

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Energi Terbarukan dan PLTS

Energi merupakan kebutuhan vital bagi kehidupan manusia. Peningkatan kebutuhan energi merupakan indikator peningkatan kemakmuran. Sumber energi terbarukan mempunyai sifat terbarukan dan berkesinambungan. Energi terbarukan, seperti matahari, angin, air, dan biomassa, memiliki sifat yang dapat diperbaharui secara alami dalam waktu singkat dan berkelanjutan. Sumber energi ini tidak akan habis selama pemanfaatannya dilakukan secara berkelanjutan, berbeda dengan energi fosil yang terbatas dan berdampak negatif terhadap lingkungan. Energi terbarukan memainkan peranan penting dalam mengurangi emisi karbon dan mengatasi perubahan iklim, dengan menyediakan alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk kebutuhan energi global. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah salah satu bentuk energi terbarukan yang memanfaatkan sinar matahari, dengan sel surya (sel photovoltaic) sebagai komponen utamanya. PLTS umumnya digunakan di daerah yang memiliki radiasi matahari yang tinggi dan daerah yang belum terjangkau oleh listrik PLN. Ada beberapa parameter lingkungan yang dapat mempengaruhi kinerja dari sel surya, diantaranya, perubahan temperatur, intensitas radiasi matahari, tertutupnya sebagian permukaan sel surya (bayangan).[6]

Terdapat tiga jenis PLTS yaitu PLTS off-grid, PLTS on-grid, serta PLTS Hybrid. PLTS On-Grid atau sistem fotovoltaiik terhubung ke jaringan, yang merupakan sistem pembangkit listrik menggunakan sinar matahari sebagai sumber energinya. PLTS On-Grid pembangkit yang langsung terhubung menggunakan jaringan listrik bolak-balik dari grid lokal untuk memaksimalkan penggunaan energi matahari melalui panel surya, sehingga menghasilkan listrik seefisien mungkin. Sistem ini dianggap lebih ramah lingkungan dan solusi green energy untuk masyarakat yang ingin memperkecil biaya tagihan listrik. Sistem PLTS Off-Grid adalah sistem yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN. Dalam sistem Off-Grid, terdapat komponen tambahan seperti baterai

dan charge controller untuk meningkatkan operasionalitas. Sistem ini umumnya digunakan di daerah yang tidak terjangkau oleh pasokan listrik PLN, seperti daerah 3T (terdepan, terluar, dan tertinggal). Sementara itu, sistem PLTS Hybrid adalah kombinasi dari dua atau lebih jenis pembangkit listrik, yang bertujuan untuk menggabungkan beberapa sumber energi sehingga menghasilkan pembangkit yang lebih andal dengan saling melengkapi kekurangan baik dari segi teknis maupun ekonomis.[6], [7], [8].

2.1.1 Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik terlihat pada gambar 2.1. [6]



Gambar 2.1. Prinsip Kerja PLTS [6]

Pada gambar 2.1 dapat dilihat bahwa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bekerja dengan mengonversi energi matahari menjadi energi listrik melalui panel surya (PV Array) yang menghasilkan listrik DC. Energi ini kemudian diatur oleh solar charge controller untuk memastikan baterai tidak overcharge atau over-discharge, lalu disimpan dalam baterai untuk digunakan saat sinar matahari tidak tersedia. Selanjutnya, inverter off-grid mengubah energi DC yang tersimpan di baterai menjadi AC yang dapat digunakan untuk perangkat listrik rumah tangga, seperti lampu, televisi, dan kulkas. [6]

2.1.2 Komponen utama (panel, inverter, BESS, SCC)

1. Panel Surya

Sel surya pertama kali ditemukan oleh Edmond Becquerel pada abad ke-18 merupakan komponen elektronik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik arus searah (DC) melalui efek fotovoltaiik[5], [6], [8]. Perbedaan sel, modul fotovoltaiic, string modul fotovoltaiic dan larik modul dapat dilihat pada gambar 2.2.

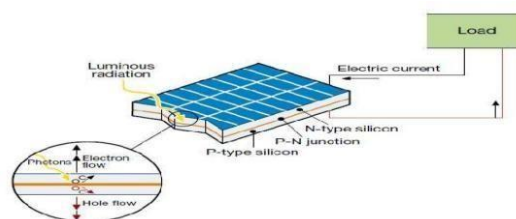


Gambar 2.2. Sel, Modul Fotovoltaik, String modul fotovoltaik dan Larik modul fotovoltaik [8]

Gambar 2.2 menjelaskan bahwa sel surya merupakan blok dasar yang memiliki tegangan keluaran 0,5 volt, sekelompok sel surya yang disusun seri disebut modul. Beberapa modul yang tersusun seri disebut string sedangkan modul surya yang membentuk sistem seri parallel disebut array.[8]. Panel surya bekerja dengan mengeksitasi elektron pada material semikonduktor, seperti silikon, dan dapat disusun seri untuk meningkatkan tegangan atau paralel untuk meningkatkan arus. [6], [8], [9], [10], [11], [12]

a. Prinsip Kerja Sel Surya

Prinsip kerja sel surya dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Prinsip Kerja Sel Surya [6]

Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa ketika sel surya terkena sinar matahari, berdasarkan efek fotovoltaik, maka pada sel surya akan terjadi perpindahan elektron dari daerah elektron yang lebih tinggi (N) ke daerah P yang memiliki lubang. Perpindahan ini merupakan aliran arus internal. Apabila pada sambungan terhubung dengan penghantar dan terhubung dengan rangkaian tertutup atau terhubung dengan beban, maka akan terjadi aliran arus listrik dengan tegangan tertentu menuju beban (beban menyerap daya listrik)

yang kontinyu, selama dan dipengaruhi oleh adanya sinar matahari yang diterima oleh sel surya [6].

b. Struktur Sebuah Modul Fotovoltaic

Struktur modul Fotovoltaic secara umum dapat dilihat pada gambar 2.4

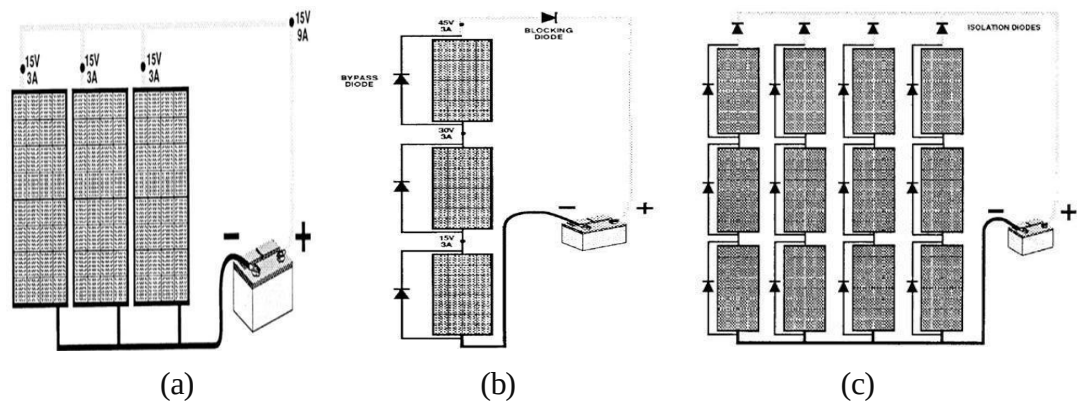


Gambar 2.4. Struktur Modul Fotovoltaic [8]

