

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pada penyusunan penelitian kali ini, diperlukan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan topik pemanfaatan energi baru terbarukan untuk sistem *monitoring* kebocoran pipa air berbasis *Internet of Things* (IoT). Dengan adanya kajian penelitian terdahulu, diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai solusi yang telah dikembangkan serta menjadi dasar dalam mengidentifikasi penelitian yang dapat dikembangkan lebih lanjut pada penelitian ini, terutama dalam integrasi untuk *monitoring* pada pendeteksi kebocoran pipa air berbasis IoT yang memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk dijadikan sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Terdapat beberapa penelitian terkait pembahasan proposal skripsi tersebut dalam bentuk artikel dan jurnal dapat dikemukakan sebagai berikut:

1. (Razzaqqi et al., 2025), Pada penelitian yang memiliki judul “Pendeteksian Kebocoran pada Jaringan Pipa Berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan Notifikasi dan Lokalisasi Sumber Kebocoran,” Penelitian yang merancang dan membangun sistem deteksi kebocoran pipa berbasis *Internet of Things* (IoT) yang menggunakan Mikrokontroler ESP32, sensor *Waterflow*, dan modul GPS. Sensor *Waterflow* untuk mendeteksi perubahan aliran air yang menunjukkan terdapat kebocoran pada pipa. Kemudian modul GPS memberi titik koordinat yang menunjukkan lokasi kebocoran, yang akan memudahkan dalam melakukan penanganan di lokasi kebocoran. Sistem ini terintegrasi dengan aplikasi *Blynk* yang memungkinkan pemantauan jarak jauh melalui perangkat mobile. Penelitian tersebut menjadi referensi penting dalam penelitian ini karena menunjukkan bahwa teknologi IoT dapat digunakan untuk mendeteksi kebocoran pipa air secara *real-time*.
2. (Liestyowati et al., 2022), Dalam penelitian dengan judul “Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Berkapasitas 100 WP dengan Inverter 1000 Watt,” Energi surya dapat dimanfaatkan melalui sistem PLTS menggunakan panel fotovoltaik untuk menghasilkan listrik ramah lingkungan dan mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil. Kinerja PLTS sangat dipengaruhi oleh kondisi

cuaca dan intensitas cahaya matahari, sehingga diperlukan sistem *monitoring* untuk memantau parameter seperti tegangan, arus, dan daya. Dengan integrasi teknologi IoT pada PLTS untuk proses pemantauan menjadi dapat dilakukan secara *real-time* dan jarak jauh untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem.

3. (Darmana et al., 2022), Dalam penelitian yang memiliki judul “Sosialisasi Pemeliharaan Dan Perawatan PLTS Pada Kapal Nelayan di Pantai Marunda, Jakarta Utara,” Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada perahu nelayan terbukti menjadi solusi alternatif untuk mengurangi biaya operasional dari kenaikan harga bahan bakar. Sistem PLTS bekerja dengan mengubah energi matahari menjadi energi listrik, kemudian dapat digunakan atau disimpan pada baterai untuk digunakan pada malam hari. Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan pemanfaatan PLTS dan diperlukannya perawatan secara berkala agar sistem tetap bekerja optimal. Peningkatan pengetahuan pengguna mengenai operasi dan perawatan PLTS menjadi faktor untuk mendukung keberlanjutan penggunaannya.
4. (Ilham et al., 2025), Pada penelitian yang berjudul “*Water Level Monitoring Device with Hybrid Solar Power Based on IoT for River Safety Monitoring*,” penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan ketinggian air sungai berbasis *Internet of Things* (IoT) yang menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi. Sistem memanfaatkan sensor ultrasonik yang terhubung dengan Mikrokontroler ESP32 untuk mengukur ketinggian air secara *real-time* dan menampilkan data melalui aplikasi *Blynk*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan secara akurat dan PLTS mampu menyediakan suplai energi yang cukup untuk operasional perangkat *monitoring*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk menyuplai kebutuhan daya pada perangkat *monitoring* berbasis IoT.
5. (Darmana et al., 2024), Dalam penelitian yang memiliki judul “*Study of Fuel Save Controller (FSC) System in Renewable Energy A Case Study Wangi-Wangi*,” Penelitian ini mengkaji penerapan sistem *Fuel Save Controller (FSC)* dalam mengoptimalkan kinerja jaringan energi terbarukan yang mengintegrasikan sumber dari energi matahari dan angin. Hasilnya menunjukkan dengan menggunakan FSC

mampu meningkatkan efisiensi distribusi energi serta menurunkan ketergantungan terhadap generator. Dengan integrasi energi terbarukan yang dikendalikan oleh FSC, terjadi penurunan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional sebesar 14,68%. Sistem ini meningkatkan stabilitas jaringan dan pemanfaatan energi secara lebih optimal.

6. (Sitindaon et al., 2024), Pada penelitian yang berjudul “Implementasi Sistem *Monitoring* Air Dengan sensor Ultrasonik Hc-Sr04 Dan *Water flow* Di Asone Hidroponik Berbasis Internet Of Things (IoT) Menggunakan Energi Panel Surya (PLTS),” mengembangkan sistem *monitoring* air berbasis IoT pada sistem hidroponik yang memanfaatkan panel surya sebagai sumber energi alternatif ketika terjadi pemadaman listrik. Sistem menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk memantau ketersediaan air dan sensor *water flow* untuk mengukur debit aliran air. Data dari sensor diproses oleh ESP32 dan dikirim ke *platform cloud Blynk* untuk pemantauan secara *real-time*. Penelitian ini menunjukkan PLTS dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung operasional sistem *monitoring*.
7. (Gunoto & Hutapea, 2022), Penelitian yang berjudul “Analisa Daya Pada Panel Surya Di Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Rooftop* On Grid Kapasitas 30 Kva Gedung Kantor PT. Energi Listrik Batam”, membahas analisis kinerja pada PLTS berdasarkan pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap daya dan energi listrik yang dihasilkan panel surya. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengukuran parameter tegangan, arus, daya, serta iradiasi matahari pada beberapa kondisi cuaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai iradiasi matahari yang diterima panel surya, maka tegangan, arus, daya, dan energi listrik yang dihasilkan juga semakin meningkat. Sebaliknya, ketika intensitas penyinaran menurun karena perubahan cuaca, energi yang dihasilkan panel surya juga mengalami penurunan.
8. (Purwanto et al., 2022), Dari penelitian dengan judul “Rancang Bangun Sistem Pengaturan Suplai Beban Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Untuk Listrik Rumah Tangga Golongan R-1/Tr 2200 Va”, penelitian tersebut dilakukan perancangan dan analisis sistem pengaturan suplai beban otomatis (*Automatic Transfer Switch*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) skala rumah tangga yang mengintegrasikan panel surya, baterai dan jaringan listrik PLN.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi keandalan transisi distribusi energi listrik secara otomatis berdasarkan kapasitas daya yang tersedia pada sistem penyimpanan energi. Hasil pengujian menunjukkan perpindahan suplai daya dapat berlangsung secara stabil. Selain itu *Solar Charge Controller* berperan penting dalam mengatur proses pengisian dan pembatasan pengosongan baterai sebesar 80%, sehingga baterai terlindungi dari kondisi *overdischarging*.

