pada sistem skala kecil dan menengah. Selain itu, penelitian oleh Chen et al. (2022) menunjukkan bahwa efisiensi panel surya tidak hanya dipengaruhi oleh faktor lingkungan, tetapi juga oleh pola konsumsi energi dari beban yang terhubung, sehingga analisis variasi beban menjadi penting dalam optimasi sistem PLTS.

Namun, penelitian tersebut belum membahas secara spesifik mengenai pengaruh variasi daya beban terhadap efisiensi panel surya. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi daya beban bohlam DC terhadap efisiensi panel surya pada sistem PLTS. Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa kinerja panel surya dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi lingkungan, sudut kemiringan, serta karakteristik beban. Namun demikian, penelitian yang secara khusus membahas pengaruh variasi daya beban bohlam DC terhadap efisiensi panel surya masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi daya beban bohlam DC terhadap efisiensi panel surya pada sistem PLTS, khususnya dalam skala laboratorium.

Selanjutnya, penelitian lain yang berkaitan dengan kinerja panel surya juga dilakukan dengan menganalisis pengaruh sudut kemiringan dan intensitas cahaya matahari terhadap efektivitas panel surya (Wulansari et al., 2021). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan panel sangat mempengaruhi tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan, dimana sudut tertentu dapat menghasilkan daya yang lebih optimal dibandingkan sudut lainnya.

Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada pengaruh intensitas cahaya, suhu, dan sudut kemiringan panel surya terhadap performa sistem PLTS. Penelitian yang secara khusus menganalisis pengaruh variasi

daya beban bohlam DC terhadap efisiensi panel surya masih relatif terbatas, khususnya pada sistem PLTS skala laboratorium. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi daya beban bohlam DC terhadap efisiensi panel surya pada sistem PLTS.

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)



Gambar 2. 1 Solar Panel Array

Sumber : Kindel Media. (n.d.). *Solar panel Array* [Photograph]. Pexels. <https://www.pexels.com/photo/photo-of-solar-panel-Array-9799766/>

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (*PhotoVoltaic*) untuk mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk me

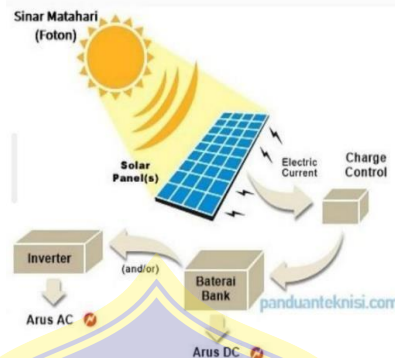
nghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan, oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik. (Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta,

2024)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada dasarnya adalah pencatu daya, dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri maupun hybrid (dikombinasikan dengan sumber energi lain), baik dengan metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun dengan metode sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel).¹ Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan dari sumber energi terbarukan, dimana sinar matahari sebagai sumber energi yang tidak ada habisnya, selain itu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan tanpa ada bagian yang berputar, tidak menimbulkan kebisingan, dan tanpa mengeluarkan gas buangan/limbah. (Berkelanjutan & Karbon, 2024)

2.2 Prinsip Kerja Sel Surya

Mekanisme konversi energi cahaya terjadi akibat adanya perpindahan electron bebas di dalam suatu atom. Sel surya pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghasil elektroda bebas. Material semikonduktor adalah suatu padatan berupa logam, yang konduktifitas elektriknya ditentukan oleh elektron valensinya. Material semikonduktor konduktifitasnya akan meningkat secara signifikan.



Gambar 2. 2 Panduan Sistem Kerja Sel Surya
 Sumber : Panduan Teknisi. (n.d.). *Diagram sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)* [Ilustrasi].
<https://www.panduanteknisi.com>

Ketika fotonya dari sumber cahaya mengenai elektron valensi pada atom semikonduktor, energi yang dibawa oleh foton tersebut dapat melepaskan elektron dari ikatan atomnya. Elektron yang terlepas ini bermuatan negatif dan dapat bergerak bebas di dalam struktur kristal, tepatnya pada pita konduksi material semikonduktor. Akibat pelepasan elektron tersebut, terbentuk kekosongan pada struktur kristal yang disebut sebagai hole, yang bermuatan positif.

