# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian ini dilakukan kajian literatur dengan tujuan untuk memperoleh referensi yang sesuai dengan topik yang dibahas. Sumber referensi tersebut diperoleh dari berbagai literatur seperti buku, artikel ilmiah, jurnal, maupun penelitian terdahulu yang relevan. Adapun beberapa referensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan oleh [13] membahas mengenai metode estimasi State of Health (SoH) pada baterai lithium-ion menggunakan analisis data operasional baterai. Dalam penelitian tersebut digunakan parameter tegangan, arus, dan suhu baterai untuk menentukan kondisi kesehatan baterai selama proses pengisian dan pengosongan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode analisis data operasional mampu memberikan estimasi kondisi kesehatan baterai dengan tingkat akurasi yang cukup baik sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengelolaan sistem penyimpanan energi.
2. Penelitian lain yang dilakukan oleh [14] mengkaji metode estimasi Remaining Useful Life (RUL) pada baterai lithium-ion menggunakan data siklus pengisian dan pengosongan baterai. Penelitian ini menunjukkan bahwa analisis terhadap pola penggunaan baterai dapat digunakan untuk memperkirakan sisa umur pakai baterai secara lebih akurat. Hasil penelitian tersebut memberikan kontribusi dalam pengembangan metode prediksi umur baterai yang dapat digunakan dalam berbagai sistem penyimpanan energi.
3. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh [5] mengembangkan model prediksi kondisi baterai lithium-ion dengan memanfaatkan data operasional baterai yang dikumpulkan secara berkala. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan model prediksi berbasis data dapat meningkatkan kemampuan

dalam mendeteksi degradasi baterai sejak dini sehingga dapat membantu dalam proses pemeliharaan baterai secara lebih efektif.

4. Penelitian yang dilakukan oleh [15] membahas mengenai sistem monitoring baterai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis Internet of Things (IoT). Dalam penelitian tersebut digunakan beberapa sensor untuk memantau parameter operasional baterai seperti tegangan, arus, dan suhu baterai secara real-time. Data yang diperoleh kemudian dikirimkan ke sistem monitoring berbasis internet sehingga kondisi baterai dapat dipantau secara jarak jauh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT dapat meningkatkan efektivitas dalam proses pemantauan sistem PLTS.
5. Penelitian lain yang dilakukan oleh [16] mengembangkan sistem monitoring baterai berbasis IoT untuk sistem energi terbarukan. Penelitian ini memanfaatkan mikrokontroler dan sensor untuk mengumpulkan data operasional baterai yang kemudian dikirimkan ke server untuk dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT mampu memberikan informasi kondisi baterai secara lebih cepat dan akurat sehingga dapat mendukung proses pengelolaan sistem energi secara lebih optimal.
6. Penelitian yang dilakukan oleh Zhou et al[17] meneliti metode prediksi kondisi baterai lithium-ion menggunakan pendekatan analisis data berbasis machine learning. Dalam penelitian tersebut digunakan berbagai parameter operasional baterai untuk melatih model prediksi sehingga mampu memperkirakan kondisi kesehatan baterai secara lebih akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode berbasis pembelajaran mesin dapat meningkatkan akurasi dalam memprediksi kondisi baterai dibandingkan metode konvensional.
7. Penelitian lainnya dilakukan oleh [18] yang mengembangkan sistem pemantauan baterai pada sistem PLTS menggunakan teknologi IoT berbasis mikrokontroler. Sistem yang dikembangkan mampu memantau parameter baterai seperti tegangan, arus, dan suhu secara real-time melalui jaringan internet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring tersebut dapat membantu dalam mengetahui kondisi baterai secara lebih cepat sehingga dapat mendukung proses pemeliharaan sistem PLTS secara lebih efektif.

8. Penelitian yang dilakukan oleh [19] mengkaji studi kelayakan pembangunan PLTS di Dusun Toalang, Kalimantan Barat, sebuah wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Penelitian ini menganalisis potensi energi matahari menggunakan software PVSyst dengan memperhitungkan data suhu udara, kelembapan, serta intensitas radiasi matahari di lokasi tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki potensi radiasi matahari yang cukup baik untuk dikembangkan menjadi PLTS, sehingga dapat dijadikan acuan dalam menilai kelayakan lokasi penelitian dari sisi ketersediaan sumber energi matahari.
9. Penelitian lain yang dilakukan oleh [20], [21] membahas studi kelayakan pembangunan PLTS berkapasitas 10 kWp di Graha YPK PLN sebagai sistem cadangan untuk mengurangi ketergantungan terhadap listrik konvensional. Penelitian ini merancang PLTS dengan sistem on grid menggunakan modul panel surya berkapasitas 450 Wp beserta sebuah inverter berkapasitas 15330 Watt. Hasil kajian menunjukkan bahwa perhitungan rata rata radiasi matahari serta estimasi biaya energi menjadi faktor penting dalam menentukan kelayakan pemasangan PLTS pada skala bangunan komersial.
10. .Penelitian yang dilakukan oleh [21] mengkaji konsep integrasi fotovoltaik sistem on grid pada gedung STT PLN yang saat ini dikenal sebagai Institut Teknologi PLN. Penelitian ini menganalisis potensi pemasangan panel surya di atap gedung kampus untuk mendukung kebutuhan listrik internal. Hasil penelitian tersebut memberikan gambaran mengenai kelayakan teknis penerapan PLTS di lingkungan kampus, yang relevan sebagai referensi bagi penelitian PLTS berskala kecil yang dilakukan pada lokasi serupa.
11. Penelitian lain yang dilakukan oleh [22], [23] membahas penyimpanan energi pada baterai yang digunakan dalam sistem PLTS. Penelitian ini mengulas karakteristik baterai sebagai media penyimpan energi listrik hasil konversi energi matahari, termasuk faktor faktor yang memengaruhi efisiensi penyimpanan dan pengeluaran daya baterai. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa kinerja baterai sangat berpengaruh terhadap keandalan pasokan listrik pada sistem PLTS, terutama saat kondisi tanpa sinar matahari.

