

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Untuk mengumpulkan informasi yang mendalam tentang terobosan ilmiah dan teknologi yang kini diketahui, studi ini juga memasukkan penelitian-penelitian relevan yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya mengenai subjek tersebut. Berikut, beberapa artikel jurnal / referensi yang berkaitan dengan penelitian ini:

Pada penelitian yang relevan berjudul “*Monitoring Pengaruh Suhu pada Panel Surya Terhadap Performa Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Surya*” (Jaya Indra Bayu, Irrine Budi Sulistiyawati, Ni Putu Agustini, 2023), dijelaskan bahwa performa modul PV sangat dipengaruhi oleh parameter suhu permukaan panel, suhu lingkungan, intensitas radiasi matahari, serta kecepatan angin. Penelitian ini merancang sistem *monitoring* menggunakan sensor DS18B20 untuk suhu panel, DHT11 untuk suhu lingkungan, anemometer untuk kecepatan angin, dan *photovoltaic cell* terkalibrasi sebagai pengganti pyranometer. Seluruh sensor dikendalikan oleh Arduino, sehingga data dapat dipantau secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kenaikan suhu panel di atas 50°C menurunkan efisiensi listrik, sedangkan adanya pendinginan alami dari hembusan angin mampu meningkatkan daya keluaran serta efisiensi panel surya [1].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Zahriya Okta Priani, Hakimul Batih, dan Syamsir Abduh (2025) dengan judul “Pengaruh Suhu dan Durasi Penyinaran Panel Surya terhadap Efisiensi Energi Panel Surya: Studi Kasus PLTS Institut Teknologi PLN”, dijelaskan bahwa efisiensi sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh perubahan suhu dan lama penyinaran matahari. Melalui pendekatan analisis statistik *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM), penelitian ini menemukan bahwa kenaikan suhu memiliki pengaruh negatif terhadap efisiensi panel, dengan koefisien jalur sebesar -1.128 pada musim kemarau dan -1.065 pada musim hujan. Sebaliknya, durasi penyinaran berpengaruh positif terhadap efisiensi dengan nilai 0.361 pada musim kemarau dan 0.209 pada musim hujan [2].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yubelin Ira Merdekawati, Ishak Samuel Erari, dan Abdul Muis Muslimin (2021) dengan judul “Penggunaan Modul Peltier sebagai

Sistem Pendingin *Coolbox*”, dijelaskan mengenai penerapan modul Peltier sebagai sistem pendingin termoelektrik pada wadah penyimpan suhu rendah (*coolbox*). Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan jumlah modul Peltier sebanyak satu, dua, dan tiga buah serta variasi beban pendinginan berupa *coolbox* kosong, berisi satu liter air, dan dua liter air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan jumlah modul Peltier mampu mempercepat proses penurunan suhu dan menurunkan suhu minimum yang dapat dicapai, namun di sisi lain meningkatkan konsumsi daya listrik. Setiap penambahan satu modul mampu menurunkan suhu terendah sekitar $2,75^{\circ}\text{C}$ dan meningkatkan kebutuhan daya rata-rata sebesar 17,15 watt. Penelitian ini menegaskan bahwa desain sistem pembuangan panas dan manajemen termal yang efisien sangat berpengaruh terhadap kinerja modul Peltier sebagai pendingin aktif, sehingga menjadi acuan penting dalam pengembangan sistem pendinginan aktif pada panel surya berbasis efek termoelektrik [3].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Sianturi dan Simbolon (2021) dengan judul “Pengukuran dan Analisa Data Radiasi Matahari di Stasiun Klimatologi Muaro Jambi”, dibahas karakteristik radiasi matahari sebagai parameter penting dalam kajian potensi energi surya. Penelitian ini menggunakan *Automatic Solar Radiation Station* (ASRS) untuk mengukur radiasi global, radiasi baur, dan radiasi langsung dengan resolusi waktu 10 menit selama periode 2018–2019, dimana besaran radiasi dinyatakan dalam bentuk irradiansi matahari (G) dengan satuan W/m^2 . Hasil penelitian menunjukkan bahwa radiasi matahari memiliki pola diurnal dan musiman yang jelas, dengan nilai puncak radiasi global mencapai sekitar 1200 W/m^2 serta nilai rata-rata akumulasi harian sebesar $4,4 \pm 1,0 \text{ kWh/m}^2$ per hari, dan sangat dipengaruhi oleh kondisi tutupan awan. Temuan ini relevan dengan penelitian yang dilakukan karena menegaskan peran irradiansi matahari sebagai variabel dasar dalam perhitungan daya masukan panel surya dan analisis kinerja sistem PLTS [4].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Bakhtiar dan Tadjuddin (2020) dengan judul “Pemilihan *Solar charge controller* (SCC) Pembangkit Listrik Tenaga Surya”, Pada penelitian ini, SCC yang digunakan adalah SCC tipe PWM yang dihubungkan dengan satu buah panel surya bertegangan 12 V dan daya 100 Wp, serta baterai bertegangan 12 V dengan kapasitas 100 Ah. Konfigurasi ini mencerminkan sistem PLTS skala kecil yang umum digunakan pada aplikasi rumah tangga atau sistem mandiri (*off-grid*). Penggunaan