Pada gambar 2.4 terlihat bahwa modul surya terdiri dari beberapa komponen utama yang berperan menjaga kinerja dan ketahanannya. Bingkai aluminium anodisasi memberikan kekokohan serta stabilitas mekanis panel. Pada bagian depan, kaca pelindung berfungsi melindungi sel fotovoltaik dari cuaca dan benturan. Sel fotovoltaik sendiri tersusun dari material semikonduktor, umumnya silikon mono atau polikristalin, yang bertugas mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik. Lapisan enkapsulasi berbahan ethylene-vinyl acetate (EVA) ditempatkan di antara sel dan kaca untuk memberikan perlindungan mekanis serta isolasi listrik. Di bagian belakang, lembar insulasi atau backsheet yang terbuat dari bahan plastik melindungi modul dari kelembapan sekaligus memberikan isolasi tambahan. Seluruh rangkaian sel kemudian dihubungkan melalui junction box, yang berisi busbar, kabel, dan bypass diode sebagai terminal utama modul fotovoltaik [8]

c. Konfigurasi Modul Fotovoltaic

PLTS dibangun dari konfigurasi seri, paralel maupun kombinasi dari keduanya dari modul fotovoltaik individual untuk mencapai tegangan dan arus yang dikehendaki [8]. Semakin besar kapasitas PLTS, maka semakin kompleks konfigurasi modul surya. Hal ini terlihat pada gambar 2.5. [5]



Gambar 2.5. Konfigurasi Modul Surya (a) Paralel, (b) Seri, (c) Seri-Paralel [5]

Gambar 2.5. menunjukkan konfigurasi modul surya dalam susunan paralel, seri, dan seri-paralel. Pada konfigurasi paralel (a), arus total meningkat menjadi 9 A dengan tegangan tetap 15 V, sedangkan pada konfigurasi seri (b), tegangan meningkat menjadi 90 V dengan arus tetap 3 A. Untuk memenuhi kebutuhan daya sistem PLTS, modul surya umumnya disusun dalam konfigurasi seri-paralel (c) agar diperoleh tegangan dan arus sesuai kebutuhan [5].

d. Jenis – Jenis Modul Surya / Fotovoltaic

Berdasarkan teknologi pembuatannya modul surya terdiri dari 3 jenis yaitu monocrystalline, polycrystalline dan thin film solar cell (TFSC). Setiap jenis sel surya memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri terutama pada tipe crystalline silicon; Modul surya monocrystalline menggunakan sel silikon tunggal dengan efisiensi sekitar 15–20%, lebih baik dalam suhu tinggi dan kondisi teduh, dominan berwarna hitam, tetapi dari sisi harga lebih mahal. Sebaliknya, modul polycrystalline terdiri dari campuran silikon dengan material lain, dengan efisiensi sekitar 13–18%, berwarna kebiruan, dan lebih murah, dengan kebutuhan area 8–9 m² per 1 kWp lebih besar dari monocrystalline 6–9 m². Keduanya memiliki garansi 25 tahun, namun polycrystalline kurang efisien pada suhu tinggi dan lebih banyak menghasilkan limbah silikon. Meskipun demikian, kedua jenis modul ini tetap efektif dalam kondisi cuaca mendung, meskipun monocrystalline sedikit lebih unggul dalam performa. [6], [9]

Gambar 2.6. menyajikan modul surya yang digunakan dalam penelitian baik tampak depan, tampak belakang dan label kinerja modul.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.6. Modul Surya Polycrystallin 200 Wp Maysun Solar (a) Bentuk Fisik Modul, (b) Konektor Belakang Modul, (c) label kinerja modul.

Gambar 2.6 menunjukkan modul surya yang digunakan pada penelitian yaitu menggunakan enam modul surya MS200M-60 memiliki daya maksimum terstandarisasi sebesar 200 Wp dengan toleransi 0~+5%. Modul ini beroperasi pada tegangan P_{max} (V_{mp}) sebesar 18.00 V dan arus P_{max} (I_{mp}) sebesar 11.12 A. Tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) adalah 20.70 V, sedangkan arus hubung singkat (I_{sc}) mencapai 11.67 A. Dengan Normal Operating Cell Temp (NOCT) sekitar 47 ± 2°C, modul ini dapat beroperasi pada suhu antara -40 hingga +85°C, dan memiliki tegangan sistem maksimum hingga 1500 V DC. Dengan berat 12,5 kg dan dimensi 1480x770x30 mm, modul ini menggunakan teknologi sel polikristalin dan memiliki sertifikasi TUV, CE, IEC, DEWA, dan ISO. Kelas aplikasi modul ini adalah tipe A, dengan kelas keamanan kebakaran tipe C.

2. Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang mengubah tegangan searah (DC) baterai, modul PV, atau sumber DC lainnya menjadi tegangan bolak-balik (AC), dengan keluaran berupa gelombang sinus murni, sinus termodifikasi, atau kotak [6], [13], [14]. Pemilihan inverter ditentukan oleh kebutuhan beban dan konfigurasi sistem, baik *grid-connected* maupun *stand-alone* [15]. Penelitian ini menggunakan dua jenis inverter, yaitu Inverter 1000 W 24 V Hybrid dan Inverter 1000 W 12 V, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7.