12. Penelitian yang dilakukan oleh [23] mengkaji perilaku pengisian dan pengosongan komponen penyimpan energi listrik melalui analogi aliran air pada wadah yang saling terhubung. Meskipun objek penelitian tersebut berupa kapasitor, prinsip dasar mengenai hubungan antara tegangan, arus, dan kondisi pengisian yang dibahas dapat digunakan untuk memahami perilaku serupa pada baterai lithium-ion yang mengalami proses charge dan discharge secara berulang. Penelitian ini telah dipublikasikan pada jurnal internasional terindeks Scopus sehingga dapat menjadi rujukan yang kredibel dalam memahami konsep dasar penyimpanan energi listrik.

## 2.2 Landasan Teori

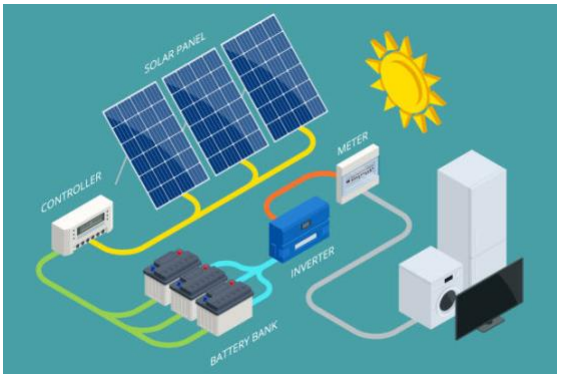
### 2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkitan yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energi listrik. Dalam penerapannya, PLTS dapat dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi berupa baterai untuk menjaga ketersediaan energi listrik ketika intensitas radiasi matahari tidak mencukupi. Pahiyanti, Sukmajati, dan Tangkilisan melakukan perencanaan PLTS pada Pos Pengamatan Gunung Soputan dengan menggunakan panel surya, solar charge controller, baterai, dan inverter sebagai komponen utama sistem. Hasil perencanaan tersebut menunjukkan bahwa baterai berperan sebagai media penyimpanan energi dalam memenuhi kebutuhan beban sistem PLTS [24]

Dalam implementasinya, PLTS terdiri dari beberapa komponen utama yaitu panel surya, charge controller, inverter, dan baterai. Baterai memiliki peran penting sebagai media penyimpanan energi yang digunakan saat tidak tersedia sinar matahari. Integrasi baterai dalam sistem PLTS memungkinkan peningkatan keandalan dan fleksibilitas sistem, terutama pada sistem off-grid dan hybrid [25].

Seiring perkembangan teknologi, sistem PLTS mulai dikombinasikan dengan teknologi digital seperti Internet of Things (IoT) untuk mendukung monitoring dan kontrol secara real-time. Hal ini memungkinkan pengumpulan data operasional sistem secara kontinu, yang sangat penting dalam analisis performa dan prediksi kondisi komponen, khususnya baterai [10].

Pemanfaatan PLTS tidak hanya digunakan sebagai sumber energi listrik, tetapi juga dapat diterapkan untuk memenuhi kebutuhan beban rumah tangga dengan memanfaatkan baterai sebagai penyimpan energi. Pahiyanti, Sukmajati, dan Indrianto membahas perancangan kompor listrik yang menggunakan PLTS sebagai sumber energi untuk kebutuhan listrik rumah tangga. Penelitian tersebut menunjukkan penerapan PLTS sebagai sumber energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan beban listrik dengan memanfaatkan sistem penyimpanan energi [26]



Gambar 2.1 Rangkaian PLTS

Seiring berkembangnya teknologi Internet of Things (IoT), sistem PLTS tidak hanya berfungsi sebagai pembangkit energi listrik, tetapi juga dapat diintegrasikan dengan sistem monitoring berbasis jaringan internet. Integrasi tersebut memungkinkan parameter penting, seperti tegangan, arus, daya, serta kondisi baterai dipantau secara real-time sehingga mempermudah proses pengawasan, analisis performa, dan pemeliharaan sistem. Penerapan monitoring berbasis IoT pada PLTS juga mampu meningkatkan keandalan sistem melalui penyediaan data operasional yang berkelanjutan untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan energi [10], [25], [8], [27].

### 2.2.2 Baterai Lithium-ion dan State of Health (SoH)

Baterai merupakan salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi sebagai media penyimpanan dan penyedia energi ketika sumber utama tidak tersedia. Kinerja baterai dapat dievaluasi melalui beberapa parameter, seperti tegangan sel, tegangan bank baterai, kondisi pengisian, serta kemampuan baterai dalam menyuplai beban. Koerniawan et al. menganalisis kinerja sistem baterai

110 VDC pada Gardu Induk 150 kV Soppeng berdasarkan parameter tegangan sel, tegangan battery bank, sistem pengisian, dan kemampuan baterai dalam menyuplai beban DC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa evaluasi parameter tersebut dapat digunakan untuk mengetahui kelayakan dan keandalan sistem baterai sebagai sumber daya cadangan [28]

Penurunan performa baterai umumnya ditunjukkan melalui perubahan kapasitas dan peningkatan resi[28]stansi internal. Untuk menggambarkan kondisi tersebut digunakan parameter State of Health (SoH), yaitu indikator yang menyatakan tingkat kesehatan baterai dibandingkan kondisi awalnya. SoH biasanya dinyatakan dalam persentase kapasitas aktual terhadap kapasitas nominal [14].

Dalam praktiknya, baterai dianggap telah mencapai batas akhir penggunaan ketika nilai SoH turun di bawah 80%. Kondisi ini menunjukkan bahwa baterai sudah tidak mampu bekerja secara optimal dan berpotensi menurunkan kinerja sistem secara keseluruhan [3], [2]. Oleh karena itu, pemantauan nilai SoH menjadi aspek penting dalam sistem manajemen baterai.