SCC tipe PWM pada sistem ini bertujuan untuk memastikan proses pengisian baterai berlangsung secara aman, stabil, dan sesuai dengan karakteristik baterai yang digunakan. Dengan adanya SCC, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat dimanfaatkan secara optimal tanpa menimbulkan risiko kerusakan pada baterai. Oleh karena itu, pemilihan dan penerapan SCC yang tepat menjadi aspek penting dalam perancangan dan pengoperasian sistem panel surya berbasis penyimpanan energi [5].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Bakhtiar dan Tadjuddin (2020) dengan judul “Sosialisasi Pemanfaatan Koper Listrik Sebagai *Mobile Supply* Dalam Penerapan Energi Baru Terbarukan Di Cantiga Petir Cipondoh-Tangerang”, PLTS bekerja dengan memanfaatkan panel surya untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Energi listrik yang dihasilkan kemudian dapat digunakan secara langsung atau disimpan terlebih dahulu dalam sistem penyimpanan energi berupa baterai. Dalam penerapannya pada jurnal ini, PLTS digunakan sebagai sumber pengisian energi pada sistem koper listrik yang berfungsi sebagai penyimpanan energi portabel. Penggunaan panel surya tipe monokristalin dengan spesifikasi 12 V dan 200 Wp menunjukkan bahwa sistem PLTS skala kecil mampu menghasilkan energi listrik yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban tertentu, khususnya pada kondisi intensitas matahari yang baik [6].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Akbar, Teuku Azuar Rizal, dan Rita Syntia (2021) dengan judul “Pengujian Kinerja Pendinginan Thermo Electric *Cooling* (TEC) Menggunakan *Heatsink* dengan Variasi Dimensi dan Jenis Material”, dibahas karakteristik kinerja pendingin termoelektrik berbasis modul Peltier TEC-12706 dengan fokus pada pengaruh variasi dimensi dan tipe *heatsink* terhadap kemampuan pendinginan. Penelitian ini menggunakan sistem pendingin termoelektrik yang dilengkapi *heatsink* sisi panas dan sisi dingin, kipas DC, serta *box* pendingin berlapis styrofoam dan aluminium untuk menjaga stabilitas suhu. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan *thermocouple* yang terhubung dengan *temperature recorder*, dengan variasi tegangan kerja kipas dan modul termoelektrik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tipe *heatsink* memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja pendinginan, di mana *heatsink* tipe A dengan sirip jarang memberikan performa pendinginan yang lebih optimal dibandingkan *heatsink* tipe B dengan sirip rapat. Selain itu, variasi tegangan suplai juga

terbukti memengaruhi stabilitas dan efektivitas penurunan suhu pada sisi dingin modul termoelektrik, sehingga pemilihan konfigurasi *heatsink* dan kondisi operasi menjadi faktor penting dalam sistem pendinginan berbasis *Thermo Electric Cooling* (TEC) [7].

2.2 Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi baru terbarukan yang bersumber dari radiasi matahari dan dikonversikan menjadi energi listrik. Pemanfaatan PLTS menjadi bagian penting dalam upaya pembangunan nasional untuk meningkatkan akses energi listrik yang berkelanjutan, sebagaimana tercantum dalam Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2005–2025. Energi surya dipandang sebagai sumber energi yang potensial karena ketersediaannya yang melimpah, ramah lingkungan, serta dapat dimanfaatkan secara langsung tanpa menghasilkan emisi gas buang. Oleh karena itu, PLTS menjadi salah satu solusi strategis dalam mendukung transisi energi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan [6].