(a)



(b)

Gambar 2.7. (a) Inverter 1 KW 24 V Hybrid, (b) Inverter 1000 W 12 V

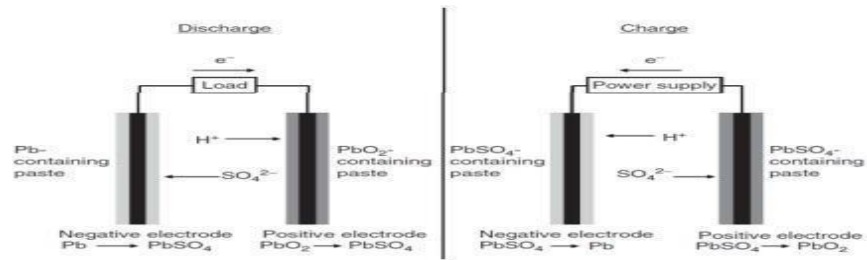
Spesifikasi teknis inverter 1000 W 24 V Hybrid adalah inverter dengan kapasitas 1000VA/1000W cocok untuk tegangan input 220Vac dengan rentang selektif 170–280Vac untuk komputer pribadi dan 90–280Vac untuk peralatan rumah tangga. Menggunakan gelombang sinus murni, inverter ini memiliki surge power hingga 2000VA dan efisiensi puncak 93%, dengan waktu transfer 10 ms untuk komputer pribadi dan 20 ms untuk peralatan rumah tangga. Dilengkapi dengan solar charger MPPT dan AC charger, inverter ini mendukung tegangan 24Vdc untuk baterai, dengan pengisian maksimum 60A dan tegangan overcharge protection di 31Vdc. Memiliki dimensi 88 x 225 x 320 mm dan berat 5 kg, inverter ini juga menawarkan antarmuka komunikasi USB/RS232 dan dapat beroperasi dalam rentang suhu -10°C hingga 50°C, dengan kelembapan 5% hingga 95%. Fitur unggulannya termasuk pengisian arus tinggi, manajemen baterai cerdas, serta proteksi terhadap beban lebih dan hubung singkat.

Spesifikasi Inverter 1000W 12 VDC menggunakan gelombang sinus murni dengan input DC 12V dan output AC 220V, memberikan daya kontinu sebesar 500W dan daya puncak hingga 1000W. Frekuensi outputnya adalah 50/60 Hz, dengan efisiensi mencapai 95%.

3. BESS (*Battery Energy Storage System*)

Baterai atau akumulator merupakan sel sekunder yang dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia dan melepaskannya kembali sebagai energi listrik [6], [9], [16]. Satu sel baterai menghasilkan tegangan 2,12 V (penuh) hingga 1,75 V (kosong) [5]. Dalam sistem fotovoltaik, baterai berfungsi menyimpan energi dari modul surya saat siang dan melepaskannya pada malam atau kondisi berawan, serta menyuplai daya

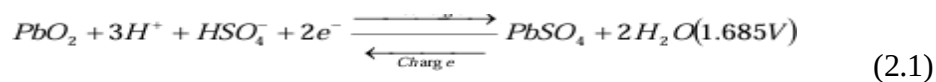
tambahan ketika beban berlebih [5], [6], [15]. Kapasitas baterai dinyatakan dalam *ampere hour* (Ah yaitu arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam) dan dipengaruhi oleh *depth of discharge* (DOD), yang umumnya 50% untuk baterai timbal-asam dan 80% untuk baterai lithium-ion [6], [9]. Baterai timbal-asam menyimpan energi melalui reaksi elektrokimia antara pelat timah dan elektrolit asam sulfat encer, memungkinkan proses Charging dan Discharging seperti terlihat pada gambar 2.8. [5].



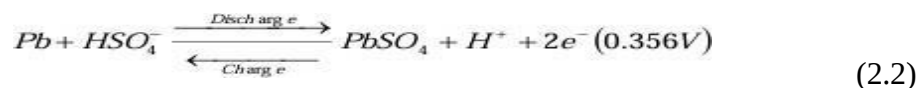
Gambar 2.8. Proses Charging dan Discharging pada Batterie Lead Acid [17]

Gambar 2.8 menunjukkan proses charging dimana senyawa sulfat pada kedua elektroda membentuk kembali PbO_2 pada elektroda positif, Pb pada elektroda negatif, serta ion sulfat (SO_4^{2-}) yang beregenerasi menjadi asam sulfat. Sebaliknya, pada proses pelepasan (discharging), PbO_2 dan Pb bereaksi dengan asam sulfat menghasilkan garam sulfat dan air [6]. Reaksi kimia kedua proses tersebut ditunjukkan sebagai berikut:

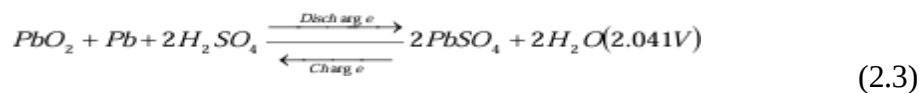
Rumus 1: Proses charge-Discharge pada sisi positif elektroda



Rumus 2: Proses charge-Discharge pada sisi negatif elektroda



Rumus 3: Proses charge-Discharge Total



Penelitian ini menggunakan baterai VRLA tipe gel silikon yang bebas perawatan, antitumpah, dan memiliki emisi gas rendah, sehingga dapat dipasang pada berbagai posisi tanpa memerlukan pengisian seimbang. Dengan dimensi 330 x 172 x 215 mm dan berat sekitar 30 kg, berkapasitas 100 Ah dan tegangan 12 V, suhu operasional antara $-15^{\circ}C$ hingga $+50^{\circ}C$, dengan suhu optimal $20-25^{\circ}C$. Baterai ini mendukung deep cycle dan

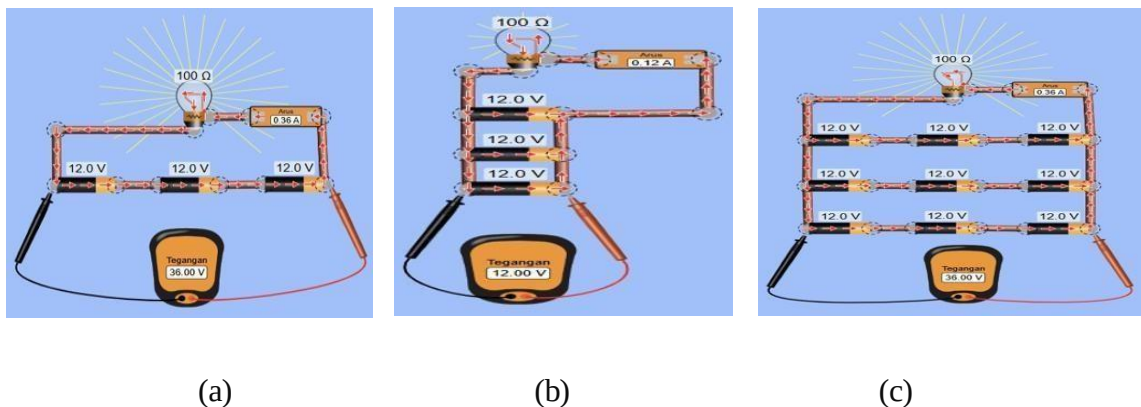
floating cycle, memiliki umur pakai antara 500 hingga 3000 siklus pengisian/pengosongan, dan daya tahan hingga 10 tahun pada suhu 20°C sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Baterie VRLA 100 Ah 12 Volt

Konfigurasi Baterie

Konfigurasi batterie terdiri dari 3 (tiga) jenis antara lain konfigurasi seri, parallel dan seri parallel seperti terlihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Konfigurasi batterie (a) seri, (b) parallel, (c) seri-paralel

Gambar 2.10 menunjukkan perbedaan konfigurasi rangkaian baterai terhadap tegangan dan arus yang dihasilkan. Pada konfigurasi seri (a), tiga baterai 12 V menghasilkan tegangan total 36 V dengan arus 0,36 A. Pada konfigurasi paralel (b), tiga baterai 12 V menghasilkan tegangan tetap 12 V dengan arus 0,12 A. Sementara itu, pada konfigurasi kombinasi seri-paralel (c), tegangan total mencapai 36 V dengan arus 0,36 A. Hal ini memperlihatkan pengaruh susunan baterai terhadap karakteristik keluaran sistem listrik.