9. (Afrianda et al., 2023), Dalam penelitian yang berjudul “Pemanfaatan PLTS On Grid Pada *Rooftop* PLTGU Blok 1 PT PLN Nusantara Power Berbasis *Isolarcloud*”, penelitian tersebut membahas pemanfaatan sistem PLTS *on-grid* pada *rooftop* dengan memanfaatkan perangkat lunak *Isolarcloud* sebagai media pemantauan kinerja sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daya masukan, daya keluaran, efisiensi inverter, serta pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap energi listrik yang dihasilkan PLTS. Hasil penelitian tersebut, nilai efisiensi inverter mendekati 100% sehingga menunjukkan bahwa sistem PLTS bekerja dengan baik. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari berbanding lurus dengan peningkatan daya yang dihasilkan oleh sistem PLTS, sehingga intensitas radiasi matahari menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa PLTS.
10. (Al-adawiyah, 2022), Pada penelitian yang berjudul “Kinerja Baterai Sebagai Fungsi Smoothing Daya Pada Plts Hybrid Selayar 1300 kWp”, penelitian tersebut membahas analisis kinerja baterai pada sistem PLTS hybrid sebagai fungsi smoothing daya untuk menjaga kestabilan keluaran pembangkit. Penelitian dilakukan dengan mengevaluasi parameter *State of Charge*, *Depth of Discharge*, siklus pengisian dan pengosongan baterai (*Charging and Discharging*), serta perkiraan umur baterai berdasarkan pola operasinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan batas *Depth of Discharge* dan pemantauan siklus baterai berperan penting dalam menjaga performa serta memperpanjang umur baterai. Selain itu, baterai mampu melakukan proses smoothing secara otomatis ketika terjadi fluktuasi daya keluaran panel surya sehingga suplai daya ke beban tetap stabil meskipun intensitas radiasi matahari berubah-ubah.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Energi Terbarukan

Kebutuhan energi di Indonesia sampai saat ini masih lebih didominasi oleh energi yang bersumber dari energi fosil seperti contohnya batu bara. Seiring dengan peningkatan konsumsi energi dan keterbatasan terhadap persediaan sumber daya fosil, sehingga diperlukan pengembangan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan salah satunya dengan energi baru terbarukan.

Pemanfaatan sumber energi terbarukan, terutama energi surya, kini menjadi semakin penting dalam upaya mendukung pembangunan berkelanjutan sekaligus menekan ketergantungan penggunaan bahan bakar fosil. Peralihan menuju energi bersih tidak hanya berkontribusi untuk menjaga kelestarian lingkungan, tetapi menjadi langkah strategis untuk menghadapi tantangan krisis energi di masa depan. Indonesia sendiri memiliki potensi energi surya yang cukup besar karena letak geografisnya yang berada di wilayah tropis dengan intensitas penyinaran matahari yang tinggi sepanjang tahun. Meskipun potensi tersebut sangat melimpah, pemanfaatan energi baru terbarukan untuk bauran energi nasional masih rendah dan belum dimaksimalkan secara optimal. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara potensi yang tersedia dengan tingkat implementasi di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk pengembangan dan pemanfaatan teknologi energi surya.

Indonesia memiliki potensi energi surya yang cukup tinggi, dengan kapasitas yang diperkirakan dapat mencapai ribuan megawatt. Potensi tersebut membuat energi surya menjadi salah satu alternatif utama dalam pengembangan sistem pembangkit listrik yang berkelanjutan (Darmana et al., 2024). Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar untuk dimanfaatkan salah satunya dari energi matahari. Hal ini dikarenakan ketersediaannya yang melimpah sepanjang tahun serta penggunaannya yang tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Pemanfaatan energi matahari umumnya dilakukan melalui penggunaan panel surya, yang berfungsi mengonversi energi cahaya matahari diubah menjadi energi listrik dengan bantuan sel fotovoltaik.

2.2.2 Energi Surya

Energi surya adalah sebagai sumber energi baru terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia. Letak geografis Indonesia yang berada di wilayah khatulistiwa menyebabkan intensitas penyinaran matahari menjadi lebih tinggi sepanjang tahun, sehingga memberikan peluang yang besar dalam memanfaatkan energi surya untuk sumber pembangkit listrik. Rata-rata intensitas radiasi matahari di Indonesia mencapai sekitar 4,8 kWh/m²/hari, sehingga potensi energi surya yang tersedia sangat melimpah dan dapat dimanfaatkan untuk mendukung kebutuhan energi listrik di berbagai sektor. Pemanfaatan energi surya memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sumber energi berbasis bahan bakar fosil (Nur Qosim et al., 2021).

Selain ketersediaannya yang melimpah, energi surya adalah sumber energi yang ramah lingkungan selama proses pembangkitan listrik. Selain itu, sistem tenaga surya juga dapat diterapkan pada berbagai kondisi geografis, termasuk daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional. Dengan potensi ini, energi surya menjadi salah satu alternatif yang tepat untuk mendukung penyediaan energi listrik yang berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil.

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi sumber pembangkit listrik dengan memanfaatkan radiasi dari sinar matahari dijadikan sebagai sumber energi utama untuk menghasilkan listrik. Dalam mengubah sumber energinya yang dengan menggunakan sel surya atau *photovoltaic*, yang berfungsi mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Sel surya sendiri tersusun dari material semikonduktor berbentuk lapisan tipis yang dirangkai menjadi sebuah modul. Modul surya kemudian bisa

menghasilkan listrik dengan bentuk arus listrik searah (DC), dan bisa dimanfaatkan secara langsung ataupun disimpan untuk memenuhi kebutuhan sistem kelistrikan.