Daerah semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron bebas bersifat negatif dan berperan sebagai donor elektron, yang dikenal sebagai tipe-n (n-type). Sebaliknya, daerah yang memiliki banyak hole bersifat positif dan berfungsi sebagai penerima elektron, yang disebut sebagai tipe-p (p-type). Pertemuan antara kedua daerah ini membentuk p-n junction yang menghasilkan medan listrik internal. Medan ini menyebabkan elektron dan hole bergerak ke arah yang berlawanan, dimana elektron menjauhi daerah negatif dan hole menjauhi daerah

positif. Ketika p-n junction tersebut dihubungkan dengan beban, seperti lampu, maka akan terbentuk aliran arus listrik. (Berkelanjutan & Karbon, 2024)

Silikon merupakan material semikonduktor dengan empat elektron valensi yang banyak digunakan dalam pembuatan sel surya. Keunggulan silikon terletak pada nilai resistivitasnya yang tinggi, yaitu mencapai sekitar 300.000 Ωcm , serta ketersediaannya yang melimpah di alam. Namun demikian, salah satu kekurangan silikon adalah biaya produksinya yang relatif tinggi, terutama karena diperlukan tingkat kemurnian yang sangat tinggi, yaitu lebih dari 99,9%, untuk menghasilkan performa sel surya yang optimal. Oleh karena itu, berbagai pengembangan dilakukan untuk mengurangi biaya produksi, salah satunya dengan meminimalkan penggunaan material.

2.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, secara garis besar PLTS diklasifikasi menjadi dua yaitu. Sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*Off-Grid PV plant*), atau lebih dikenal dengan sebutan PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), dan sistem PLTS terhubung dengan jaringan (*grid-connected PV plant*) atau lebih dikenal dengan sebutan PLTS On-grid. Sedangkan apabila PLTS dalam penggunaannya digabung dengan jenis pembangkit listrik lain disebut sistem hybrid. Menurut IEEE standard 929-2000 sistem PLTS dibagi menjadi tiga kategori, yaitu PLTS skala kecil dengan batas 10 kW atau kurang, skala menengah dengan batas antara 10 kW hingga 500 kW, skala besar dengan batas di atas 500 kW.

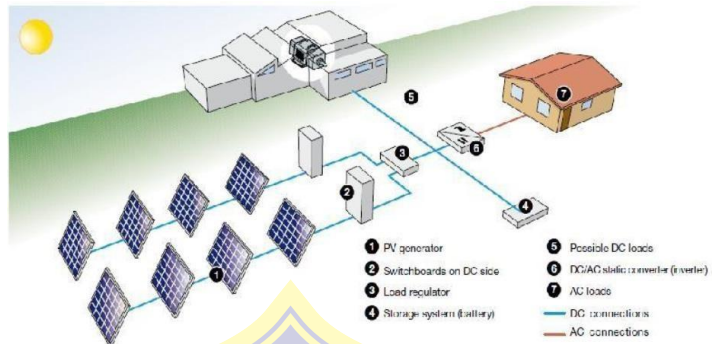
Sedangkan, menurut (Samsurizal; et al., 2021), Secara umum PLTS memiliki dua jenis sistem ditinjau dari pembangkitannya, yakni PLTS Tersebar dan PLTS Terpusat. PLTS Tersebar berarti peralatan PLTS dipasang di rumah-rumah

sebagai penerima manfaat. Ini biasa disebut PLTS rooftop atau PLTS *Solar Home System* (SHS). Sementara itu, PLTS Terpusat berarti PLTS dipasang di satu lokasi yang relatif luas untuk kemudian didistribusikan dengan kabel ke rumah – rumah penerima manfaat.