4. SCC (Solar Charge Controller/SCC)

Solar Charge Controller (SCC) atau Battery Charge Regulator (BCR) adalah komponen elektronik pada PLTS yang mengatur pengisian dan pemeliharaan baterai, memutus aliran saat kapasitas minimum, serta menyesuaikan tegangan dan arus pengisian berdasarkan daya modul fotovoltaik dan status baterai, sehingga menjamin efisiensi dan keamanan sistem; kapasitas SCC ditentukan dari arus hubung singkat panel dengan perhitungan faktor efisiensi, suhu, dan oversize 25% [6], [8], [9], [13].

$$SCC = I_{SC} \times N_{panel} \times 25\% \dots\dots\dots (2.4)$$

Terdapat dua jenis solar charge controller (SCC), yaitu PWM dan MPPT, yang berbeda dalam pengelolaan energi antara panel surya dan baterai. PWM cocok untuk kapasitas kecil dengan suhu lebih tinggi dan pengisian terbatas, terutama saat mendung, serta membutuhkan panel yang disusun parallel dan kabel besar. Sebaliknya, MPPT memungkinkan tegangan panel lebih tinggi dari baterai, memungkinkan pengisian lebih cepat, bahkan pada suhu rendah dan kapasitas baterai rendah. MPPT lebih efisien untuk kapasitas besar (di atas 200 Wp) dan cocok untuk sistem On-Grid atau Off-Grid, dengan susunan panel seri dan kabel lebih kecil. MPPT juga lebih efektif saat cuaca mendung, karena dapat menyesuaikan parameter untuk mempertahankan produksi energi optimal sesuai kondisi lingkungan seperti terlihat pada gambar 2.11. [12]



(a)



(b)

Gambar 2.11. SCC (a) PWM Voltage 12/24 V Current 30 A, (b) MPPT 1 KW Hybrid

Penelitian ini menggunakan Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM dengan kapasitas arus pengisian 30 A pada suhu operasional 55⁰C, tegangan sistem PLTS 12 V/24 V auto (mendeteksi sistem tegangan secara otomatis), rentang tegangan masukan baterainya berada pada 9–32V, sementara tegangan sirkuit terbuka maksimum (VOC Max) dari panel surya yang dapat diterima adalah 50V (atau sekitar 45V pada kondisi standar suhu 25°C).

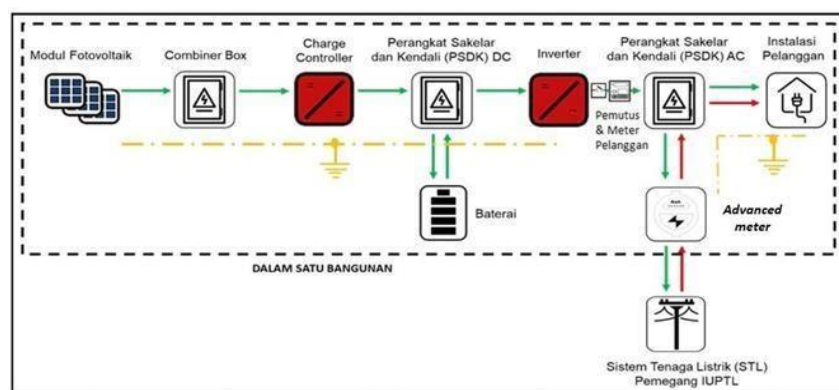
2.2 Sistem PLTS Off-Grid

2.2.1 Skema Kerja Sistem PLTS Off-Grid dan Perhitungan Kapasitas

Skema Kerja Sistem PLTS Off-Grid

Sistem PLTS Off-Grid atau *stand-alone* menyuplai listrik langsung ke jaringan distribusi pelanggan, dapat berdiri sendiri maupun dikombinasikan dengan pembangkit lain tanpa terhubung ke jaringan PLN, dengan inverter tipe *voltage source* sebagai penyedia tegangan. Sistem ini dilengkapi battere supaya bisa memberikan suplai listrik sesuai kebutuhan beban. PLTS jenis ini banyak digunakan untuk menjangkau daerah yang belum ada jaringan listrik PLN. [8]

Prinsip kerja PLTS dengan baterai sesuai Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 tentang PLTS Atap yang terhubung dengan jaringan listrik ditunjukkan pada gambar 2.12 [18].



Gambar 2.12. Diagram instalasi sistem PLTS atap dengan battere [18]

Gambar 2.12 menunjukkan sistem PLTS yang beroperasi dengan mengubah energi matahari menjadi listrik arus searah (DC) melalui sel surya yang disusun seri membentuk modul PV, kemudian dirangkai menjadi string PV. Untuk meningkatkan

arus, string PV dihubungkan secara paralel melalui *combiner box*, selanjutnya diatur oleh *charge controller* dan disimpan dalam baterai guna mencegah *overcharge*. Listrik DC kemudian dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga maupun disalurkan ke jaringan listrik [18].