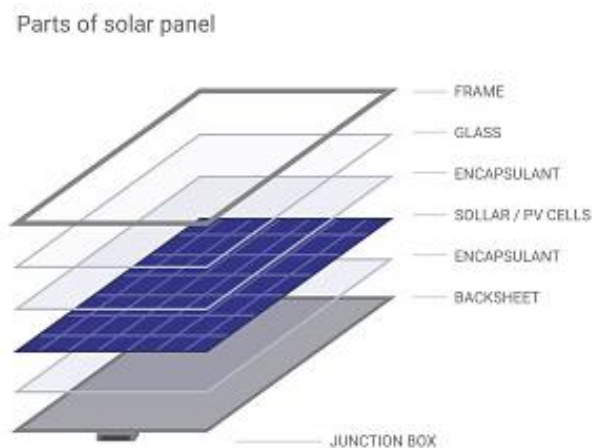
Potensi dari energi surya sebagai sumber energi terbarukan memiliki pengaruh cukup besar, terutama negara tropis seperti di Indonesia mendapatkan sinar matahari yang lama sepanjang tahun. Sehingga dengan energi matahari yang digunakan untuk sumber energi listrik yang melalui teknologi modul fotovoltaik atau panel surya. Dalam pemanfaatan PLTS tidak hanya akan berkontribusi pada penyediaan energi listrik, tetapi juga dapat mendukung peningkatan rasio elektrifikasi serta akan mengurangi ketergantungan dengan energi fosil yang tidak terbarukan. Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), radiasi matahari dari yang diterima oleh panel surya dan diubah menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (DC). Listrik tersebut menjadi bisa digunakan langsung oleh beban ataupun disimpan dahulu dalam media penyimpanan seperti baterai untuk pemakaian di waktu yang berbeda. Seiring dengan perkembangan teknologi energi terbarukan, pemanfaatan sistem PLTS semakin luas, tidak hanya pada pembangkit listrik berskala besar, tetapi berbagai aplikasi lain seperti perangkat elektronik dan sistem *monitoring* yang berbasis teknologi digital (Liestyowati et al., 2022).

Dalam sistem PLTS ini dengan memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik menggunakan modul surya dalam menghasilkan energi listrik yang bisa dimanfaatkan untuk banyak kebutuhan dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Dari perkembangan teknologi saat ini, sistem PLTS terus mengalami peningkatan, seperti pada segi efisiensi konversi energi, kestabilan sistem, maupun dalam pengurangan biaya produksi sehingga semakin PLTS ini banyak diterapkan untuk sumber energi listrik alternatif yang ramah lingkungan. Dalam suatu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), terdapat beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi menghasilkan energi listrik.

1. Panel Surya

Panel surya sebagai perangkat yang tersusun dari beberapa kumpulan sel surya yang sumber bahannya dari semikonduktor dengan memanfaatkan efek fotolistrik untuk mengubah energi radiasi matahari kemudian diubah menjadi energi listrik. Energi matahari tersusun atas partikel-partikel yang disebut foton, energi listrik pada sistem

PLTS dihasilkan melalui pemanfaatan radiasi matahari yang berupa partikel foton. Radiasi tersebut ditangkap oleh sel surya dan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui mekanisme fotovoltaiik. Sel surya (*photovoltaic*) sebagai komponen utama yang digunakan dalam penelitian dan tersusun dari beberapa lapisan tipis dengan bahan dari semikonduktor, umumnya menggunakan silikon (Si) murni maupun material semikonduktor lainnya yang berkemampuan dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik.



Gambar 2.2 Bagian Panel Surya

Panel surya berfungsi untuk menghasilkan energi listrik yang berasal dari sumber energi matahari. Perangkat ini tersedia dengan berbagai bentuk dan ukuran, sehingga memberikan fleksibilitas dalam perancangan sistem PLTS sesuai dengan kebutuhan dan skala penggunaannya (Darmana et al., 2022).

Panel surya umumnya sekarang banyak terbuat dari material semikonduktor seperti silikon digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari energi cahaya matahari. Umumnya, terdapat dua jenis panel surya yang banyak digunakan, yaitu *Monocrystalline* dan *polycrystalline*. Panel *Monocrystalline* dikenal memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dalam menghasilkan energi listrik, namun performanya cenderung menurun ketika kondisi cuaca mendung atau intensitas cahaya rendah. Sel surya sebagai alat yang bisa mengubah energi matahari agar dapat menghasilkan listrik. Teknologi pada Photovoltaic (PV) bekerja dengan cara mengonversi radiasi matahari secara langsung diubah menjadi energi listrik. Umumnya, sistem PV dibuat dalam bentuk modul surya yang tersusun dari beberapa sel surya, susunannya dapat dirangkai secara seri maupun paralel sesuai dari

kebutuhan sistem (Samsurizal et al., 2021). Sistem berbasis sel surya memiliki keunggulan karena tidak menggunakan bagian yang bergerak, sehingga lebih andal dan membutuhkan perawatan yang relatif.

2. Panel Surya Tipe *Monocrystalline*



Gambar 2.3 Panel Surya tipe *Monocrystalline*

Panel surya umumnya sekarang banyak yang terbuat dari material semikonduktor seperti silikon digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari energi cahaya matahari. Terdapat dua jenis panel surya yang banyak digunakan, yaitu *Monocrystalline* dan *polycrystalline*. Panel surya jenis *Monocrystalline* merupakan salah satu jenis panel surya yang terbuat dari silikon tunggal dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Material silikon tersebut dibentuk menjadi batangan kristal, kemudian dipotong menjadi lembaran tipis yang digunakan sebagai sel surya. Silikon dengan kemurniannya yang tinggi menjadikan panel surya *Monocrystalline* memiliki kemampuan yang lebih baik dibanding jenis panel surya lainnya. Secara fisik, panel surya *Monocrystalline* memiliki warna hitam sebagai ciri khas silikon murni, serta bentuk sel yang menyerupai persegi dengan bagian sudut yang terpotong. Panel surya *Monocrystalline* memiliki keunggulan, seperti mampu menghasilkan efisiensi yang tinggi sekitar 15% - 20% tergantung teknologi dan spesifikasi yang digunakan, sehingga kebutuhan luas pemasangan menjadi lebih kecil untuk menghasilkan daya yang sama dibandingkan dengan jenis panel surya yang lain. Selain itu, panel surya jenis ini memiliki performa yang lebih baik pada kondisi cuaca mendung apabila dibandingkan dengan panel surya *polycrystalline*, sehingga tetap mampu menghasilkan energi listrik meskipun intensitas cahaya matahari mengalami penurunan (Sanjaya Putra et al., 2026).

Dibalik keunggulannya, panel surya *Monocrystalline* terdapat kekurangan seperti

biaya produksinya lebih tinggi dibandingkan dengan jenis panel surya lainnya karena bahan pembuatannya yang menggunakan bahan silikon dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Selain itu, kinerja panel surya dapat mengalami penurunan apabila beroperasi pada kondisi suhu yang sangat tinggi. Proses pembuatan panel *Monocrystalline* juga menghasilkan limbah material silikon yang cukup banyak akibat dari proses pemotongan batangan kristal menjadi lembaran-lembaran tipis. Pemilihan dengan panel surya jenis *Monocrystalline* pada penelitian ini karena memiliki efisiensi konversi yang lebih tinggi, sehingga panel surya *Monocrystalline* jenis mampu menghasilkan energi listrik yang lebih optimal dibandingkan dengan panel surya jenis lain pada luas pemasangan yang terbatas. Dengan kemampuan tersebut, panel surya *Monocrystalline* diharapkan mampu memenuhi kebutuhan energi sistem pendeteksi kebocoran pipa air dengan lebih efektif, terutama pada luas area pemasangan yang terbatas.