2.3.1 PLTS Off Grid PLTS

PLTS *Off-Grid* merupakan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan. Sistem ini berdiri sendiri, sering disebut stand-alone system. Sistem ini biasanya merupakan sistem dengan pola pemasangan tersebar (*distributed*) dan dengan kapasitas pembangkitan skala kecil. Untuk sistem ini biasanya dilengkapi dengan sistem penyimpanan (*storage*) tenaga listrik dengan media penyimpanan baterai. Diharapkan baterai mampu menjamin ketersediaan pasokan listrik untuk beban listrik saat kondisi cuaca mendung dan kondisi malam hari. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, PLTS *Off-Grid Domestic* dan PLTS *Off-Grid Non-Domestic*.

Sistem *fotoVoltaik* atau pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik. Pembangkit listrik berbasis energi terbarukan ini merupakan salah satu solusi yang direkomendasikan untuk listrik di daerah pedesaan terpencil di mana sinar mataharnya melimpah dan bahan bakar sulit didapat dan relatif mahal. Alasan utama menggunakan teknologi *fotoVoltaik* ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 3 Diagram Sistem PLTS

Sumber : Panduan Teknisi. (n.d.). *Diagram sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)* [ilustrasi].

<https://www.panduanteknisi.com>

1. Sumber energi yang melimpah dan tanpa biaya Sumber energi tersedia di tempat dan tidak perlu diangkut
2. Biaya pengoperasian dan pemeliharaan sistem PLTS yang relatif kecil
3. Tidak perlu pemeliharaan yang sering dan dapat dilakukan oleh operator setempat yang terlatih
4. Ramah lingkungan, tidak ada emisi gas dan limbah cair atau padat yang berbahaya



Gambar 2. 4 (PLTS) skala kecil/komunal (kemungkinan off-grid) di area pedesaan.

Sumber : (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022)

2.3.2 PLTS Off Grid Domestic PLTS

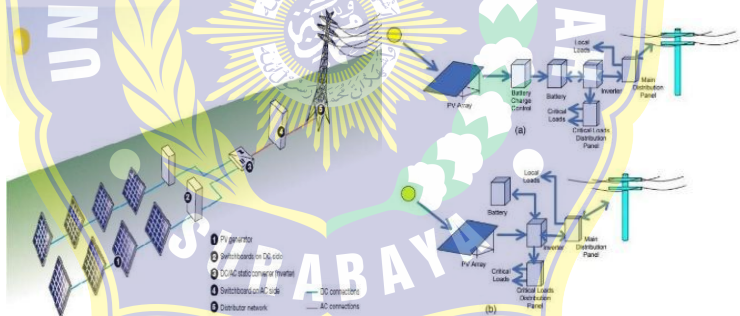
PLTS *Off-Grid* Domestic merupakan system PLTS yang menyediakan daya listrik pada rumah tangga dan pedesaan yang belum terhubung dengan jaringan listrik utilitas, dalam hal ini jaringan listrik PLN. Jenis beban listrik yang dicatu oleh PLTS ini diantaranya beban sistem penerangan dan beban listrik rumah tangga lainnya.

2.3.3 PLTS Off Grid Non Domestic PLTS

PLTS *Off-Grid* Non-Domestic merupakan sistem PLTS yang menyediakan daya listrik untuk batas keperluan atau kegunaan yang lebih luas seperti telekomunikasi, penerangan jalan, pompa air, radio repeater, stasiun transmisi untuk observasi gempa dan cuaca, sistem tanda lalu lintas, pelabuhan dan bandara, instalasi periklanan, alat bantu navigasi, dll.