Pemanfaatan PLTS sangat relevan diterapkan pada wilayah dengan paparan sinar matahari yang tinggi dan ketersediaan lahan yang terbatas. Kondisi ini menjadikan PLTS sebagai sumber energi alternatif yang sesuai untuk mendukung kegiatan masyarakat, terutama pada saat dibutuhkan pasokan listrik sementara atau cadangan daya untuk kegiatan sosial dan rumah tangga. Dengan memanfaatkan energi matahari, ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional dapat dikurangi. Selain sebagai sumber energi ramah lingkungan, PLTS juga memberikan manfaat dari sisi efisiensi dan penghematan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS dan disimpan dalam baterai dapat digunakan kembali untuk menyuplai berbagai beban listrik, sehingga mampu mengurangi konsumsi energi dari jaringan utama.



Gambar 2. 1 PLTS Jenis *Polycrystalline*

Kelebihan utama PLTS terletak pada sumber energinya yang tidak terbatas, ramah lingkungan, dan dapat diaplikasikan dalam berbagai skala, mulai dari rumah tangga hingga pembangkit skala besar. Namun demikian, PLTS memiliki keterbatasan yang cukup signifikan, terutama dipengaruhi oleh kondisi cuaca, intensitas radiasi matahari, serta suhu operasi modul. Faktor suhu menjadi perhatian penting karena meningkatnya temperatur sel surya akan menurunkan tegangan keluaran dan pada akhirnya mengurangi efisiensi sistem.

Di Indonesia, potensi pengembangan PLTS sangat besar mengingat letak geografis yang berada di garis khatulistiwa dengan intensitas radiasi matahari rata-rata cukup tinggi sepanjang tahun. Kondisi ini memberikan peluang besar bagi penerapan PLTS sebagai alternatif penyedia energi listrik yang berkelanjutan dan dapat mendukung program transisi energi nasional. Dengan demikian, pemahaman mengenai prinsip kerja, karakteristik, serta faktor-faktor yang memengaruhi kinerja PLTS menjadi landasan penting dalam perancangan maupun pengembangan sistem berbasis energi surya.

2.2.2 Panel Surya

Panel surya atau modul fotovoltaik merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaik. Proses ini terjadi ketika foton cahaya matahari mengenai material semikonduktor sehingga menyebabkan perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, menghasilkan arus listrik searah (DC). Setiap sel surya terdiri dari sambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk beda potensial listrik saat terkena cahaya.

Jenis panel surya yang umum digunakan ialah monocrystalline silicon dan polycrystalline silicon. Panel monokristalin terbuat dari satu kristal silikon murni dengan struktur atom yang seragam, menghasilkan efisiensi konversi yang lebih tinggi, biasanya pada kisaran 15–20%, serta memiliki daya tahan lebih baik terhadap peningkatan suhu. Sebaliknya, panel polikristalin terbentuk dari beberapa kristal silikon yang dilebur bersama, berwarna kebiruan, dan memiliki efisiensi lebih rendah di kisaran 12–16%, namun dengan biaya produksi yang lebih murah [8].

Kinerja panel surya ditentukan oleh parameter utama seperti arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}), tegangan dan arus maksimum (V_{mp} , I_{mp}), serta *fill factor* (FF). Faktor-faktor eksternal seperti intensitas radiasi matahari dan suhu permukaan panel sangat memengaruhi daya keluaran dan efisiensi konversi energi. Ketika suhu meningkat, resistansi internal pada material semikonduktor bertambah, sehingga tegangan menurun dan efisiensi konversi berkurang.

Penelitian empiris menunjukkan bahwa penurunan suhu permukaan panel dapat meningkatkan efisiensi secara signifikan. Penelitian dalam Jurnal *Cyclotron*, panel *monocrystalline* [9] dengan air pendingin menghasilkan daya maksimum sebesar 31,77 W pada suhu 26°C, sementara tanpa pendinginan hanya mencapai 28,22 W pada suhu 50°C. Hasil tersebut memperkuat teori bahwa semakin rendah suhu kerja panel, semakin besar daya dan efisiensi yang dihasilkan, karena penurunan temperatur membantu mempertahankan tegangan keluaran yang stabil.