Kapasitas panel surya harus disesuaikan dengan kebutuhan energi listrik harian agar energi yang dihasilkan mampu memenuhi kebutuhan operasional sistem secara optimal. Perhitungan kapasitas panel surya dilakukan berdasarkan total kebutuhan energi harian, lama penyinaran efektif matahari atau *Peak Sun Hour* (PSH), serta mempertimbangkan rugi-rugi yang terjadi pada sistem seperti rugi-rugi konversi dan efisiensi komponen. Dalam menentukan kapasitas panel surya dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

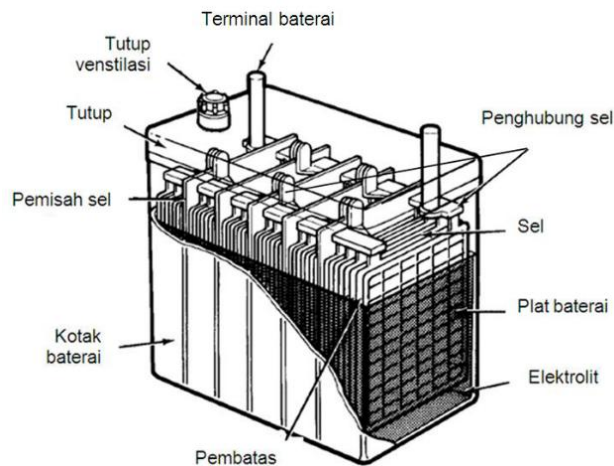
$$P_{PV} = \frac{E_{\text{harian}}}{PSH \times \eta_{\text{sistem}}}$$

Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwa kapasitas panel surya dipengaruhi oleh besarnya kebutuhan energi harian, lama penyinaran efektif matahari, serta efisiensi sistem. Nilai *Peak Sun Hour* digunakan untuk rata-rata lama penyinaran matahari efektif yang diterima panel surya setiap hari (Setiawan et al., 2025).

3. Baterai

Baterai sebagai komponen yang memiliki fungsi untuk penyimpanan energi listrik yang dikirim dari modul fotovoltaik atau panel surya. Baterai bekerja dengan mengubah energi kimia menjadi energi listrik ketika proses *discharging* dan mengubah energi listrik menjadi energi kimia ketika proses *charging*. Perbedaan potensial antara kedua kutub tersebut menunjukkan bahwa kutub positif memiliki tingkat energi yang lebih tinggi

dibanding dengan kutub negatif. Kutub negatif sebagai sumber elektron yang akan mengalir ke rangkaian eksternal untuk menyuplai energi listrik ke beban. Ketika baterai dihubungkan pada suatu rangkaian, elektrolit di dalamnya akan memungkinkan perpindahan ion yang memicu terjadinya reaksi kimia pada kedua elektroda, sehingga menghasilkan aliran listrik (Irawati et al., 2023).



Gambar 2.4 Baterai

Energi yang disimpan pada baterai tidak dapat dimanfaatkan secara keseluruhan karena untuk menjaga umur baterai. Sehingga tingkat pengosongan baterai dibatasi dengan *Depth of Discharge*, ditetapkan hanya sekitar 80% dari kapasitas baterai yang dapat digunakan, karena penggunaan hingga kondisi kosong dapat mempercepat penurunan pada kualitas baterai. Setiap sel mempunyai dua elektroda, yaitu anoda sebagai kutub negatif dan katoda sebagai kutub positif, elektrolit sebagai media perpindahan ion dan separator berfungsi memisahkan kedua elektroda untuk mencegah terjadinya hubung singkat. Jenis baterai dalam penelitian ini dengan menggunakan baterai jenis Lithium Iron Phosphate. Baterai lithium-ion merupakan jenis baterai isi ulang yang banyak digunakan karena memiliki densitas energi tinggi, umur pakai yang panjang. Baterai LiFePO_4 memiliki keunggulan berupa stabilitas termal dan kimia yang baik, umur siklus yang panjang, tingkat keamanan tinggi dan cukup ramah lingkungan karena menggunakan material yang tidak berbahaya. Baterai jenis LiFePO_4 ini memiliki tegangan *discharge* sampai 3,4 V (Al-adawiyah, 2022). Untuk penggunaan jenis baterai LiFePO_4 ini dapat jadi pilihan karena memiliki keunggulan dalam umur pemakaian yang lebih panjang pada

jenis baterai ini, efisiensi pengisian tinggi, serta memiliki keamanan yang lebih tinggi daripada baterai jenis lain.

4. *State of Charge (SOC)* dan *Depth of Discharge (DoD)*

State of Charge (SOC) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat energi yang masih tersimpan di dalam baterai dibandingkan dengan kapasitas energi nominalnya. SOC umumnya dinyatakan dalam persentase, dengan SOC 100% menunjukkan baterai dalam kondisi penuh, sedangkan SOC yang semakin rendah menunjukkan bahwa energi yang tersimpan semakin berkurang.

Secara umum, SOC dapat dinyatakan sebagai:

$$SOC = \frac{E}{E_{Rated}} \times 100\%$$

Sebaliknya, *Depth of Discharge (DoD)* menunjukkan persentase kapasitas energi baterai yang telah digunakan atau dilepaskan selama proses *discharging*. DoD sebagai energi yang dilepaskan dibandingkan dengan kapasitas energi nominal sistem penyimpanan.

$$DoD = \frac{E_{discharged}}{E_{Rated}} \times 100\%$$

5. *Solar Charge Controller*



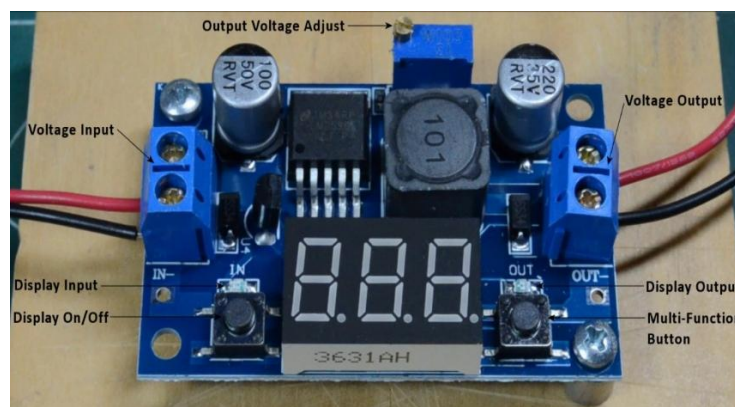
Gambar 2.5 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller merupakan suatu peralatan elektronik berfungsi untuk mengatur aliran arus searah (DC) dalam sistem panel surya ke baterai serta dari baterai menuju beban. Komponen SCC berperan untuk melakukan pengontrolan pada proses

pengisian baterai agar tidak terjadi pengisian berlebih (*overcharging*) ketika kapasitas baterai telah terpenuhi. *Solar Charge Controller* ini juga berfungsi untuk memberi perlindungan sistem dari tegangan berlebih yang dihasilkan oleh panel surya. Apabila sistem PLTS digunakan untuk sumber energi utama, maka daya yang dihasilkan akan disalurkan ke beban melalui SCC, kemudian energi yang lebih akan dimanfaatkan untuk proses pengisian baterai, terutama pada siang hari saat intensitas cahaya matahari dengan kondisi tinggi (Purwanto et al., 2022). Tegangan yang tidak terkontrol dapat mempengaruhi kinerja serta memperpendek umur pakai baterai yang digunakan. *Solar Charge Controller* dalam penelitian ini yang memiliki fungsi mengatur pengisian baterai dengan arus yang dapat dijaga secara konstan hingga mencapai nilai tegangan yang telah ditentukan.