2.3.4 PLTS ON Grid PLTS

PLTS *On-Grid* atau Grid.+u8-connected PV plant merupakan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan. Berdasarkan pola operasi penyaluran tenaga listrik sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, sistem penyimpanan (storage) atau disebut *Grid-connected* PV with a battery back up, menggunakan baterai sebagai cadangan dan penyimpanan tenaga listrik dan tanpa baterai atau disebut Grid- connected PV without a battery back up (Kurnia et al. 2024). Baterai pada PLTS *On-Grid* berfungsi sebagai suplai tenaga listrik untuk beban listrik apabila jaringan atau grid mengalami kegagalan untuk periode tertentu dan sebagai suplai tenaga listrik ke jaringan listrik negara (PLN) apabila ada kelebihan daya listrik (*excess power*) yang dibangkitkan PLTS. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *Grid-connected distributed* PV dan *Grid-connected centralized* PV.



Gambar 2. 5 Skematik sistem PLTS *grid-connected*

Sumber : (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022)

2.3.5 PLTS Hybrid PLTS

PLTS Hybrid merupakan jenis PLTS yang dalam pengoperasiannya digabungkan dengan jenis pembangkit

listrik lain, dengan sumber energi berbeda (dua atau lebih). Dalam upaya menyediakan pasokan tenaga listrik ke suatu sistem, guna mendapatkan kehandalan sistem yang lebih baik, yang berkelanjutan atau kontinyu dan menggunakan manajemen operasi tertentu. Selain itu bertujuan agar dalam pengusahaan energi listrik lebih ekonomis. Contoh PLTS hibrid yaitu, PLTSgenset, PLTS-mikrohidro, PLTS-angin



Gambar 2. 6 Ilustrasi skema PLTS *On-Grid* (± 200 kWp) yang terintegrasi dengan jaringan distribusi (MV/LV) dan PLTD existing.

Sumber : (Samsurizal; et al., 2021)

2.4 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

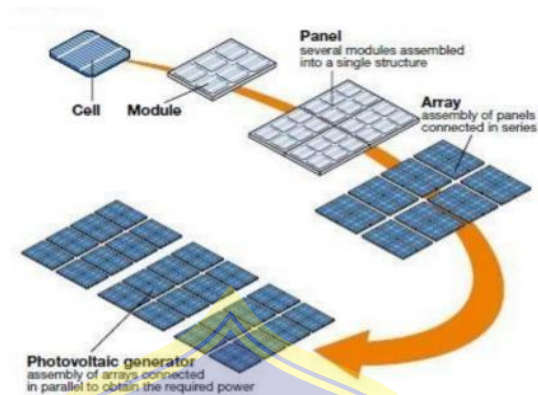
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu kesatuan sistem yang terdiri dari beberapa komponen, baik komponen utama maupun komponen pendukung, diantaranya yaitu:

2.4.1 Solar cell (*PhotoVoltaic*)

Solar cell atau sel surya adalah alat untuk mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. *PhotoVoltaic* adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah sebuah elemen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek *PhotoVoltaic*.

2.4.2 Modul Surya

Modul surya atau *PhotoVoltaic* Module merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada satu bingkai (*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut *Array*. PV modul yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan, atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap selnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel.



Gambar 2. 7 Hirarki sistem *fotoVoltaik* (Cell → Module → Panel → Array → *PhotoVoltaic* Generator)

Sumber : Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2023). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley.

2.4.3 Mounting and Tracking Systems

Modul surya harus terpasang pada suatu struktur/kerangka, untuk menjaganya tetap terarah pada arah yang tepat, agar lebih tersusun rapi dan terlindungi. Struktur pemasangan modul surya bisa pada struktur yang tetap (fixed) atau dengan sistem pelacak sinar matahari, atau biasanya disebut tracking systems.

2.4.4 Inverter

Inverter merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Pada PLTS, inverter berfungsi sebagai pengkondisi tenaga listrik (*power condition*) dan sistem kontrol yang merubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak-balik (AC), yang nantinya akan mengontrol kualitas daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau jaringan listrik. Terdapat dua macam sistem inverter pada PLTS yaitu:

- a) Inverter 1 fasa untuk sistem PLTS yang bebannya kecil.
- b) Inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN.