Gambar 2. 2 Panel Surya 5 WP

Spesifikasi Panel Surya yang ditunjukkan gambar 2. 2 :

Tabel 2. 1 Spesifikasi Modul Surya Monocrystalline

SPESIFIKASI	
Jenis Modul	: <i>Mono Crystalline Solar Module</i>
Kondisi Pengujian	: STC ($1000W/m^2$, AM 1.5, Suhu Sel $25^{\circ}C$)
Daya Puncak (P_{max})	: 5 W
Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc})	: 21,3 V
Arus Hubung Singkat (I_{sc})	: 0,31 A
Tegangan pada Daya Maksimum (V_{mp})	: 17,60 V
Arus pada Daya Maksimum (I_{mp})	: 0,29 A
Tegangan Nominal	: 12 V
Tegangan Sistem Maksimum	: 600 V
Toleransi Daya	: $\pm 5\%$
Sertifikasi	: SNI #3850.2-1995
Standar Manajemen Mutu	: ISO 9001:2000

2.2.3 Efisiensi PLTS dan Pengaruh Suhu

Efisiensi dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan ukuran kemampuan panel surya dalam mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Nilai efisiensi sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, intensitas radiasi, dan durasi penyinaran. Semakin tinggi suhu permukaan panel, maka tegangan keluaran (V_{oc}) cenderung menurun akibat peningkatan resistansi internal pada material semikonduktor, sehingga daya keluaran dan efisiensi sistem ikut menurun [2].

Secara umum, kenaikan suhu akan menyebabkan penurunan efisiensi panel surya, karena kinerja material semikonduktor menurun pada temperatur yang terlalu tinggi. Setiap kenaikan suhu sekitar $1^{\circ}C$ di atas suhu standar ($25^{\circ}C$) dapat menurunkan efisiensi konversi energi panel sebesar 0,4–0,5%, tergantung pada jenis bahan yang digunakan. Sebaliknya, semakin lama durasi penyinaran dengan intensitas radiasi yang stabil, semakin besar pula energi listrik yang dapat dikonversi oleh modul surya. Namun, apabila

peningkatan lama penyinaran disertai suhu yang terlalu tinggi, maka peningkatan energi tidak lagi diikuti oleh kenaikan efisiensi.



Gambar 2. 3 Pengukuran Suhu Dan Tegangan Pada Modul
Panel Surya Mini

Dalam konteks iklim tropis seperti Indonesia, suhu lingkungan yang dapat mencapai lebih dari 35°C menyebabkan panel bekerja pada suhu tinggi, yang berpotensi menurunkan efisiensi hingga lebih dari 10% dari nilai idealnya. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendinginan aktif seperti *reservoir* air, pipa sirkulasi fluida, atau modul termoelektrik (Peltier) yang dapat membantu mempertahankan suhu permukaan panel agar tetap pada kisaran optimal, yaitu 25–30°C.

2.2.4 Sistem Pendinginan PLTS

Sistem pendinginan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berfungsi untuk menjaga suhu panel surya agar tetap berada dalam kondisi kerja yang ideal. Saat panel surya menerima cahaya matahari, sebagian energi cahaya diubah menjadi listrik, sementara sebagian lainnya menjadi panas. Jika panas ini tidak dilepaskan dengan baik, suhu permukaan panel akan meningkat dan menyebabkan penurunan tegangan serta efisiensi daya listrik. Umumnya, setiap kenaikan suhu sebesar satu derajat Celsius di atas suhu standar (25°C) dapat menurunkan efisiensi panel sekitar 0,45–0,5%. Karena itu, pengendalian suhu menjadi hal penting untuk menjaga kinerja sistem PLTS tetap stabil dan efisien.

Secara umum, sistem pendinginan panel surya dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pendinginan pasif dan pendinginan aktif.

- Pendinginan pasif bekerja tanpa memerlukan sumber daya tambahan. Contohnya adalah pendinginan alami melalui hembusan angin, penggunaan bahan berdaya serap panas tinggi, atau pemasangan sirip pendingin (*heatsink*) di bagian belakang panel. Meskipun sederhana dan hemat energi, sistem ini memiliki keterbatasan dalam menurunkan suhu ketika radiasi matahari sangat tinggi.
- Pendinginan aktif, sebaliknya, memanfaatkan energi tambahan untuk menggerakkan media pendingin seperti air atau udara. Media pendingin ini dapat disirkulasikan dengan bantuan pompa atau kipas untuk mempercepat pelepasan panas dari permukaan panel.

Salah satu metode yang banyak digunakan dalam sistem pendinginan aktif adalah pendinginan berbasis air (*water cooling system*). Air memiliki kemampuan menyerap panas lebih baik dibandingkan udara karena kapasitas panas jenisnya yang tinggi. Dalam penerapannya, air dapat dialirkan di bawah panel, disemprotkan ke permukaan panel, atau digunakan dalam sistem sirkulasi tertutup dengan tangki penampungan (*reservoir*). Penggunaan air sebagai media pendingin terbukti dapat menjaga suhu panel tetap stabil, terutama pada siang hari ketika suhu lingkungan sangat tinggi [10].