Perhitungan Kapasitas Sistem PLTS Off-Grid

Untuk menentukan kapasitas sistem PLTS Off-Grid atau kapasitas PV (W_p), kita perlu menghitung berapa profile beban harian yaitu total energi harian beban (E_{load}) yang digunakan dan tingkat irradiansi (G) dilokasi yang akan dipasang PLTS. Kapasitas PV (W_p) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut: [19]

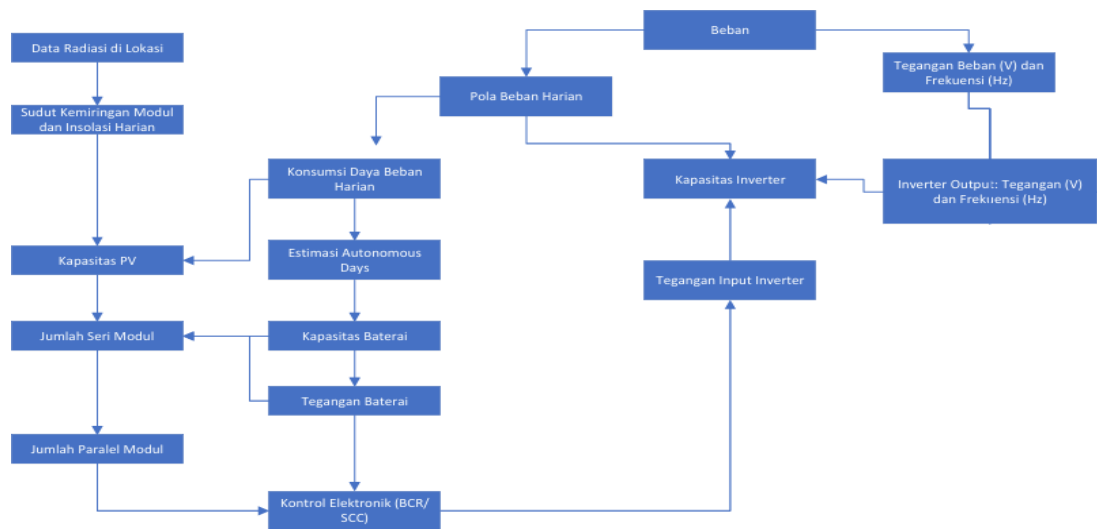
$$\text{Kapasitas PV } (W_p) = \frac{E_{load}}{G} \quad (2.5)$$

2.2.2 Kriteria Desain dan Perhitungan Sizing

Desain dan sizing merupakan bagian dari studi kelayakan untuk mendapatkan kelayakan teknis sistem PLTS (off-grid). Tahapan Desain (Sizing) sistem PLTS off-grid meliputi:

1. Perhitungan konsumsi beban listrik (Load Profile)
2. Perhitungan ukuran Baterai
3. Perhitungan ukuran PVArray
4. Perhitungan komponen lain meliputi inverter, SCC
5. Melakukan simulasi dan analisis kinerja sistem PLTS

Diagram alir desain/sizing PLTS Off-Grid terlihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13. Diagram Alir Disain/Sizing Sistem PLTS Off-Grid

2.3 Internet of Things (IoT) untuk Monitoring Energi

2.3.1 Konsep IoT

Internet of Things (IoT) adalah konsep pemanfaatan konektivitas internet melalui integrasi sensor dan perangkat lunak pada objek untuk memungkinkan komunikasi, pengendalian, dan pertukaran data antar perangkat. IoT erat kaitannya dengan *machine-to-machine* (M2M), di mana perangkat cerdas (*smart devices*) berfungsi mendukung aktivitas manusia [3]. Pada penelitian ini, IoT digunakan agar sistem PLTS yang dibuat dapat terhubung ke jaringan sehingga data dapat diakses secara real-time dari mana saja.

2.3.2 Protokol komunikasi (MQTT, HTTP, LoRa)

1. MQTT

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) merupakan protokol komunikasi *publish/subscribe topicbased* yang sangat sederhana dan ringan, yang didesain untuk alat yang memiliki kemampuan terbatas, *bandwidth* yang rendah, *latency* yang tinggi atau jaringan yang kurang dapat diandalkan. Prinsip dari desain ini adalah untuk meminimalkan penggunaan *bandwidth* jaringan dan kebutuhan sumber daya pada perangkat serta pada waktu yang sama juga berusaha untuk memastikan keandalan dan kepastian dari pengiriman data. Prinsip yang ada ini juga memunculkan beberapa ide protokol mengenai “*machine-to-machine*” (M2M) atau *IoT* yang menginginkan

perangkat di dunia untuk saling terhubung, dan untuk aplikasi *mobile* dimana *bandwidth* dan daya baterai pada keadaan yang cukup. [20]

2. HTTP

HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) adalah protokol komunikasi standar yang digunakan dalam aplikasi berbasis web dan IoT untuk mentransfer data antara perangkat *client* dan *server*. Dalam konteks *Internet of Things (IoT)*, HTTP memungkinkan perangkat untuk mengirimkan data ke server untuk dianalisis dan diakses secara real-time melalui aplikasi berbasis web atau mobile. Penggunaan HTTP dalam sistem monitoring energi berbasis IoT, seperti pada PLTS Off-Grid, mempermudah pengumpulan dan distribusi data terkait tegangan, arus, dan daya dari sensor ke server, yang kemudian ditampilkan di dashboard pengguna [3]. Meskipun HTTP memiliki kelebihan dalam kompatibilitas luas dan kemudahan implementasi, penggunaan protokol ini dalam IoT sering kali dibatasi oleh overhead yang lebih tinggi dibandingkan dengan protokol lain seperti MQTT [4].

3. LoRa

LoRa (*Long Range*) adalah teknologi komunikasi nirkabel yang dirancang untuk komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, yang sangat cocok untuk aplikasi *Internet of Things (IoT)*, termasuk dalam monitoring energi seperti pada sistem PLTS Off-Grid. LoRa memiliki keunggulan dalam mengirimkan data dalam jarak jauh hingga beberapa kilometer dengan menggunakan sedikit daya, membuatnya ideal untuk aplikasi di daerah terpencil atau yang tidak terjangkau jaringan seluler. Teknologi ini dapat digunakan untuk menghubungkan berbagai perangkat IoT, seperti sensor dan perangkat pengukur energi, ke *gateway* yang kemudian mengirimkan data ke *server* untuk analisis lebih lanjut [4].

2.3.3 Aplikasi monitoring energi berbasis IoT

Aplikasi monitoring energi berbasis IoT memungkinkan pemantauan real-time terhadap sistem energi, seperti PLTS Off-Grid, dengan mengumpulkan data dari sensor

dan perangkat pengukur energi yang terhubung ke internet. Data yang dikumpulkan, seperti tegangan, arus, dan daya, dikirimkan ke server atau cloud melalui protokol komunikasi seperti HTTP atau MQTT, dan dapat diakses melalui dashboard berbasis web atau aplikasi mobile. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional dan pemeliharaan, tetapi juga memberikan visibilitas yang lebih baik terhadap kinerja sistem energi terbarukan. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan IoT untuk monitoring energi surya memungkinkan pengelolaan sistem yang lebih efisien dan responsif terhadap perubahan kondisi operasional [3], [4]

Penelitian ini merancang sistem monitoring PLTS menggunakan sensor PZEM 004T-100A (V4.0) untuk mencatat tegangan, arus, daya, dan energi, yang kemudian disimpan dan ditampilkan melalui dashboard web interaktif melalui protokol komunikasi HTTP. Dashboard ini menyajikan visualisasi data dalam bentuk grafik harian, menyediakan fitur ekspor ke Excel dan PDF, serta berfungsi sebagai media edukasi maupun evaluasi teknis [16].