Gambar 2. 8 Inverter Sistem PLTS
 Sumber : (International Renewable Energy Agency
 [IRENA], 2022)

Berdasarkan karakteristik dari performa yang dibutuhkan, inverter untuk sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*) dan PLTS *grid-connected* memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu:

- a) Pada PLTS *stand-alone*, inverter harus mampu mensuplai tegangan AC yang konstan pada variasi produksi dari modul surya dan tuntutan beban (*load demand*) yang dipikul.
- b) Pada PLTS *grid-connected*, inverter dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama, untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi yang dihasilkan oleh modul surya.

2.4.5 Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Charge Controller adalah komponen di dalam system PLTS yang berfungsi sebagai pengatur arus listrik (*current regulator*) baik terhadap arus yang masuk dari panel PV maupun arus beban keluar/digunakan. Berfungsi untuk menjaga baterai

dari pengisian yang berlebihan (*over charge*), dan mengatur tegangan serta arus dari panel surya ke baterai. Fungsi dan fitur solar charge controller:

- a) Saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka controller akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah *over charge*, dengan demikian ketahanan baterai akan jauh lebih tahan lama. Di dalam kondisi ini, listrik yang tersuplai dari panel surya akan langsung terdistribusi ke beban/peralatan listrik dalam jumlah tertentu sesuai dengan konsumsi daya peralatan listrik.
- b) Saat tegangan di baterai dalam keadaan hampir kosong, maka controller berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban / peralatan listrik. Dalam kondisi tegangan tertentu (umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai), maka pemutusan arus beban dilakukan oleh controller. Hal ini menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel – sel baterai. Pada kebanyakan model controller, indikator lampu akan menyala dengan warna tertentu (umumnya berwarna merah atau kuning) yang menunjukkan bahwa baterai dalam proses charging. Dalam kondisi ini, bila sisa arus di baterai kosong (dibawah 10%), maka pengambilan arus listrik dari baterai akan diputus oleh controller, maka peralatan listrik / beban tidak dapat beroperasi. Keadaan ini disebut overdischarge akibat beban yang dipikul cukup besar.
- c) Pada controller tipe – tipe tertentu dilengkapi dengan digital meter dengan indikator yang lebih lengkap, untuk memonitor berbagai macam kondisi yang terjadi pada sistem PLTS dapat terdeteksi dengan baik.



Gambar 2. 9 Solar Charge Controller

Sumber : Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2023).

Solar engineering of thermal processes. Wiley.

Solar Charge Controller yang dipilih harus lulus test kualifikasi dan memenuhi persyaratan teknis dalam pemakaiannya. Persyaratan teknis dalam penggunaan Solar Charge Controller antara lain adalah:

- 1) Kapasitas maksimum input dan output.
- 2) Mempunyai tegangan batas bawah dan batas atas terhadap pemutusan baterai.
- 3) Konsumsi diri yang sangat kecil.
- 4) Mempunyai proteksi hubung singkat dan beban lebih .
- 5) Tegangan jatuh yang kecil ($< 0,5 \text{ V}$) pada sisi PV – baterai dan pada sisi baterai– beban.
- 6) Mempunyai “Blocking Diode” dan sesuai dengan kapasitas maksimum.

2.4.6 Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen yang digunakan pada system PLTS yang dilengkapi dengan penyimpanan cadangan energi listrik. Baterai memiliki fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk energi arus DC. Energi yang disimpan

pada baterai berfungsi sebagai cadangan (back up), yang biasanya digunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malam hari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil. Satuan kapasitas energi yang dihasilkan pada baterai adalah *Ampere hour* (Ah), yang artinya arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam. Proses pengosongan baterai (discharge), baterai tidak boleh dikosongkan hingga titik maksimum, sebab hal ini mempengaruhi usia pakai (*life time*) dari baterai tersebut. Batas pengosongan dari baterai disebut dengan *depth of discharge* (DoD) yang dinyatakan dalam satuan persen. Suatu baterai memiliki DoD 80%, ini berarti bahwa hanya 80% dari energi yang tersedia dapat dipergunakan dan 20% tetap berada dalam cadangan. Semakin dalam DoD yang diberlakukan pada suatu baterai maka semakin pendek pula siklus dari baterai tersebut.