Solar Charge Controller sebagai suatu perangkat yang berfungsi untuk mengatur proses pengisian dalam melakukan pengisian energi ke baterai agar berlangsung secara optimal (Hidayat et al., 2021). Untuk *Solar Charge Controller* (SCC) yang akan digunakan dalam penelitian kali ini yaitu menggunakan jenis SCC jenis HXC 10 A MPPT, yang memiliki keunggulan yang lebih baik dibandingkan dengan SCC jenis lainnya. Sebagai nilai acuan, efisiensi SCC jenis MPPT yang digunakan sebesar sekitar 90% berdasarkan (Firmansyah et al., 2025).

2.2.4 Buck Converter DC-DC



Gambar 2.6 Buck Converter DC-DC

Buck Converter adalah salah satu jenis konverter DC-DC yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari sumber listrik agar sesuai dengan kebutuhan yang digunakan beban. Dalam sistem berbasis sumber tegangan DC, seperti pada Pembangkit Listrik

Tenaga Surya (PLTS), untuk tegangan yang dihasilkan seringkali lebih tinggi atau tidak stabil dibandingkan dengan tegangan yang dibutuhkan. Maka diperlukan rangkaian penurun tegangan yang mampu menjaga kestabilan suplai daya. *Buck Converter* bekerja dengan mengatur tegangan keluaran melalui proses switching sehingga menghasilkan tegangan yang lebih rendah dari tegangan input. Dengan *Buck Converter*, tegangan dapat disesuaikan dengan nilai yang dibutuhkan komponen, sehingga sistem dapat beroperasi secara aman, stabil, dan efisien.

Buck Converter sebagai salah satu jenis konverter DC-DC yang memiliki fungsi sebagai penurun tegangan dari sumber yang tegangan lebih tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah disesuaikan dengan kebutuhan dari bebannya. Proses penurunan tegangan dilakukan dengan cara switching menggunakan komponen seperti transistor dan dioda yang bekerja secara periodik, serta didukung juga oleh elemen penyimpan energi seperti induktor dan kapasitor. Dengan metode tersebut, *Buck Converter* mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dengan tingkat efisiensi yang tinggi serta meminimalkan kehilangan energi (Afiq et al., 2022). Oleh karena itu, konverter jenis ini banyak digunakan dalam sistem elektronik modern, termasuk pada sistem energi terbarukan seperti PLTS, untuk memastikan suplai daya optimal dan efisien.

2.2.5 Mini Circuit Breaker



Gambar 2.7 *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Komponen pengaman rangkaian listrik yang digunakan pada penelitian ini salah satunya *Mini Circuit Breaker* yang berfungsi untuk melindungi rangkaian dari gangguan arus berlebih (*overcurrent*) maupun hubung singkat (*short circuit*). *Mini Circuit Breaker* ini bekerja dengan memutuskan aliran listrik secara otomatis ketika terjadi arus mengalir

melebihi kapasitas arus nominal sesuai spesifikasi MCB. Cara kerja MCB terdapat dua mekanisme, yaitu pengaman thermis dan pengaman elektromagnetis. Untuk pengaman thermis menggunakan elemen bimetal yang akan melengkung akibat kenaikan suhu ketika terjadi arus berlebih, kemudian pemutus akan bekerja untuk memutuskan aliran listrik. Sedangkan pengaman yang elektromagnetis bekerja ketika adanya hubung singkat yang memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang sangat besar untuk mengaktifkan mekanisme pemutus secara cepat (Hutajulu et al., 2024).

Dalam penelitian ini, menggunakan dua buah MCB yang salah satunya dipasang pada jalur panel surya menuju ke *Solar Charge Controller* untuk mengamankan rangkaian dari arus berlebih ketika pengisian. Kemudian MCB yang kedua dipasang pada jalur dari baterai menuju ke beban sehingga dapat melindungi komponen dari gangguan arus berlebih maupun hubung singkat.

2.2.6 Internet of Things

Internet of Things (IoT) adalah suatu konsep dengan menjelaskan kemampuan berbagai perangkat fisik untuk saling terhubung serta dapat berkomunikasi lewat jaringan internet dalam satu sistem yang terintegrasi. Dalam penerapannya, setiap perangkat dapat melakukan pertukaran data secara otomatis tanpa memerlukan keterlibatan langsung dari manusia. Arsitektur dasar IoT umumnya terdiri dari tiga elemen utama, yaitu perangkat fisik yang telah dilengkapi dengan modul IoT, media penghubung seperti modem atau router nirkabel sebagai akses ke jaringan internet, serta layanan cloud yang berfungsi sebagai pusat pengolahan, penyimpanan data, dan pengoperasian aplikasi. Cara kerja IoT didasarkan pada pemrograman yang mengatur setiap perintah sehingga mampu menghasilkan interaksi antarperangkat (*machine-to-machine*) secara otomatis. Sistem ini memungkinkan proses komunikasi dan pertukaran data berlangsung tanpa campur tangan manusia secara langsung serta tidak dibatasi oleh jarak geografis. Dalam hal ini, internet berperan sebagai media penghubung utama antarperangkat, sedangkan manusia berfungsi sebagai pengendali dan pengawas untuk memastikan sistem dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan (Sari et al., 2024).

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses pengumpulan data dilakukan secara berkelanjutan melalui sensor, yang kemudian diolah secara otomatis oleh sistem. Selain itu, dengan kemampuan memberikan notifikasi secara

real-time kepada pengelola. Sehingga menjadi solusi yang efektif dalam menangani permasalahan *monitoring* secara menyeluruh (Razzaqqi et al., 2025). Salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi dalam mendeteksi kebocoran pipa adalah dengan pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) yang dirancang sesuai dari kebutuhan pada sistem yang dirancang. Dengan alasan tersebut, dalam penelitian ini penggunaan teknologi IoT dapat dimanfaatkan untuk mendukung sistem *monitoring* kebocoran pipa air secara *real-time* dan terintegrasi, maka proses deteksi dilakukan menjadi lebih cepat, akurat, dan efisien.

2.2.6.1 Platform Blynk

Salah satu platform yang banyak digunakan dalam implementasi sistem *Internet of Things* adalah *Blynk*. Platform *Blynk* ini berfungsi sebagai antarmuka (*user interface*) yang memungkinkan pengguna dapat memantau kondisi sistem secara *real-time* melalui perangkat *smartphone*. *Blynk* dapat diintegrasikan dengan Mikrokontroler ESP32 melalui jaringan Wi-Fi untuk menampilkan data hasil pengukuran pada sistem (Wisudawan et al., 2025).