2.4 Penelitian Terkait (State of the Art)

2.4.1 Ringkasan penelitian terdahulu (journal, thesis)

Bagian ini menguraikan secara singkat penelitian-penelitian terdahulu yang memperkuat landasan dilaksanakannya penelitian ini, yang dirangkum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian yang dilakukan dengan Penelitian Terdahulu

Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Judul	Pembahasan Penelitian
Tri Joko Pramono, Dharmi Johar Damiri, Supriadi Legino	2017	Implementasi Logika Fuzzy untuk Sistem Otomatisasi Pengaturan Pengisian Batere Pembangkit	Pembahasan penelitian ini menitikberatkan pada penerapan logika fuzzy untuk otomatisasi pengaturan pengisian baterai pada PLTS, sehingga proses pengisian menjadi lebih efisien, stabil, dan sesuai kondisi daya yang tersedia.

		Listrik Tenaga Surya	
Hilman Adlan	2020	Rancang Bangun Sistem Pengatur Daya Solar Home System Berbasis Internet of Things	Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring dan pengaturan daya pada Solar Home System (SHS) berbasis Internet of Things (IoT) guna memastikan stabilitas dan efisiensi penyediaan energi listrik sesuai kebutuhan beban, terutama di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN
Ella Putri Niga Pangestu, Zainul Arifin Imam Supardi.	2020	Kajian Proses Charge – Discharge pada Sel Aki Pb-PbO ₂	Penelitian ini mengkaji proses <i>charge-discharge</i> pada sel aki Pb–PbO ₂ menggunakan aki bekas Yuasa tipe YT7C (12 V 6 Ah) untuk menganalisis kinerja elektroda dan kapasitas listriknya.
A. Rahman, T. Dewi, and Y. Nugroho	2021	Solar energy resource assessment for Indonesia based on the Global Solar Atlas	Pembahasan penelitian ini menitikberatkan pada penilaian potensi energi surya di Indonesia dengan menggunakan data Global Horizontal Irradiation (GHI), yang menunjukkan bahwa sumber daya surya nasional jauh melampaui kebutuhan energi sekarang dan masa depan serta dapat mendukung transisi

			menuju 100% energi terbarukan pada 2050
Chairul Gagarin Irianto, Maulasukma Widjaya, Ishak Kasim, Syamsir Abduh, Dianing Novita Nurmala Putri	2021	Aplikasi Sistem Pompa Air Tenaga PV Surya Atap 2x150 Wp Untuk Kantin Karfati di Gedung E Universitas Trisakti	Pembahasan penelitian ini menitikberatkan pada perancangan dan penerapan sistem pompa air bertenaga surya atap 2x150 Wp yang dilengkapi inverter 500 VA dan baterai 100 Ah untuk menggerakkan pompa AC 135 W, sehingga mampu memproduksi ± 1000 liter air bersih per hari bagi kantin Karfati Universitas Trisakti melalui proses filtrasi yang efisien dan ramah lingkungan.
Denis, Jaka Windarta, Kukuh Eko Prihantoko, Fauzan Rafi Miraj, Gifhar Rahman	2022	Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Kelompok Usaha Bersama Rumput Laut di Desa Kemujan Karimunjawa	Pengembangan dan Pemanfaatan PLTS dengan konfigurasi seri untuk penggunaan oven listrik dalam proses pengeringan rumput laut di Desa Kemujan Karimunjawa
Pande Putu Agus Santoso, Feby Nopriandy, Irma Fahrizal Butsi Ningsih, Leo Dedy	2022	Pengaruh Bentuk Rangkaian Panel Surya Terhadap Kuat Arus, Tegangan dan Daya	Penelitian yang membahas pengaruh bentuk rangkaian panel surya terhadap nilai kuat arus, tegangan dan daya

Anjiu, dan Indra Kurniawan			
Ernawati, Budi Pramono Jati, Dedi Nugroho	2023	Analisa Performa Kinerja PLTS Off Grid yang Dirangkai Secara Seri Paralel untuk Penerangan Ruangan	Penelitian ini membahas perancangan PLTS yang dihubungkan paralel dan seri-paralel (Campuran) dan mengetahui daya yang dihasilkan panel surya ketika susunannya berbeda.
Oktaria Handayani, Ginan Alvaningsih, Dwi Anggaini, Iwa Garniwa, Henry Pariaman, Musa Partahi Marbuni	2023	Rancang Bangun DC House Berbasis PLTS di Kampung Gadog Desa Sukamahi Kec. Sukaresmi Kab. Cianjur-Jawa Barat	Pembahasan penelitian ini berfokus pada perancangan dan pembangunan DC House berbasis PLTS off-grid di Kampung Gadog sebagai solusi keterbatasan suplai listrik, dengan pemanfaatan energi surya untuk penerangan, pompa air DC, serta pengisian portable power bagi warga.
Haryanto, Firman Khairurrizal, Dian Neipa Purnamasari, Miftachul Ulum, dan Fitri Damayanti	2024	Smart Monitoring Sistem Panel Surya Berbasis Internet Of Things (IoT)	Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi sistem <i>smart monitoring</i> panel surya berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor PZEM-004T dan mikrokontroler ESP32 untuk memantau tegangan, arus, daya, serta faktor daya secara real-time melalui web atau smartphone

Sukahir, Asep Muhamad Soleh, Annisa Baby Callista, M. Alamsyah,	2024	Edukasi dan Pelatihan Instalasi Panel Surya Sebagai Solusi Energi Berkelanjutan	Pembahasan penelitian ini menitikberatkan pada edukasi dan pelatihan instalasi panel surya bagi siswa SMK sebagai upaya meningkatkan pengetahuan dan keterampilan praktis dalam pemanfaatan energi terbarukan yang berkelanjutan.
Zufar Permana Muqorrobin, Reza Rahmadian, Mahendra Widyartono, Ayusta Lukita Wardani	2025	Rancang Bangun Monitoring PLTS Off-Grid Menggunakan ESP-32 dan HT- UV5R Pada Pesanggrahan Gordomulyo di Magetan	Penelitian ini membahas pengembangan sistem pemantauan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off- grid berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP-32 untuk mengumpulkan data seperti tegangan, arus, dan daya dari panel surya, serta HT-UV5R untuk komunikasi data secara nirkabel.
Reza Aulia Syuhadah	2025	Analisis Teknis dan Ekonomis Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya Atap Terpusat	Pembahasan penelitian ini berfokus pada analisis teknis dan ekonomis penerapan sistem Penerangan Jalan Umum Tenaga Surya (PJUTS) berbasis PLTS atap terpusat sebagai solusi untuk mengatasi pencurian komponen, meningkatkan keamanan, serta menilai kelayakan investasi

			melalui simulasi kinerja energi dan perhitungan biaya.
--	--	--	--

2.4.2 Identifikasi Gap Penelitian

Berdasarkan tinjauan terhadap berbagai penelitian yang relevan, ditemukan beberapa gap penelitian yang perlu diisi untuk mendukung pengembangan sistem PLTS Off-Grid dengan monitoring berbasis IoT. Gap tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pemantauan Kinerja Sistem PLTS secara Real-Time dan Efektif