Gambar 2. 10 Baterai tipe VRLA/AGM (sealed lead-acid battery)

Sumber : Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. S. (2022). *Power conversion of renewable energy systems*. Springer.

2.4.7 Combiner Box Combiner

Combiner Box berfungsi sebagai Panel listrik arus searah (DC) yang menggabungkan keluaran dari beberapa string modul surya menjadi satu. Berfungsi juga sebagai panel isolasi dan proteksi terhadap arus/tegangan lebih dan petir.

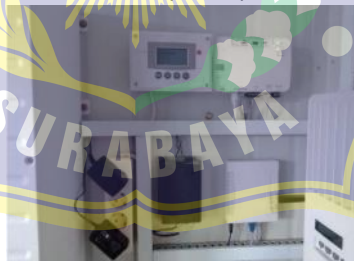


Gambar 2. 11 Combiner Box

Sumber : Suntree Electric Group Co., Ltd. (2025). *SHLX-PV4/1 DC combiner box* [Photograph]. Suntree Electric Group Co., Ltd. <https://www.suntree-combiner-box.com/combiner-box/shlx-pv4-1-dc-combiner-box>

2.4.8 Sistem Monitoring Sistem

Sistem Monitoring mencatat, merekam, menampilkan dan memonitor data-data parameter serta informasi sistem PLTS. Sistem monitoring dapat diakses dari jarak jauh melalui jaringan data yang ada. Alat ini lebih sering dikenal sebagai *Remote Monitoring System* (RMS).



Gambar 2. 12 Monitoring Sistem

Sumber: International Energy Agency. (2023). *Trends in PhotoVoltaic applications 2023*. IEA-PVPS.

2.4.9 Panel Distribusi AC

Panel distribusi tegangan rendah 3 Phasa arus bolak-balik (AC) yang berfungsi menyalurkan daya dari pembangkit ke beban. Panel ini umumnya terdiri dari beberapa output feeder.



Gambar 2. 13 Panel Distribusi DC

Sumber : International Electrotechnical Commission. (2021). IEC 61439-1: Low-Voltage switchgear and controlgear assemblies— Part 1: General rules. IEC

2.4.10 Automatic Transfer Switch (ATS)

Secara umum fungsi dari ATS adalah untuk menghubungkan beban dengan dua sumber tenaga (sumber utama & sumber cadangan) atau lebih yang terpisah yang bertujuan untuk menjaga ketersediaan dan keandalan aliran daya menuju beban. Secara sederhana fungsi ATS adalah untuk melakukan transfer daya secara otomatis ke beban, dari sebuah sumber utama (jaringan listrik) ke sumber cadangan ketika terjadi gangguan pada sumber utama. Secara luas ATS telah diaplikasikan di industri maupun perkantoran yang membutuhkan sistem kelistrikan dengan tingkat keandalan yang tinggi.



Gambar 2. 14 Automatic Transfer Switch (ATS)

Sumber : Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. S. (2022). *Power conversion of renewable energy systems*. Springer.

2.4.11 Kabel

Kabel merupakan komponen penghantar yang terisolasi yang berfungsi untuk menghubungkan antara komponen satu dengan yang lainnya pada sebuah rangkaian kelistrikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).



Gambar 2. 15 Kabel

Sumber : Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. S. (2022). *Power conversion of renewable energy systems*. Springer

2.5 Tegangan Listrik

Tegangan listrik merupakan beda potensial listrik antara dua titik dalam suatu rangkaian yang menyebabkan arus listrik dapat mengalir. Tegangan listrik pada sistem PLTS dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan kondisi pembebanan.