Gambar 2.8 *Blynk*

Pada penelitian ini, *Blynk* dimanfaatkan sebagai media *monitoring* untuk menampilkan beberapa meter seperti kontrol pompa air, kontrol *Solenoid Valve* sebagai simulasi kebocoran dan tampilan debit air yang diperoleh dari sensor *flow meter* serta total air yang dideteksi. Selain itu menampilkan parameter arus, tegangan dan daya pada pengisian baterai. Sehingga proses pemantauan sistem pendeteksi kebocoran pipa air ini dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien.

2.2.6.2 Platform Telegram

Telegram merupakan salah satu platform komunikasi yang banyak dimanfaatkan pada sistem *Internet of Things* (IoT) sebagai media pengiriman notifikasi secara *real-time*. Dengan integrasi dengan *Telegram Bot API*, Mikrokontroler seperti ESP32 dapat mengirimkan informasi hasil pembacaan sensor secara otomatis kepada pengguna

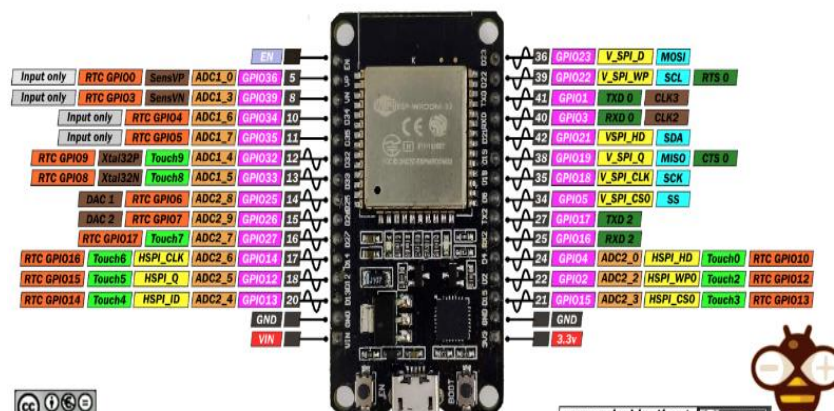
melalui jaringan internet. Penggunaan Telegram ini dipilih karena memiliki aplikasi yang ringan, mudah diakses, serta mampu memberikan notifikasi yang cepat ketika kondisi sistem mencapai batas yang telah ditentukan. Pengguna dapat melakukan pemantauan dan menerima informasi mengenai kondisi sistem tanpa harus berada di lokasi pengamatan (Nayoan & Arinal, 2025).



Gambar 2.9 Telegram Bot

Pada penelitian ini, Telegram dimanfaatkan sebagai media notifikasi untuk memberikan informasi kepada pengguna apabila sistem *monitoring* pendeteksi kebocoran pipa air mendeteksi adanya indikasi kebocoran. Integrasi antara ESP32 dan *Telegram Bot* memungkinkan proses pengiriman notifikasi berlangsung secara otomatis sehingga membantu proses pemantauan sistem dengan lebih cepat, efisien serta mudah diakses melalui perangkat *smartphone*.

2.2.7 Mikrokontroler ESP32



Gambar 2.10 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler ESP32 adalah Mikrokontroler yang terintegrasi dengan berbagai fitur seperti WiFi 802.11, Bluetooth versi 4.2, serta sejumlah peripheral pendukung. Perangkat ini termasuk chip yang lengkap karena telah dilengkapi dengan prosesor, memori penyimpanan, serta bisa digunakan untuk berbagai kebutuhan input dan output.

ESP32 juga dapat difungsikan sebagai alternatif pengganti Arduino karena kemampuannya dalam mendukung konektivitas WiFi secara langsung. Dengan kombinasi kemampuan dari ESP32 terhadap pemrosesan, konektivitas, dan fleksibilitas tersebut, ESP32 ini banyak digunakan pada banyak aplikasi seperti sistem *monitoring* lingkungan, sistem otomasi, serta perangkat berbasis IoT (Ilham et al., 2025).

ESP32 memiliki kelebihan dengan integrasi modul WiFi dan Bluetooth dalam satu chip, akan mempermudah pengembangan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) yang membutuhkan konektivitas nirkabel. Salah satu kelebihan yang dimiliki oleh ESP32 yaitu terdapat integrasi modul Wi-Fi dan Bluetooth dalam satu perangkat. Fitur ini memberikan kemudahan dalam pengembangan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT), terutama yang memerlukan konektivitas nirkabel untuk proses komunikasi data. Dengan adanya kemampuan tersebut, ESP32 dapat digunakan untuk menghubungkan perangkat ke jaringan internet maupun perangkat lain secara langsung, sehingga mendukung proses *monitoring* dan pengontrolan sistem dengan efisien dan *real-time*.

2.2.8 Sensor Aliran Air



Gambar 2.11 *Water Flow Sensor*

Sensor aliran air (*Water Flow Sensor*) adalah suatu perangkat yang dapat digunakan untuk mengukur debit aliran fluida, khususnya pada air. Untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat, sensor ini juga memerlukan proses kalibrasi. Dalam penelitian ini digunakan jenis sensor aliran air mekanis, yang bekerja dengan memanfaatkan rotor dan sensor efek Hall untuk mendeteksi pergerakan aliran air. Ketika

air mengalir melalui sensor, rotor akan berputar dan menghasilkan pulsa digital. Jumlah pulsa yang dihasilkan tersebut berbanding lurus dengan volume fluida yang mengalir melalui sensor (Sitindaon et al., 2024).

Sensor YF-S201 merupakan jenis sensor aliran air (*Water Flow Sensor*) yang dapat digunakan untuk melakukan pengukuran debit aliran air pada pipa atau selang. Sensor ini bekerja dengan mendeteksi aliran air yang melewatinya, kemudian menghasilkan data dalam bentuk pulsa yang dapat diolah untuk menentukan laju aliran (*flow rate*) maupun volume cairan yang mengalir. Pada penelitian ini digunakan sensor *water flow* YF-S201 untuk mengukur debit aliran air yang mengalir pada sistem. Pemilihan sensor ini didasarkan pada kemampuannya dalam mendeteksi laju aliran air secara *real-time*. Dengan memantau perubahan nilai debit air oleh sensor ini, sistem dapat mengidentifikasi adanya ketidaksesuaian aliran yang mengindikasikan potensi kebocoran.