- Penelitian oleh Haryanto et al. (2024) dan Zufar et al. (2025) fokus pada smart monitoring sistem PLTS dengan *IoT*, namun belum secara spesifik membahas integrasi antara pemeliharaan dan edukasi dalam satu platform yang sama. Sistem yang ada belum sepenuhnya memperlihatkan peran edukasi dalam pemantauan, yang sangat relevan di dunia pendidikan.
- Gap: Penelitian ini akan mengisi kekosongan terkait implementasi sistem monitoring PLTS *Off-Grid* yang tidak hanya mendukung pemeliharaan teknis tetapi juga menyediakan fitur edukasi bagi siswa SMK, dengan menampilkan data energi terbarukan yang dapat diakses secara langsung untuk pembelajaran.

2. Integrasi Teknologi IoT dalam Sistem PLTS

- Penelitian seperti yang dilakukan oleh Tri Joko Pramono et al. (2017) dengan penggunaan logika *fuzzy* dalam pengaturan baterai dan Hilman Adlan (2020) yang mengembangkan sistem Solar Home System (SHS) berbasis *IoT* sudah menjelaskan bagaimana teknologi IoT meningkatkan efisiensi pengaturan daya. Namun, masih terbatas pada penggunaan perangkat dan aplikasi di luar konteks dunia pendidikan.
- Gap: Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring berbasis *IoT* pada PLTS *Off-Grid* yang terintegrasi dalam konteks pendidikan, khususnya untuk edukasi energi terbarukan di SMKN 1 Majalaya.

3. Optimalisasi Sistem PLTS untuk Daerah Terpencil

- Beberapa penelitian, seperti Oktaria Handayani et al. (2023) dan Ella Putri Niga Pangestu et al. (2020), fokus pada penerapan PLTS untuk daerah yang tidak

terjangkau listrik PLN atau untuk keperluan rumah tangga. Namun, implementasi di lingkungan sekolah dengan kapasitas terbatas (1,2 kWp) dan kebutuhan akan sistem monitoring yang handal belum sepenuhnya dibahas dalam penelitian sebelumnya.

- Gap: Penelitian ini akan mengembangkan sistem PLTS Off-Grid di SMKN 1 Majalaya dengan kapasitas terbatas yang dilengkapi dengan sistem monitoring berbasis IoT yang lebih efisien dan terjangkau untuk lingkungan pendidikan.

4. Pemanfaatan IoT untuk Pengendalian dan Pemeliharaan

- Penelitian oleh Denis et al. (2022) dan Reza Aulia Syuhadah (2025) menunjukkan potensi besar dalam penggunaan *IoT* untuk pengendalian dan pengawasan sistem energi, namun belum banyak yang mengintegrasikan *IoT* dengan sistem PLTS khusus untuk tujuan pendidikan dan pemeliharaan sistem energi.
- Gap: Penelitian ini akan mengisi gap ini dengan mengembangkan sistem pemantauan real-time yang tidak hanya berfokus pada keandalan sistem tetapi juga digunakan sebagai sarana pendidikan praktis untuk siswa di SMK.

5. Kurangnya Riset tentang Pemantauan Efisiensi Energi untuk Pendidikan SMK

- Penelitian oleh Sukahir et al. (2024) tentang edukasi instalasi panel surya menunjukkan potensi pendidikan tentang energi terbarukan, namun belum banyak yang membahas secara mendalam tentang pemantauan efisiensi energi di SMK untuk mendukung pembelajaran langsung mengenai efektivitas sistem PLTS.
- Gap: Penelitian ini akan mengisi kekosongan dengan menawarkan sistem monitoring yang komprehensif yang mendemonstrasikan efisiensi energi yang dihasilkan oleh PLTS di SMKN 1 Majalaya, sekaligus menjadi media pembelajaran yang interaktif bagi siswa.

2.5 Landasan Teori dan Perhitungan

2.5.1 Persamaan Perhitungan PLTS (Energy Yield, Sizing Baterai)

1. Energy Yield pada PLTS

Energy Yield adalah jumlah energi yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam periode tertentu, biasanya dihitung dalam kilowatt-jam

(kWh). Perhitungan energy yield penting untuk menentukan seberapa efektif sistem PLTS dalam menghasilkan energi dari radiasi matahari yang tersedia, Selain itu, energy yield juga dipengaruhi oleh faktor derating yang mencakup penurunan performa karena suhu tinggi, debu, dan faktor lingkungan lainnya. [21]

Persamaan umum untuk menghitung energy yield pada PLTS adalah sebagai berikut:

$$E_{yield} = A \times G \times \eta \quad (2.6)$$

E_{yield} = Energi yang dihasilkan (kWh)

A = Luas panel surya (m^2)

G = Irradiance (radiasi matahari) dalam kW/m^2

H = Efisiensi sistem (antara 0.75 hingga 0.85, tergantung pada jenis panel surya dan kondisi operasional)

2. Sizing Baterai untuk PLTS Off-Grid

Sizing baterai diperlukan untuk memastikan sistem PLTS Off-Grid memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik selama periode tanpa cahaya matahari (malam atau cuaca mendung). Perhitungan kapasitas baterai didasarkan pada energi yang disimpan dan DoD (Depth of Discharge). [8]

Persamaan untuk menghitung kapasitas baterai adalah sebagai berikut:

$$C_{bat} = \frac{E_{load} \times N}{V_{bat} \times DoD} \quad (2.7)$$

Dimana:

C_{bat} = Kapasitas baterai (Ah)

E_{load} = Kebutuhan energi harian total (Wh)

N = Jumlah hari otonomi (misalnya 2–3 hari)

V_{bat} = Tegangan sistem baterai (V)

DoD = Kedalaman pengosongan baterai yang aman (biasanya 50%–80%)

3. Penentuan Kapasitas Inverter

Kapasitas inverter dihitung berdasarkan daya puncak beban yang diperlukan, dengan mempertimbangkan faktor keselamatan atau safety factor (SF). Persamaan untuk menghitung kapasitas inverter adalah:

$$P_{inv} = P_{peak} \times SF \quad (2.8)$$

Dimana:

P_{inv} = Kapasitas inverter (W)

P_{peak} = Total daya beban maksimum yang mungkin digunakan bersamaan (W)

SF = Safety factor (biasanya 1,25–1,5 untuk mengantisipasi lonjakan daya pada saat start motor atau peralatan listrik induktif) [8]

2.5.2 Parameter Kinerja (Efficiency, PR, SoC, DOD)

Dalam perancangan dan pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), penting untuk memahami berbagai parameter kinerja yang mempengaruhi efisiensi sistem dan kualitas energi yang dihasilkan. Parameter-parameter ini digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik sistem PLTS bekerja dan apakah sistem tersebut memenuhi target performa yang diinginkan.