Gambar 2.2 Baterai Lithium Ion PLTS

Nilai State of Health (SoH) merupakan indikator utama dalam menentukan kondisi kesehatan baterai lithium-ion. Estimasi SoH dilakukan berdasarkan perubahan kapasitas dan karakteristik operasional baterai selama proses pengisian maupun pelepasan energi. Oleh karena itu, sistem monitoring berbasis IoT berperan penting dalam menyediakan data operasional secara kontinu yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk analisis degradasi baterai maupun pengembangan model prediksi SoH. Penggunaan sistem monitoring secara real-time juga mendukung

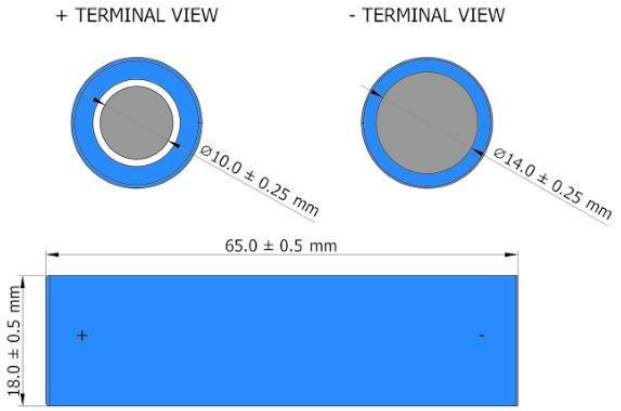
penerapan predictive maintenance pada sistem penyimpanan energi [14], [17], [12], [10], .

### 2.2.3 Degradasi Baterai Lithium-ion

Degradasi baterai lithium-ion merupakan proses alami yang menyebabkan penurunan performa seiring waktu penggunaan. Salah satu penyebab utama degradasi adalah terbentuknya lapisan Solid Electrolyte Interphase (SEI) pada permukaan elektroda, yang mengakibatkan berkurangnya jumlah ion lithium aktif dalam proses reaksi [3], [1]

Selain itu, faktor operasional seperti suhu tinggi, arus pengisian yang besar, serta pola penggunaan baterai juga berpengaruh terhadap laju degradasi. Kondisi tersebut dapat memicu berbagai fenomena seperti lithium plating, kerusakan struktur elektroda, serta peningkatan resistansi internal baterai [2], [29]

Karakteristik degradasi baterai umumnya tidak bersifat linier. Dalam beberapa kasus, penurunan kapasitas terjadi secara perlahan di awal, kemudian mengalami penurunan drastis pada fase tertentu yang dikenal sebagai knee point. Fenomena ini menjadi tantangan dalam proses pemodelan karena memerlukan metode yang mampu menangkap pola perubahan yang kompleks [4].




Gambar 2.3 Baterai Lithium-Ion

### 2.2.4 Metode Estimasi State of Health (SoH)

Estimasi State of Health (SoH) dapat dilakukan menggunakan berbagai pendekatan, mulai dari metode konvensional hingga metode berbasis data. Metode konvensional umumnya menggunakan pendekatan berbasis model fisik atau

pengukuran langsung seperti coulomb counting dan analisis kapasitas. Meskipun metode ini sederhana, akurasinya seringkali terbatas terutama pada kondisi operasional yang berubah-ubah [2].

Seiring perkembangan teknologi, metode berbasis data mulai banyak digunakan karena mampu memberikan hasil yang lebih akurat. Pendekatan ini memanfaatkan data historis baterai seperti tegangan, arus, dan suhu untuk membangun model prediksi menggunakan algoritma machine learning [17].

Berbagai algoritma telah dikembangkan untuk estimasi SoH, di antaranya Support Vector Regression (SVR), Gaussian Process Regression (GPR), serta jaringan saraf tiruan seperti Long Short-Term Memory (LSTM). Model berbasis LSTM memiliki keunggulan dalam menangkap pola data yang bersifat temporal sehingga cocok digunakan untuk memodelkan degradasi baterai [5] . Selain itu, pendekatan hybrid yang menggabungkan model fisik dan data-driven juga menunjukkan peningkatan performa dalam berbagai kondisi operasional [7].

### 2.2.5 Estimasi Umur Pakai Baterai (Remaining Useful Life/RUL)

Estimasi umur pakai baterai atau Remaining Useful Life (RUL) merupakan parameter yang digunakan untuk memprediksi sisa waktu penggunaan baterai sebelum mencapai kondisi akhir. Informasi ini sangat penting dalam perencanaan pemeliharaan serta penggantian baterai agar sistem tetap beroperasi secara optimal [11].

Prediksi RUL umumnya didasarkan pada analisis tren degradasi baterai yang diperoleh dari data historis. Dengan memanfaatkan pola perubahan kapasitas, model dapat memperkirakan kapan baterai akan mencapai batas SoH tertentu. Hal ini memungkinkan pengguna untuk melakukan tindakan preventif sebelum terjadi kegagalan sistem.

Metode yang digunakan dalam prediksi RUL terus berkembang, terutama dengan adanya pendekatan machine learning dan deep learning. Model seperti LSTM, neural network, serta kombinasi dengan metode filtering seperti Kalman Filter mampu meningkatkan akurasi prediksi [30]. Selain itu, metode berbasis analisis incremental capacity dan Gaussian Process juga digunakan untuk

memahami karakteristik degradasi secara lebih detail [31].

### 2.2.6 Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem Internet of Things karena telah dilengkapi dengan modul WiFi dan Bluetooth dalam satu chip. Kemampuan ini memungkinkan ESP32 untuk melakukan komunikasi data secara langsung ke server atau cloud tanpa memerlukan perangkat tambahan. Selain itu, ESP32 memiliki performa yang cukup tinggi dengan prosesor dual-core serta konsumsi daya yang relatif rendah sehingga cocok digunakan dalam sistem monitoring berbasis real-time.




Gambar 2.4 ESP32 Devkit V1

ESP32 DevKit V1 merupakan salah satu papan pengembangan (development board) berbasis mikrokontroler ESP32 yang banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan sistem Internet of Things. Board ini dirancang untuk memudahkan proses prototyping karena telah dilengkapi dengan berbagai fitur pendukung seperti pin input/output digital dan analog, antarmuka komunikasi, serta regulator tegangan. ESP32 DevKit V1 umumnya menggunakan chip ESP32-WROOM-32 yang memiliki prosesor dual-core dengan kecepatan hingga 240 MHz, serta dilengkapi dengan memori SRAM dan flash yang cukup besar untuk menjalankan aplikasi berbasis IoT. Selain itu, board ini sudah memiliki konektivitas WiFi dan Bluetooth terintegrasi sehingga sangat cocok digunakan untuk sistem monitoring berbasis jaringan internet tanpa memerlukan modul tambahan [8].