2.2.9 Voltage Sensor



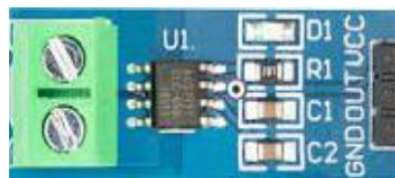
Gambar 2.12 Voltage Sensor

Voltage Sensor atau sensor tegangan ini adalah suatu modul yang digunakan untuk mengukur nilai tegangan listrik, tipe sensor tegangan yang digunakan pada penelitian ini menggunakan *Voltage Sensor* divider 0-25 V DC. *Voltage Sensor* divider merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur tegangan DC dengan prinsip pembagi tegangan (*Voltage Divider*), sehingga tegangan masukan yang lebih tinggi dapat diturunkan menjadi tegangan yang aman untuk dibaca oleh Mikrokontroler. Sensor ini terdapat dua terminal masukan, yaitu terminal positif dan negatif, yang dipasang secara paralel pada sumber tegangan yang akan diukur. Dengan konfigurasi pemasangan tersebut memungkinkan sensor mendeteksi nilai tegangan tanpa memengaruhi aliran arus pada rangkaian utama. Nilai tegangan analog yang dihasilkan sebanding dengan tegangan

masuk dan dapat dibaca oleh Mikrokontroler untuk proses pemantauan dan pengolahan data. Nilai tegangan yang diterima kemudian akan dibaca oleh ESP32 untuk memantau nilai tegangannya (Prasojo, 2025).

Dalam penelitian ini, sensor tegangan dipasang pada jalur pengisian baterai yaitu dipasang pada jalur antara *Solar Charge Controller* dan baterai LiFePO₄. Sehingga *Voltage Sensor* dalam penelitian ini berfungsi untuk mengukur tegangan keluaran dari SCC selama proses pengisian (*Charging*) baterai. Data tegangan dari pembacaan sensor digunakan sebagai informasi untuk mengetahui perubahan tegangan baterai pada proses pengisian.

2.2.10 Sensor Arus ACS712



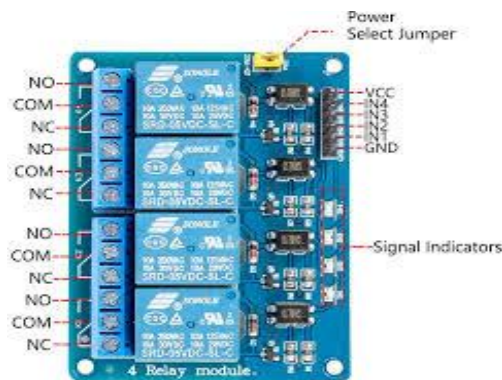
Gambar 2.13 Sensor Arus ACS712

Sensor arus ACS712 adalah modul sensor yang digunakan untuk mengukur besarnya arus listrik, sensor ini dapat digunakan untuk mengukur arus searah (DC) dan arus bolak balik (AC). Sensor ACS712 banyak digunakan pada sistem *monitoring* energi listrik karena memiliki tingkat sensitivitas yang baik, ukurannya yang cukup kecil, serta mampu melakukan pengukuran tanpa kontak langsung dengan penghantar utama. Pada sensor ini bekerja dengan prinsip Hall effect yaitu dengan memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui penghantar di dalam sensor tersebut. Dari medan magnet tersebut kemudian akan diubah menjadi tegangan analog yang nilainya sebanding dengan besarnya arus yang terukur, sehingga dapat dibaca dan diproses oleh ESP32 (Lubis et al., 2022). Dalam penelitian ini, sensor ACS712 digunakan untuk mengukur arus pengisian pada baterai yang dipasangnya di jalur antara *Solar Charge Controller* dan Baterai LiFePO₄. Sehingga untuk hasil dari pengukuran arusnya akan digunakan untuk mengetahui nilai arus ketika proses pengisian baterai.

2.2.11 Modul Relay 4 Channel

Modul relay 4 channel adalah perangkat elektronik yang berfungsi sebagai saklar (*switch*) untuk menghubungkan atau memutus rangkaian listrik secara otomatis yang

dikendalikan secara elektrik menggunakan prinsip elektromagnetik. Relay dikendalikan menggunakan sinyal bertegangan rendah dari Mikrokontroler, sehingga dapat mengontrol beban dengan tegangan yang lebih besar tanpa terhubung langsung dengan rangkaian kendali. Relay ini bekerja dengan memanfaatkan kumparan (*coil*) yang dialiri arus listrik sehingga menghasilkan medan magnet yang menarik *armature*. Dengan cara kerja relay tersebut, relay dapat mengendalikan proses menghubungkan atau memutus aliran listrik secara otomatis sesuai dengan sinyal yang diberikan Mikrokontroler (Samudra & Julia, 2021).



Gambar 2.14 Modul Relay 4 Channel

Dalam penelitian kali ini, modul relay 4 channel digunakan sebagai sakelar yang dikendalikan oleh Mikrokontroler ESP32 untuk mengontrol kerja dari pompa air dan *Solenoid Valve*. Relay akan menghubungkan dan memutus aliran listrik berdasarkan sinyal kontrol dari Mikrokontroler ESP32. Sehingga pompa dan *Solenoid Valve* dapat nyala dan mati secara otomatis oleh sistem.

2.2.12 Pompa Air



Gambar 2.15 Pompa Air

Pompa air merupakan perangkat yang digunakan untuk memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lain dengan cara meningkatkan tekanan dan kecepatan aliran.

Proses ini terjadi melalui konversi energi mekanik dari penggerak menjadi energi potensial dalam bentuk tekanan, sehingga fluida dapat mengalir sesuai dengan kebutuhan sistem. Dalam proses perpindahannya, fluida dapat dialirkan secara horizontal, vertikal, maupun kombinasi keduanya, dengan mempertimbangkan adanya hambatan seperti gesekan dan perbedaan tekanan antara sisi masuk dan sisi keluar (*discharge*) yang mempengaruhi kinerja aliran (Jody et al., 2021). Pompa air DC digunakan sebagai aktuator dalam sistem untuk mengalirkan fluida sesuai kebutuhan yang dikendalikan oleh Mikrokontroler. Penggunaan pompa dalam sistem otomatis memungkinkan proses distribusi fluida berjalan secara efisien dan terkontrol, sehingga mendukung kinerja sistem secara keseluruhan.

Pemilihan pompa air mini DC 12V dalam penelitian ini didasarkan pada kesesuaiannya dengan sistem catu daya berbasis PLTS yang umumnya menghasilkan tegangan DC. Pompa jenis ini memiliki konsumsi daya yang relatif rendah sehingga cocok digunakan sebagai beban pada sistem skala kecil berbasis *Internet of Things* (IoT). Selain itu, ukurannya serta kemudahan dalam pengoperasian dan integrasi dengan Mikrokontroler menjadikan pompa ini efektif digunakan dalam simulasi aliran air untuk keperluan *monitoring* kebocoran pipa. Dengan karakteristik tersebut, pompa DC 12V dinilai mampu mendukung pengujian sistem secara efisien.