Hubungan tegangan terhadap daya listrik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V = \frac{P}{I} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan

V = Tegangan listrik (*Volt*)

P = Daya listrik (*Watt*)

I = Arus listrik (*Ampere*)

2.6 Daya Listrik

Daya listrik merupakan besarnya energi listrik yang digunakan atau dihasilkan dalam setiap satuan waktu. Pada sistem PLTS daya listrik diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan dan arus listrik.

Persamaan daya listrik dituliskan sebagai berikut (li & Teori, 2022):

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

P = Daya listrik (*Watt*)

V = Tegangan listrik (*Volt*)

I = Arus listrik (*Ampere*)

Efisiensi sitem PLTS

2.7 Efisiensi Sistem PLTS

Efisiensi sistem PLTS merupakan perbandingan antara daya keluaran panel surya terhadap daya masukan maksimum panel surya yang dinyatakan dalam persen.

Rumus efisiensi sistem PLTS:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan

η = Efisiensi sistem PLTS (%)

P_{out} Daya keluaran panel surya (Watt)

P_{in} = Daya input panel surya (Watt)

Pada penelitian ini daya input menggunakan kapasitas maksimum panel surya sebesar 300 Watt karena sistem menggunakan dua panel surya 150 WP yang dirangkai paralel.

2.8 Daya Maksimum Panel Surya

Daya maksimum panel surya merupakan kemampuan maksimum panel surya dalam menghasilkan energi listrik pada kondisi standar pengujian.

Perhitungan total daya panel surya dilakukan dengan persamaan:

$$P_{total} = P_1 + P_2 \dots\dots\dots(2.4)$$

Karena sistem menggunakan dua panel surya 150 WP maka

$$P_{total} = 150 + 150 = 300 \text{ Watt}$$

Keterangan :

P_{total} = Total daya panel surya (*Watt*)

P_1 = Daya panel surya pertama

P_2 = Daya panel surya kedua

(p_1, p_2 dan p_{total} di tulis di bawah p)

2.9 Hubungan Tegangan, Arus, dan Daya pada PLTS

Hubungan antara tegangan, arus, dan daya pada sistem PLTS mengikuti prinsip dasar kelistrikan. Semakin besar nilai arus atau tegangan yang dihasilkan panel surya maka daya keluaran panel surya juga meningkat.

Hubungan tersebut dapat dituliskan :

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.5)$$

Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa daya listrik berbanding lurus dengan tegangan dan arus listrik. Daya listrik merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus listrik. Tegangan berfungsi sebagai gaya pendorong aliran elektron, sedangkan arus menunjukkan jumlah muatan listrik yang mengalir dalam suatu rangkaian (Fundamentals of Electric Circuits, 2022).

Sebagai contoh, jika sebuah lampu DC bekerja pada tegangan 12 *Volt* dan arus 0,5 *Ampere*, maka daya yang digunakan adalah sebesar 6 *Watt*. Besarnya daya ini menunjukkan konsumsi energi listrik yang digunakan lampu dalam satu satuan waktu (Fundamentals of Electric Circuits, 2022).

2.10 Intensitas Cahaya Matahari

Intensitas cahaya matahari merupakan besarnya cahaya matahari yang diterima permukaan panel surya. Pada penelitian ini intensitas cahaya diukur menggunakan lux meter.

Hubungan konversi lux terhadap irradiance dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Ir = Lux/126 \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

Ir = Irradiance (W/m²)

Lux = Intensitas cahaya hasil pengukuran lux meter

Namun pada penelitian ini nilai irradiance tidak digunakan secara langsung dalam perhitungan efisiensi karena alat ukur yang digunakan berupa lux meter sehingga hasil konversi tidak sepenuhnya merepresentasikan radiasi matahari yang diterima panel surya

2.11 Teori Bola Lampu DC

Bola lampu DC (*Direct Current Lamp*) merupakan perangkat penerangan yang menggunakan arus searah (DC), yaitu arus listrik yang mengalir secara konstan dalam satu arah dari kutub positif menuju kutub negatif. Karakteristik arus DC yang stabil membuatnya sangat sesuai digunakan pada perangkat elektronik dan sistem berbasis energi terbarukan (International Energy Agency, 2022).