Tabel 2.1 Spesifikasi ESP32 Devkit V1

| NO | Fitur | Keterangan |
|---|---|---|
| 1 | Tegangan Operasi | 2,2V – 3,6V |
| 2 | Tegangan Vin | Maks 5V |
| 3 | CPU | Tensilica Xtensa LX6 Dual Core 32 Bit |

| | | |
|---|---|---|
| 4 | SRAM | 520 KB |
| 5 | FLASH | 2MB |
| 6 | Arus kerja | 80 Ma |
| 7 | Pemrograman | C, C++, Python, Lua |
| 8 | Wi-Fi | 802.11 b/g/n (2.4 GHz) |
| 9 | Bluetooth | 4.2 BR/EDR + BLE |
| 10 | UART | 3 |
| 11 | GPIO | 32 |
| 12 | SPI | 4 |
| 13 | I2C | 2 |
| 14 | PWM | 8 |
| 15 | ADC | 18 (12 bit) |
| 16 | DAC | 2 (8-bit) |

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem monitoring berbasis IoT karena telah dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi, memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi dengan sensor. Dalam sistem monitoring PLTS, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali untuk membaca data sensor, mengolah data, dan mengirimkan informasi ke server cloud secara real-time sehingga proses pemantauan dapat dilakukan secara efektif dan berkelanjutan [32], [27].

### 2.2.7 Firebase

Firebase merupakan platform Backend-as-a-Service (BaaS) yang dikembangkan oleh Google untuk mendukung pengembangan aplikasi web maupun aplikasi seluler. Firebase menyediakan berbagai layanan, seperti autentikasi pengguna, penyimpanan data, cloud messaging, hosting, serta basis data Realtime Database yang memungkinkan sinkronisasi data secara langsung antara perangkat dan server [7].

Dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT), Firebase banyak digunakan sebagai media penyimpanan dan pertukaran data antara mikrokontroler, seperti ESP32, dengan aplikasi monitoring. Data hasil pembacaan sensor dapat dikirimkan ke Firebase melalui jaringan internet sehingga dapat dipantau secara real-time dari berbagai perangkat yang terhubung [10], [7].

Salah satu layanan utama Firebase adalah Firebase Realtime Database, yaitu

basis data berbasis cloud yang menyimpan data dalam format JavaScript Object Notation (JSON). Setiap perubahan data akan secara otomatis disinkronkan ke seluruh klien yang terhubung tanpa memerlukan proses refresh secara manual. Karakteristik tersebut menjadikan Firebase sangat sesuai untuk aplikasi monitoring dan kendali berbasis IoT yang membutuhkan komunikasi data secara cepat dan real-time [7].




Gambar 2.5 Platform Firebase

Firebase Realtime Database merupakan salah satu platform cloud yang banyak digunakan dalam implementasi sistem monitoring IoT karena mampu melakukan sinkronisasi data secara real-time. Data hasil pembacaan sensor yang dikirimkan oleh ESP32 dapat disimpan secara otomatis pada server dan ditampilkan melalui dashboard monitoring sehingga pengguna dapat mengakses informasi kondisi sistem kapan saja melalui jaringan internet. Selain mendukung penyimpanan data historis, Firebase juga mempermudah proses analisis data operasional baterai [7], [33].

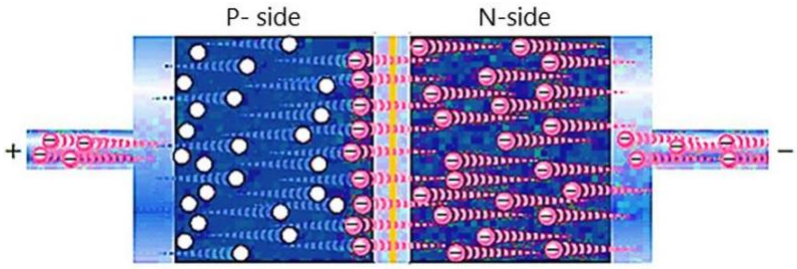
Kemudahan integrasi Firebase dengan berbagai platform pemrograman, termasuk ESP32 melalui pustaka Arduino, menjadikan Firebase sebagai salah satu solusi yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem monitoring berbasis IoT. Selain mudah diimplementasikan, Firebase juga memiliki skalabilitas yang baik sehingga mampu mendukung komunikasi data antara perangkat IoT dan aplikasi monitoring secara efisien [10], [7].

### 2.2.8 Solar Cell

Solar cell atau sel surya merupakan perangkat semikonduktor yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan material semikonduktor seperti silikon, energi foton akan membebaskan elektron sehingga menghasilkan aliran arus listrik. Struktur dasar solar cell terdiri dari lapisan tipe-p dan tipe-n yang membentuk junction, sehingga memungkinkan terjadinya pergerakan elektron secara terarah. Teknologi ini menjadi komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena mampu menghasilkan energi listrik secara langsung dari sumber energi terbarukan [1].

Dalam implementasinya, beberapa sel surya disusun menjadi modul dan kemudian dirangkai menjadi array untuk menghasilkan daya yang lebih besar sesuai kebutuhan sistem. Energi listrik yang dihasilkan oleh solar cell berupa arus searah (DC), sehingga dalam penggunaannya sering dikombinasikan dengan inverter untuk mengubahnya menjadi arus bolak-balik (AC). Kinerja solar cell sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas radiasi matahari, suhu, serta kondisi bayangan. Peningkatan suhu umumnya dapat menurunkan efisiensi sel surya, sedangkan kondisi shading dapat menyebabkan penurunan output daya secara signifikan.

Karena sifatnya yang bergantung pada kondisi alam, energi yang dihasilkan solar cell tidak selalu stabil. Oleh sebab itu, dalam sistem PLTS diperlukan komponen tambahan seperti baterai untuk menyimpan energi agar dapat digunakan saat malam hari atau ketika intensitas matahari rendah. Dalam penelitian ini, solar cell berperan sebagai sumber energi utama yang akan mengisi baterai lithium-ion. Data hasil pembangkitan seperti tegangan dan arus menjadi parameter penting yang digunakan dalam proses monitoring serta analisis kondisi baterai, khususnya dalam estimasi State of Health (SoH) dan umur pakai baterai berbasis sistem IoT [25].