2.2.13 *Clamp Meter*



Gambar 2.16 *Clamp Meter*

Clamp Meter merupakan alat ukur listrik yang digunakan untuk mengukur besarnya arus listrik tanpa harus memutus rangkaian listrik yang sedang beroperasi. Alat ini bekerja dengan mendeteksi medan magnet yang dihasilkan oleh penghantar berarus

sehingga proses pengukuran dapat dilakukan secara cepat, aman, dan praktis. Oleh karena itu, *Clamp Meter* banyak digunakan dalam kegiatan pengujian maupun pemeliharaan instalasi listrik karena mampu memberikan hasil pengukuran arus secara langsung tanpa mengganggu kontinuitas sistem (Nabila et al., 2025). Dalam pengujian kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), *Clamp Meter* digunakan untuk mengukur arus keluaran panel surya maupun arus pada proses pengisian baterai dan konsumsi arus beban.

2.2.14 *Solar Power Meter*



Gambar 2.17 *Solar Power Meter*

Solar Power Meter merupakan suatu alat ukur yang digunakan untuk mengukur besarnya intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan panel surya. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui potensi energi surya pada lokasi pengujian sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam mengetahui kemampuan panel surya menghasilkan energi listrik. Data intensitas radiasi matahari juga berperan penting dalam menganalisis hubungan antara kondisi penyinaran dengan daya keluaran sistem PLTS (Kiswanto et al., 2022).

Semakin besar nilai intensitas radiasi matahari yang diterima panel surya, maka potensi energi listrik yang dapat dihasilkan juga semakin besar. Oleh karena itu, pengukuran intensitas radiasi matahari diperlukan untuk mengetahui kondisi penyinaran selama proses pengujian serta sebagai data pendukung dalam menganalisis hubungan antara intensitas cahaya matahari dengan tegangan, arus, daya, dan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Pada penelitian ini, *Solar Power Meter* digunakan untuk mengukur intensitas penyinaran matahari selama pengambilan data sehingga hasil pengujian kinerja sistem PLTS dapat dianalisis berdasarkan kondisi radiasi matahari pada

saat pengujian berlangsung.

2.2.15 Parameter dan Perhitungan Kinerja Sistem PLTS

Untuk mengetahui tingkat kinerja pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang digunakan pada penelitian ini, diperlukan beberapa parameter pengukuran serta metode perhitungan yang tepat. Parameter ini digunakan untuk mengetahui kinerja pada sistem yang dibuat. Oleh karena itu, bagian ini dibahas berbagai parameter dan perhitungan untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS.

1. Daya Listrik

Daya listrik adalah suatu besaran yang menunjukkan laju penggunaan atau penyaluran energi listrik dalam suatu rangkaian pada setiap satuan waktu. Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), daya keluaran panel surya dipengaruhi oleh nilai arus dan tegangan yang dihasilkan selama proses konversi energi dari cahaya matahari diubah menjadi energi listrik. Besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan panel surya didapatkan dari hasil perkalian antara tegangan keluaran dengan arus mengalir pada rangkaian (Yuliananda & Surya, 2019). Nilai daya ini menjadi salah satu parameter dalam mengetahui kemampuan panel surya dalam menghasilkan energi listrik sesuai dengan kondisi pengujian. Hubungan antara tegangan, arus dan daya dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$P = V \times I$$

Keterangan :

P = Daya keluaran (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (*Ampere*)

2. Energi Listrik

Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, di antaranya luas permukaan panel surya, tingkat efisiensi modul, intensitas radiasi matahari yang diterima, serta kinerja keseluruhan sistem. Kombinasi dari beberapa faktor tersebut yang dapat menentukan besarnya energi yang dapat dikonversi dari sumber energi matahari menjadi energi listrik.

Untuk mengetahui besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS,

diperlukan suatu perhitungan yang didasarkan pada parameter kelistrikan yang diukur. Energi listrik yang diproduksi dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$E = P \times t$$

Keterangan :

E = Energi (Wh)

P = Daya listrik (W)

t = Waktu (jam)

3. Estimasi Waktu Pengisian Baterai

Proses pengisian baterai dipengaruhi oleh besarnya arus pengisian yang berasal dari panel surya. Semakin besar arus pengisian yang diterima baterai, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi penuh akan lebih singkat. Sebaliknya, ketika arus pengisian yang dihasilkan panel surya kecil maka waktu pengisian baterai akan menjadi lebih lama. Besarnya arus pengisian dipengaruhi oleh kondisi penyinaran matahari. Peningkatan intensitas radiasi matahari akan meningkatkan tegangan dan arus keluaran panel surya sehingga proses pengisian baterai dapat berlangsung lebih cepat. Estimasi waktu pengisian baterai dapat dihitung berdasarkan kapasitas baterai dan besar arus pengisian (Setyawan, 2022). Lama waktu pengisian baterai dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$t = \frac{C}{I}$$

Keterangan :

t = estimasi waktu pengisian baterai (jam)

C = kapasitas baterai (Ah)

$I_{rata-rata}$ = arus pengisian (A)

4. Keseimbangan Energi (Energy Balance)

Keseimbangan energi merupakan konsep yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara energi yang masuk, energi yang digunakan atau disalurkan, serta energi yang hilang dalam suatu sistem. Pada PLTS yang terdiri atas panel surya, *Solar Charge Controller*, baterai, dan beban, energi yang dihasilkan panel tidak seluruhnya dapat diterima oleh baterai atau beban karena terdapat rugi-rugi selama proses konversi dan

penyaluran.

$$E_{Input} = E_{output} + E_{loss}$$

5. Efisiensi pengisian baterai sistem PLTS

Efisiensi dalam pengisian baterai (*charging efficiency*) menunjukkan kemampuan panel surya dalam menyalurkan energi listrik dari panel surya ke baterai selama proses pengisian. Nilai efisiensi diperoleh dari perbandingan antara energi yang disalurkan menuju baterai terhadap energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya selama proses pengisian dan dinyatakan dalam bentuk persentase. Semakin tinggi nilai efisiensi, maka semakin kecil rugi-rugi energi (*losses*) yang terjadi pada sistem pengisian (Salam & Tama, 2025). Dengan nilai efisiensi, dapat dilakukan evaluasi terhadap kinerja panel surya dalam menghasilkan energi listrik secara optimal (Mukhtar & Syauckani, 2025). Untuk mengetahui efektivitas panel surya, efisiensi pengisian energi pada baterai dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\eta = \frac{E_{baterai}}{E_{PLTS}} \times 100\%$$

Keterangan :

η = Efisiensi konversi energi (%)

$E_{baterai}$ = Energi yang disalurkan menuju Baterai (Wh)

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

6. Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai dihitung berdasarkan total kebutuhan energi listrik dengan tegangan nominal pada baterai yang digunakan. Dalam perhitungan kapasitas baterai cukup penting agar baterai yang digunakan sesuai dengan daya yang dibutuhkan (Khoiri et al., 2024). Perhitungan kapasitas baterai dilakukan menggunakan persamaan:

$$C = \frac{E}{V}$$

Keterangan:

C = kapasitas baterai (Ah)

E = Energi listrik (Wh)

V = Tegangan nominal baterai (V)