Dalam sistem tenaga surya, energi listrik yang dihasilkan panel *fotovoltaik* secara alami berupa arus DC, sehingga penggunaan lampu DC memungkinkan pemanfaatan energi secara langsung tanpa melalui proses konversi ke arus bolak-balik (AC) yang dapat menyebabkan rugi-rugi daya (International Renewable

Energy Agency, 2021). Oleh karena itu, lampu DC banyak digunakan pada sistem off-grid, sistem cadangan energi, dan instalasi listrik berbasis baterai.

2.11.1 Prinsip Kerja Bola Lampu DC

Prinsip Kerja Lampu LED DC Lampu LED bekerja berdasarkan prinsip semikonduktor melalui proses rekombinasi elektron dan hole pada junction p-n. Ketika tegangan DC diberikan dengan polaritas yang benar, elektron bergerak dari katoda menuju anoda dan bertemu dengan hole, menghasilkan energi dalam bentuk foton atau cahaya (U.S. Department of Energy, 2022).

Fenomena ini disebut elektroluminesensi, di mana energi listrik diubah langsung menjadi cahaya tanpa melalui proses pemanasan seperti pada lampu pijar. Hal ini menyebabkan LED memiliki efisiensi yang jauh lebih tinggi karena kehilangan energi dalam bentuk panas sangat kecil (U.S. Department of Energy, 2022).

2.11.2 Perbandingan Arus DC dan AC

Arus DC mengalir dalam satu arah dengan nilai tegangan yang relatif konstan, sedangkan arus AC mengalir bolak-balik dengan arah yang berubah secara periodik (Khan Academy, n.d.).

Dalam aplikasi penerangan, lampu DC lebih efisien pada sistem berbasis baterai karena tidak memerlukan proses konversi energi. Sebaliknya, penggunaan lampu AC pada sistem DC memerlukan inverter yang dapat menyebabkan kehilangan energi (International Renewable Energy Agency, 2022).

2.11.3 Karakteristik Lampu DC

1. Tegangan dan Polaritas

Lampu DC dirancang untuk bekerja pada tegangan tertentu, seperti 3V, 12V, atau 24V. Ketidaksesuaian tegangan dapat menyebabkan penurunan kinerja atau bahkan kerusakan pada lampu. Tegangan yang terlalu rendah akan menyebabkan cahaya redup, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi dapat mempercepat kerusakan komponen (All About Circuits, n.d.).

Selain itu, polaritas merupakan faktor penting dalam lampu DC, terutama pada LED. Jika polaritas terbalik, arus tidak dapat mengalir sehingga lampu tidak menyala. Pada beberapa kondisi, kesalahan polaritas juga dapat merusak komponen internal lampu (All About Circuits, n.d.).

2. Efisiensi Lampu

Efisiensi lampu DC menunjukkan kemampuan dalam mengubah energi listrik menjadi cahaya. Lampu LED memiliki efisiensi yang tinggi karena sebagian besar energi listrik dikonversi menjadi cahaya, bukan panas. Hal ini berbeda dengan lampu pijar yang sebagian besar energinya terbuang sebagai panas (U.S. Department of Energy, 2022).

2.11.4 Keunggulan dan Kelemahan

a. Keunggulan

Lampu DC memiliki beberapa keunggulan, antara lain efisiensi energi yang tinggi karena tidak memerlukan inverter, konsumsi daya yang rendah sehingga lebih hemat energi, serta kompatibilitas yang baik dengan sistem energi terbarukan seperti panel surya (International Energy Agency, 2021).

b. Kelemahan

Namun, lampu DC juga memiliki keterbatasan,

seperti distribusi energi yang kurang efisien pada jarak jauh akibat rugi tegangan, sensitivitas terhadap polaritas, serta ketidakmampuan untuk langsung digunakan pada sistem listrik AC tanpa konverter (International Renewable Energy Agency, 2022).