Gambar 2.6 Prinsip Kerja Solar Cell

Pada dasarnya prinsip kerja dari *solar cell* dibagi menjadi 3 proses utama:

1. Penyerapan foton oleh semikonduktor elektronik tipe sambungan p-n untuk menghasilkan pembawa muatan (*electron-hole pairs*)
2. Pemisahan pembawa muatan yang dihasilkan oleh cahaya. Lubang – lubang pada sel surya menjauhi *junction* melalui tipe-p sedangkan elektron dapat bergerak melewati wilayah tipe-n dan dilanjutkan melalui sirkuit sebelum akhirnya bergabung.
3. Penggunaan elektron yang terpisah untuk mengisi lubang dan menghasilkan energi listrik.

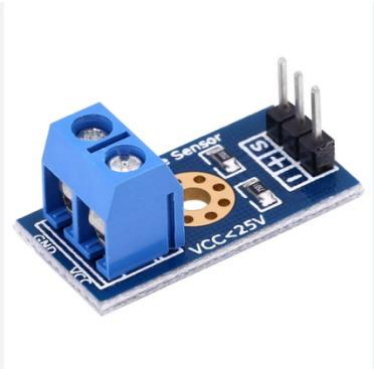
### 2.2.9 Sensor Voltage (Voltage Sensor Module)

Sensor Module atau modul sensor tegangan merupakan perangkat elektronika yang digunakan untuk mengukur besarnya tegangan DC pada suatu rangkaian dan mengubahnya menjadi sinyal analog yang dapat diproses oleh mikrokontroler. Modul ini banyak digunakan pada sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) karena memiliki rangkaian yang sederhana, biaya yang relatif rendah, serta mudah diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler seperti ESP32. Pada penelitian ini, sensor tegangan dimanfaatkan untuk memantau perubahan tegangan baterai lithium-ion secara real-time sebagai salah satu parameter utama dalam proses analisis kondisi baterai. Data tegangan yang diperoleh kemudian dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses, ditampilkan pada aplikasi monitoring, dan disimpan sebagai data operasional yang akan digunakan dalam proses prediksi State of Health (SoH) serta estimasi umur pakai baterai [10].

Prinsip kerja Voltage Sensor Module didasarkan pada metode pembagi

tegangan (voltage divider) yang terdiri atas dua resistor yang disusun secara seri. Rangkaian tersebut berfungsi menurunkan tegangan masukan sehingga berada dalam batas aman yang dapat dibaca oleh pin Analog-to-Digital Converter (ADC) pada mikrokontroler. Modul sensor tegangan 0–25 V umumnya menggunakan kombinasi resistor sebesar 30 kΩ dan 7,5 kΩ sehingga menghasilkan rasio pembagian tegangan sekitar 5:1. Dengan konfigurasi tersebut, tegangan masukan maksimum sebesar 25 V dapat diturunkan menjadi sekitar 5 V pada sisi keluaran sensor. Namun, karena ESP32 memiliki batas tegangan ADC sebesar 3,3 V, diperlukan proses kalibrasi agar hasil pengukuran tetap akurat dan tidak melebihi spesifikasi perangkat. Nilai analog yang diperoleh dari ADC selanjutnya dikonversi menjadi nilai tegangan aktual menggunakan faktor pembagi tegangan yang telah ditentukan.

Dalam penelitian ini, sensor tegangan berfungsi sebagai sumber data utama untuk memperoleh karakteristik operasional baterai lithium-ion selama proses pengisian maupun pelepasan daya pada sistem PLTS. Data tegangan yang diperoleh dikombinasikan dengan parameter lain seperti arus, suhu, dan jumlah siklus pengisian untuk membentuk basis data yang digunakan dalam proses analisis kondisi baterai.




Gambar 2.7 Sensor Voltage

Keakuratan pengukuran tegangan sangat berpengaruh terhadap kualitas data yang digunakan dalam model prediksi SoH dan estimasi Remaining Useful Life (RUL), karena perubahan karakteristik tegangan merupakan salah satu indikator yang mencerminkan degradasi performa baterai seiring bertambahnya usia pemakaian. Oleh karena itu, penggunaan sensor tegangan yang telah dikalibrasi

dengan baik menjadi langkah penting untuk meningkatkan keandalan sistem monitoring dan akurasi model prediksi berbasis data operasional [14], [6], [6], [3].

### 2.2.10 Faktor yang Memengaruhi Kinerja Sistem Baterai

Kinerja sistem baterai lithium-ion pada PLTS sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor yang bekerja secara simultan dan saling berkaitan. Salah satu faktor paling dominan adalah suhu operasional. Baterai lithium-ion memiliki rentang suhu kerja optimal antara 15°C hingga 35°C. Apabila suhu melebihi batas tersebut, laju reaksi kimia internal akan meningkat secara tidak terkendali, yang pada akhirnya mempercepat pembentukan lapisan Solid Electrolyte Interphase (SEI) dan memicu degradasi elektroda secara lebih cepat. Sebaliknya, pada suhu yang terlalu rendah, viskositas elektrolit meningkat sehingga pergerakan ion litium menjadi terhambat dan kapasitas efektif baterai dapat turun secara signifikan. Penelitian yang dilakukan oleh Sarikurt et al. (2024) menyatakan bahwa paparan suhu tinggi secara berkelanjutan merupakan salah satu faktor utama yang mempercepat degradasi kapasitas baterai lithium-ion pada sistem penyimpanan energi [1]

Faktor kedua yang tidak kalah penting adalah tingkat C-rate, yaitu rasio antara arus pengisian atau pengosongan terhadap kapasitas nominal baterai. Pengisian atau pengosongan dengan C-rate yang tinggi dapat menyebabkan tekanan mekanik pada struktur elektroda akibat ekspansi dan kontraksi material aktif yang terjadi terlalu cepat. Kondisi ini dalam jangka panjang dapat mengakibatkan keretakan partikel elektroda dan hilangnya kontak listrik antara material aktif dengan kolektor arus. Selain itu, pengisian dengan arus besar pada kondisi tegangan baterai yang sudah tinggi berisiko memicu fenomena lithium plating, yaitu pengendapan litium metalik pada permukaan anoda yang sangat berbahaya karena dapat mengurangi kapasitas baterai secara permanen dan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan. Khan et al. (2025) dalam penelitiannya mengonfirmasi bahwa peningkatan C-rate secara langsung berkorelasi dengan percepatan peningkatan resistansi internal dan penurunan kapasitas baterai lithium-ion [2].