1. Efficiency (Efisiensi)

Efisiensi dalam konteks PLTS mengacu pada seberapa efektif panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Efisiensi panel surya dapat dipengaruhi oleh

berbagai faktor, seperti suhu, orientasi panel, dan kualitas komponen. Secara umum, efisiensi sistem PLTS dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{E_{output}}{E_{input}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dimana:

η = Efisiensi sistem (%)

E_{output} = Energi yang dihasilkan oleh panel surya (Wh)

E_{input} = Energi yang diterima oleh panel (Wh) [8]

2. Performance Ratio (PR)

Performance Ratio (PR) adalah parameter yang digunakan untuk menilai kinerja sistem PLTS, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti suhu, debu, dan kerugian teknis lainnya yang dapat mempengaruhi output sistem. PR adalah rasio antara energi aktual yang dihasilkan dan energi yang diharapkan berdasarkan kondisi ideal.

Persamaan untuk menghitung PR adalah sebagai berikut:

$$PR = \frac{E_{actual}}{E_{theoretical}} \times 100\% \quad (2.10)$$

Dimana:

E_{actual} = Energi yang dihasilkan oleh sistem (Wh)

$E_{theoretical}$ = Energi yang diharapkan berdasarkan irradiance dan efisiensi panel surya (Wh)

Nilai PR yang tinggi menunjukkan sistem yang beroperasi dengan baik, sementara nilai PR yang rendah menunjukkan adanya kerugian atau penurunan efisiensi dalam sistem. [8]

3. State of Charge (SoC)

State of Charge (SoC) adalah parameter yang menunjukkan tingkat pengisian baterai pada suatu waktu tertentu, yang dinyatakan sebagai persentase dari kapasitas baterai penuh. SoC penting untuk menentukan berapa banyak energi yang tersedia dalam baterai dan kapan pengisian ulang diperlukan. [1]

Persamaan untuk menghitung SoC adalah:

$$SoC = \frac{E_{stored}}{E_{max}} \times 100\% \quad (2.11)$$

Dimana:

E_{stored} = Energi yang tersimpan dalam baterai (Wh)

E_{max} = Kapasitas maksimum baterai (Wh)

4. Depth of Discharge (DoD)

Depth of Discharge (DoD) adalah parameter yang menggambarkan seberapa banyak energi dari baterai yang telah digunakan. DoD menunjukkan berapa persen kapasitas baterai yang telah terpakai. Semakin tinggi DoD, semakin rendah umur pakai baterai, karena pengosongan berlebihan dapat merusak sel baterai. Biasanya, untuk memperpanjang umur baterai, DoD tidak boleh lebih dari 50–80%. [3]

Persamaan untuk menghitung DoD adalah:

$$DoD = \frac{E_{used}}{E_{max}} \times 100\% \quad (2.12)$$

Dimana:

E_{used} = Energi yang telah digunakan dari baterai (Wh)

E_{max} = Kapasitas maksimum baterai (Wh)

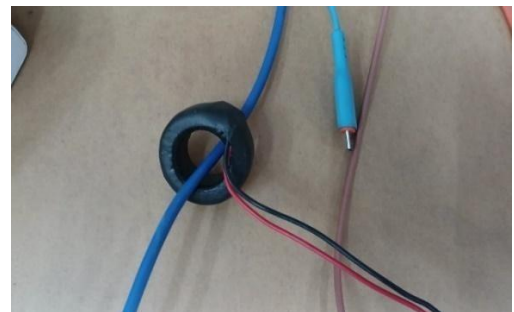
2.5.3 Teori Sensor dan Akuisisi Data

1. Teori Sensor

Sensor merupakan transduser yang mengubah variasi mekanis, magnetis, panas, cahaya, maupun kimia menjadi sinyal listrik dan berperan penting dalam sistem pengendalian. Penelitian ini menggunakan sensor PZEM 004T-100A (V4.0), yaitu modul multifungsi untuk mengukur tegangan, arus, daya, dan energi. [22], [23] Alat ini khusus digunakan di dalam ruangan dan beban yang terpasang tidak boleh melebihi daya maksimum yang ditentukan [3]. Bentuk fisik sensor ditunjukkan pada Gambar 2.14.



(a)

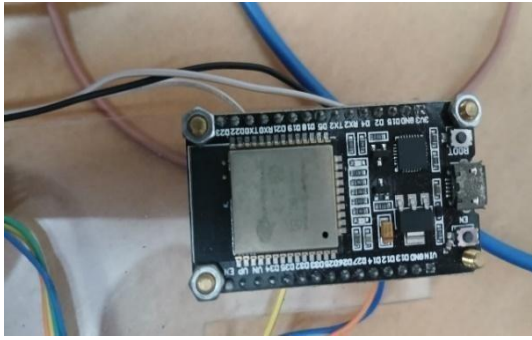


(b)

Gambar 2.14. Sensor PZEM 004T-100A(V4.0) (a) Tampak Atas Sensor, (b) Sensor Arus (CT)

2. Akuisisi Data dengan ESP32 dan Sensor PZEM-004T

Akuisisi data pada sistem monitoring PLTS Off-Grid dilakukan menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler berkemampuan Wi-Fi yang berfungsi menghubungkan sensor dengan server dalam aplikasi Internet of Things. Sensor PZEM-004T mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, daya, dan energi, kemudian ESP32 membaca dan mengirimkan data tersebut ke server atau dashboard web melalui protokol komunikasi HTTP. Melalui proses ini, data dikumpulkan, diproses, dan diteruskan untuk memungkinkan pemantauan PLTS secara real-time. Peran ESP32 sebagai gateway menjadikan sistem akuisisi data lebih efisien, memungkinkan pemeliharaan prediktif dan deteksi dini terhadap gangguan, sehingga kinerja PLTS Off-Grid dapat terus dioptimalkan [3], [4], [6]. Gambar 2.15 merupakan ESP yang digunakan pada penelitian.



(a)



(b)

Gambar 2.15. ESP 32 (a) Tampak Atas, (b) Tampak Bawah