Faktor ketiga adalah Depth of Discharge (DoD), yaitu seberapa dalam baterai dikosongkan dalam setiap siklus operasional. Semakin dalam baterai dikosongkan, semakin besar tekanan mekanik dan kimia yang dialami material

elektroda, sehingga jumlah siklus hidup baterai akan berkurang secara signifikan. Penelitian menunjukkan bahwa baterai yang hanya dioperasikan pada DoD 50% dapat memiliki umur siklus dua hingga tiga kali lebih panjang dibandingkan baterai yang dioperasikan pada DoD 100%. Faktor keempat adalah pola penggunaan baterai yang tidak teratur, seperti pengisian parsial yang berulang tanpa kalibrasi, serta penyimpanan baterai dalam kondisi SoC yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dalam waktu lama. Kondisi penyimpanan yang buruk dapat mempercepat pertumbuhan lapisan SEI dan menyebabkan kehilangan kapasitas yang tidak dapat dipulihkan. Dengan memahami seluruh faktor ini secara komprehensif, sistem monitoring berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk dapat merekam dan menganalisis parameter-parameter tersebut secara real-time guna mendukung prediksi kondisi baterai yang lebih akurat [3]

Selain dipengaruhi oleh temperatur, laju pengisian, dan kedalaman pelepasan (*Depth of Discharge*), kinerja baterai juga dipengaruhi oleh pola penggunaan selama siklus operasional. Oleh karena itu, pengumpulan data operasional secara kontinu melalui sistem monitoring berbasis IoT menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk mengetahui perubahan karakteristik baterai dari waktu ke waktu. Data tersebut dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam melakukan estimasi SoH maupun prediksi umur pakai baterai menggunakan pendekatan berbasis data [2] [6], ,[12]**.**

### 2.2.11 Kemampuan Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion memiliki berbagai keunggulan teknis yang menjadikannya teknologi penyimpanan energi paling banyak digunakan dalam sistem energi terbarukan, termasuk PLTS. Dari sisi densitas energi, baterai lithium-ion mampu menyimpan energi antara 150 hingga 250 Wh/kg, jauh lebih tinggi dibandingkan teknologi baterai konvensional seperti lead-acid yang hanya berkisar 30 hingga 50 Wh/kg. Densitas energi yang tinggi ini memungkinkan perancangan sistem penyimpanan yang lebih kompak dan ringan dengan kapasitas yang sama. Efisiensi pengisian dan pengosongan baterai lithium-ion juga sangat baik, yaitu

mencapai 95% hingga 99%, yang berarti hampir tidak ada energi yang terbuang sia-sia selama proses konversi energi berlangsung. Nilai efisiensi ini jauh lebih unggul dibandingkan baterai lead-acid yang hanya memiliki efisiensi sekitar 70% hingga 85% [3]

Dari sisi umur siklus, baterai lithium-ion pada umumnya dirancang untuk dapat bertahan antara 500 hingga 2000 siklus pengisian penuh tergantung pada jenis kimia sel yang digunakan. Jenis Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) bahkan dapat mencapai lebih dari 3000 siklus dengan degradasi kapasitas yang sangat minimal. Selain itu, baterai lithium-ion memiliki tingkat self-discharge yang sangat rendah, yaitu hanya sekitar 1% hingga 5% per bulan, sehingga energi yang tersimpan dapat dipertahankan dalam waktu yang cukup lama tanpa memerlukan pengisian ulang secara berkala. Kemampuan ini sangat relevan untuk aplikasi PLTS yang membutuhkan sistem penyimpanan dengan keandalan tinggi, terutama pada periode tanpa sinar matahari. Berdasarkan riset yang dipublikasikan oleh Mdani et al. (2025) dalam jurnal Batteries, baterai lithium-ion terbukti memiliki karakteristik siklus hidup dan densitas energi yang paling sesuai untuk aplikasi sistem penyimpanan energi pada PLTS modern dibandingkan teknologi baterai lainnya yang tersedia saat ini [3]

Baterai lithium-ion juga memiliki karakteristik tegangan nominal yang relatif tinggi, yaitu sekitar 3,2 hingga 3,7 V per sel tergantung jenis kimia yang digunakan. Tegangan yang lebih tinggi per sel ini memungkinkan perancangan baterai dengan jumlah sel yang lebih sedikit untuk mencapai tegangan sistem tertentu, sehingga mengurangi kompleksitas rangkaian dan potensi titik kegagalan. Kemampuan lainnya yang sangat penting dalam konteks penelitian ini adalah kemampuan baterai lithium-ion untuk diintegrasikan dengan sistem Battery Management System (BMS) yang canggih. BMS memungkinkan pemantauan kondisi setiap sel secara individual, pengaturan keseimbangan antar sel (cell balancing), perlindungan terhadap overcharge dan over-discharge, serta pelaporan kondisi kesehatan baterai secara real-time. Integrasi kemampuan ini dengan platform IoT berbasis ESP32 sebagaimana yang dirancang dalam penelitian ini membuka peluang untuk membangun sistem monitoring baterai yang cerdas,

akurat, dan dapat diakses dari jarak jauh [1]

### 2.2.12 Potensi Energi Matahari

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar sebagai negara yang terletak di kawasan khatulistiwa. Secara geografis, Indonesia menerima iradiasi matahari rata-rata antara 3,5 hingga 6,0 kWh/m²/hari dengan rata-rata nasional sekitar 4,8 kWh/m²/hari. Nilai ini termasuk dalam kategori tinggi secara global dan menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya di Indonesia memiliki kelayakan teknis yang sangat baik. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia, total potensi energi surya yang dapat dimanfaatkan di Indonesia diperkirakan mencapai 207,8 GWp, namun pemanfaatannya hingga saat ini masih jauh dari optimal. Kondisi ini mencerminkan peluang besar yang masih terbuka lebar bagi pengembangan sistem PLTS, khususnya pada skala kecil seperti residensial dan komersial [1]

Untuk wilayah Jakarta dan sekitarnya, termasuk lokasi penelitian di Apartemen Taman Semanan Indah, Cengkareng, intensitas radiasi matahari harian rata-rata berkisar antara 4,5 hingga 5,2 kWh/m²/hari berdasarkan data NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) dan Global Solar Atlas. Nilai iradiasi ini cukup memadai untuk mengoperasikan sistem PLTS skala kecil secara efisien. Peak Sun Hours (PSH) di Jakarta rata-rata berkisar 4 hingga 5 jam per hari, yang berarti dalam satu hari sistem PLTS dapat memproduksi energi setara dengan panel surya beroperasi penuh selama 4 hingga 5 jam pada intensitas standar 1000 W/m². Pemahaman mengenai potensi energi matahari di lokasi ini menjadi dasar yang sangat penting dalam perencanaan kapasitas sistem PLTS dan penentuan spesifikasi baterai penyimpanan yang digunakan dalam penelitian ini.

Secara global, energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan dengan pertumbuhan kapasitas terpasang paling cepat. International Energy Agency (IEA) dalam laporan Renewables 2023 menyatakan bahwa kapasitas PLTS global telah melampaui 1 TW pada tahun 2023 dan diproyeksikan mencapai 5 TW pada tahun 2030. Di Indonesia, pemerintah telah menetapkan target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dalam kerangka kebijakan energi

nasional, di mana PLTS menjadi salah satu teknologi unggulan yang didorong pengembangannya. Potensi energi matahari yang besar ini, dikombinasikan dengan penurunan harga panel surya secara konsisten dalam satu dekade terakhir, menjadikan PLTS semakin kompetitif secara ekonomi. Hal ini semakin memperkuat urgensi pengembangan sistem monitoring baterai yang handal seperti yang menjadi fokus penelitian ini, agar investasi pada infrastruktur PLTS dapat dikelola secara lebih efisien dan berkelanjutan [25].

### 2.2.13 Daya yang Dihasilkan dari PLTS

Daya keluaran yang dihasilkan oleh sistem PLTS dipengaruhi oleh beberapa variabel utama yang saling berinteraksi. Secara matematis, daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat dinyatakan dengan persamaan $P = \eta \times A \times G$, di mana $\eta$ adalah efisiensi konversi panel surya, A adalah luas area panel dalam satuan meter persegi, dan G adalah intensitas iradiasi matahari dalam satuan $W/m^2$. Efisiensi konversi panel surya monokristalin yang umum digunakan saat ini berkisar antara 18% hingga 22%, sedangkan panel polikristalin berada di kisaran 14% hingga 18%. Sebagai ilustrasi, sebuah panel monokristalin berkapasitas 100 Wp dengan luas sekitar 0,6 $m^2$ pada iradiasi matahari 1000 $W/m^2$ akan menghasilkan daya mendekati nilai peak wattage-nya, yaitu sekitar 100 W pada kondisi Standard Test Condition (STC).

Dalam kondisi operasional nyata, daya aktual yang dihasilkan PLTS selalu lebih rendah dari nilai STC karena dipengaruhi oleh temperatur panel, kondisi bayangan parsial (shading), debu pada permukaan panel, serta rugi-rugi pada kabel dan komponen lainnya. Peningkatan suhu panel sebesar 1°C di atas suhu standar 25°C umumnya menurunkan daya keluaran sebesar 0,3% hingga 0,5% tergantung jenis panel yang digunakan. Oleh karena itu, untuk mengestimasi energi yang dapat diproduksi dalam satu hari, digunakan konsep Peak Sun Hours (PSH). Total energi harian yang dihasilkan PLTS dapat dihitung dengan persamaan $E = P_peak \times PSH$

x PR, di mana P_peak adalah daya puncak panel dalam kWp, PSH adalah jam surya puncak harian, dan PR adalah Performance Ratio yang memperhitungkan seluruh rugi-rugi sistem. Nilai PR pada sistem PLTS modern umumnya berkisar antara 0,75 hingga 0,85 [25].

Pada sistem PLTS skala kecil yang digunakan dalam penelitian ini dengan kapasitas panel sekitar 50 Wp hingga 100 Wp dan lokasi di Jakarta dengan PSH rata-rata 4,5 jam per hari serta asumsi PR sebesar 0,8, estimasi energi yang dapat dihasilkan berkisar antara 180 hingga 360 Wh per hari. Energi ini digunakan untuk mengisi baterai lithium-ion 12V/7Ah yang memiliki kapasitas penyimpanan sekitar 84 Wh. Dengan demikian, dalam kondisi iradiasi normal, baterai dapat terisi penuh dalam satu siklus pengisian harian. Data tegangan dan arus keluaran panel surya yang diukur secara real-time oleh sensor INA219 dalam penelitian ini menjadi parameter penting untuk menganalisis profil pengisian baterai dan menghubungkannya dengan kondisi degradasi baterai yang terjadi dari waktu ke waktu. Pemahaman mengenai karakteristik daya keluaran PLTS ini menjadi landasan teknis yang kuat dalam merancang eksperimen siklus charge-discharge yang representatif terhadap kondisi operasional sesungguhnya [8].

Besarnya daya yang dihasilkan oleh PLTS dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, temperatur modul surya, efisiensi panel, serta kondisi sistem penyimpanan energi. Oleh karena itu, monitoring terhadap parameter listrik secara real-time menjadi penting untuk mengetahui performa sistem secara menyeluruh. Integrasi sistem monitoring berbasis IoT memungkinkan seluruh parameter tersebut direkam dan dianalisis sehingga mempermudah evaluasi kinerja PLTS dalam jangka panjang [25], [8], [27].

### 2.2.14 Analisis Ekonomi Pemasangan PLTS

Analisis ekonomi merupakan aspek yang tidak terpisahkan dalam pengkajian kelayakan pemasangan sistem PLTS. Biaya pemasangan PLTS umumnya dianalisis menggunakan beberapa indikator ekonomi utama, yaitu Levelized Cost of Energy (LCOE), Net Present Value (NPV), Payback Period (PP), dan Internal Rate of Return (IRR). LCOE adalah indikator yang paling sering digunakan untuk membandingkan biaya produksi energi dari berbagai sumber

secara setara. LCOE dihitung dengan membagi total biaya siklus hidup sistem (termasuk biaya investasi awal, operasional, dan perawatan) dengan total energi yang dihasilkan selama masa hidup sistem. Berdasarkan data dari International Renewable Energy Agency (IRENA) pada laporan Renewable Power Generation Costs in 2023, LCOE sistem PLTS skala utilitas secara global telah turun drastis hingga rata-rata USD 0,044 per kWh, yang sudah lebih kompetitif dibandingkan pembangkit berbahan bakar fosil di banyak negara.

Untuk skala residensial di Indonesia seperti konteks penelitian ini, biaya investasi awal pemasangan PLTS dengan sistem baterai berkisar antara Rp 10.000.000 hingga Rp 25.000.000 per kWp tergantung jenis komponen dan spesifikasi sistem yang dipilih. Sebagai contoh ilustrasi, sistem PLTS sederhana dengan kapasitas 100 Wp yang dilengkapi baterai lithium-ion 7Ah/12V, solar charge controller, dan sistem monitoring IoT membutuhkan investasi awal sekitar Rp 3.000.000 hingga Rp 5.000.000. Dengan asumsi penghematan tagihan listrik rata-rata Rp 1.444 per kWh (tarif dasar listrik PLN golongan R-1 900 VA per 2024) dan produksi energi rata-rata 0,3 kWh per hari, penghematan tahunan yang dapat diperoleh berkisar Rp 150.000 hingga Rp 160.000 per tahun. Payback period dari sistem ini dengan skenario tersebut berkisar antara 15 hingga 20 tahun, yang masih dalam rentang umur teknis panel surya yang umumnya memiliki garansi daya selama 25 tahun.

Dari perspektif ini, penelitian mengenai pemantauan kondisi baterai dan prediksi umur pakai memiliki relevansi ekonomi yang sangat signifikan. Baterai lithium-ion merupakan komponen dengan biaya terbesar dalam sistem PLTS off-grid, berkontribusi sekitar 30% hingga 50% dari total biaya investasi sistem. Penggantian baterai sebelum waktunya akibat tidak terdeteksinya degradasi dini dapat meningkatkan total biaya kepemilikan sistem secara drastis dan memperburuk kelayakan ekonomi proyek. Sebaliknya, dengan sistem monitoring prediktif yang akurat seperti yang dikembangkan dalam penelitian ini, pemilik sistem PLTS dapat merencanakan penggantian baterai secara tepat waktu, menghindari kegagalan sistem yang tidak terduga, dan mengoptimalkan umur pakai baterai secara maksimal. Hal ini secara langsung berkontribusi pada penurunan

LCOE sistem secara keseluruhan dan peningkatan kelayakan ekonomi investasi PLTS jangka panjang [10].

### 2.2.15 Perbedaan Panel Surya Monokristalin dan Polikristalin

Panel surya monokristalin dan polikristalin merupakan dua jenis teknologi sel surya berbasis silikon yang paling banyak digunakan dalam sistem PLTS saat ini. Perbedaan mendasar antara keduanya terletak pada proses fabrikasi dan kemurnian material silikon yang digunakan. Panel monokristalin dibuat dari satu kristal silikon tunggal yang dimurnikan melalui proses Czochralski, sehingga menghasilkan struktur kristal yang sangat seragam dan teratur. Kemurnian struktur kristal ini memungkinkan elektron bergerak lebih bebas dan efisien, sehingga panel monokristalin memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, yaitu berkisar antara 18% hingga 22% pada teknologi komersial yang tersedia saat ini. Panel monokristalin dapat dikenali dari tampilannya yang berwarna hitam seragam dengan sudut sel yang terpangkas menjadi bentuk segi delapan. Meskipun memiliki performa yang unggul, proses fabrikasinya yang lebih kompleks membuat harga panel monokristalin lebih mahal dibandingkan panel polikristalin dengan kapasitas yang sama [1]

Panel polikristalin, di sisi lain, dibuat dari beberapa fragmen kristal silikon yang dilelehkan bersama-sama kemudian dicetak menjadi blok yang dipotong menjadi wafer. Proses ini menghasilkan struktur kristal yang tidak seragam dengan batas antar kristal yang terlihat jelas, yang menyebabkan hambatan lebih besar terhadap aliran elektron. Akibatnya, efisiensi konversi panel polikristalin lebih rendah, yaitu berkisar antara 14% hingga 18%. Panel polikristalin dapat dikenali dari tampilannya yang berwarna biru dengan pola kristal yang tidak beraturan serta bentuk sel yang persegi penuh tanpa sudut yang terpangkas. Meskipun efisiensinya lebih rendah, proses fabrikasi panel polikristalin yang lebih sederhana menjadikannya lebih murah untuk diproduksi. Untuk menghasilkan daya yang sama, panel polikristalin membutuhkan area pemasangan yang lebih luas dibandingkan panel monokristalin karena perbedaan efisiensinya.

Dari sisi performa dalam kondisi cahaya rendah dan suhu tinggi, kedua jenis

panel ini juga menunjukkan karakteristik yang berbeda. Panel monokristalin umumnya memiliki performa yang lebih baik dalam kondisi cahaya matahari yang tidak langsung atau berawan karena struktur kristalnya yang lebih murni memungkinkan konversi energi yang lebih efisien bahkan pada intensitas cahaya rendah. Sementara itu, panel polikristalin cenderung mengalami penurunan performa yang lebih signifikan pada kondisi cahaya redup. Dari sisi koefisien temperatur, kedua jenis panel memiliki nilai yang hampir serupa, yaitu sekitar -0,3% hingga -0,5% per derajat Celcius, yang berarti keduanya mengalami penurunan output daya yang sebanding ketika suhu panel meningkat. Pemilihan antara panel monokristalin dan polikristalin pada akhirnya bergantung pada pertimbangan antara anggaran investasi awal, ketersediaan lahan pemasangan, dan target produksi energi yang ingin dicapai. Dalam konteks penelitian ini, jenis panel yang digunakan pada sistem PLTS eksperimental turut menentukan karakteristik profil pengisian baterai yang akan direkam oleh sistem monitoring berbasis IoT [25].