2.2.5 Pendingin Termoelektrik

Teknologi termoelektrik menjadi salah satu alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di masa depan. Namun, pengembangan dan pemanfaatan teknologi ini sebagai sumber energi alternatif memerlukan perhatian dan dukungan dari berbagai pihak, termasuk pemerintah, sektor industri, perguruan tinggi, serta masyarakat. Material termoelektrik yang dikenal sebagai elemen Peltier memiliki kemampuan untuk mengubah energi panas secara langsung menjadi energi listrik melalui prinsip termoelektrik, atau sebaliknya berfungsi sebagai media pendingin dengan menyerap panas. Proses konversi energi ini berlangsung tanpa menghasilkan emisi gas berbahaya seperti karbon dioksida maupun polutan lain, sehingga teknologi termoelektrik berpotensi menjadi solusi energi yang ramah lingkungan [7].

Selain pendinginan dengan air, terdapat pula sistem pendinginan termoelektrik (Peltier). Modul Peltier bekerja berdasarkan perbedaan suhu di antara dua sisi ketika

dialiri arus listrik. Satu sisi modul menjadi dingin dan menyerap panas dari permukaan panel, sementara sisi lainnya membuang panas ke udara dengan bantuan sirip pendingin atau kipas. Penerapan sistem pendinginan menggunakan Peltier dapat membantu menurunkan suhu panel lebih cepat dan mempertahankan suhu air pendingin pada tingkat yang konstan [11].



Gambar 2. 4 TEC1-12706 Modul Termoelektrik

Tabel 2. 2 Spesifikasi Modul Termoelektrik TEC1-12706

SPESIFIKASI	
Jenis Modul	: <i>Thermoelectric Cooler (TEC)/ Peltier</i>
Model	: TEC1-12706
Prinsip Kerja	: Perpindahan Panas akibat arus DC
Tegangan Operasi Maksimum	: 12 V DC
Arus Maksimum	: 6 A
Daya Listrik Maksimum	: ± 72 W
Perbedaan Suhu Maksimum	: $\pm 65^{\circ}\text{C}$
Kapasitas Pendinginan Maksimum	: $\pm 50 - 60$ W
Suhu Sisi Panas Maksimum	: 138°C
Suhu Operasional	: $- 30^{\circ}\text{C}$ hingga $+ 70^{\circ}\text{C}$
Kebutuhan Tambahan	: <i>Heatsink & kipas</i> pada sisi panas
Aplikasi Umum	: Pendingin Panel Surya & <i>Mini Cooler</i> .

2.2.6 Sistem Pendinginan *Hybrid* pada Panel Surya

Metode pendinginan menggunakan media air dan pendingin termoelektrik (Peltier) memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing dalam mengendalikan suhu permukaan panel surya. Dalam perkembangannya, kedua metode tersebut dapat dikombinasikan menjadi suatu sistem pendinginan *hybrid*, di mana media air berfungsi sebagai penyerap dan pendistribusi panas utama, sedangkan modul Peltier berperan dalam mempercepat proses pelepasan panas. Dengan demikian, sistem pendinginan *hybrid* mampu meningkatkan efektivitas proses pendinginan dibandingkan penggunaan satu metode secara terpisah.

Lebih lanjut, penerapan sistem pendinginan *hybrid* dinilai mampu mempertahankan kinerja dan efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya pada wilayah beriklim tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun. Dalam kondisi tersebut, kenaikan suhu permukaan panel surya berpotensi menurunkan efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengendalian suhu yang optimal menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas kinerja sistem PLTS.

Dengan adanya pengendalian suhu yang tepat melalui sistem pendinginan *hybrid*, panel surya dapat beroperasi pada kondisi kerja yang lebih optimal. Hal ini berdampak pada peningkatan kestabilan daya keluaran serta efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan. Secara keseluruhan, penerapan sistem pendinginan *hybrid* memberikan kontribusi positif dalam mendukung kinerja PLTS yang lebih andal dan efisien, terutama pada lingkungan dengan beban termal yang tinggi.

2.2.7 Pengaruh Air

Air berfungsi sebagai media pendingin utama dalam sistem *hybrid* ini, yang dimana fungsi utamanya menyerap panas dari permukaan panel melalui *waterblock*. *Waterblock* ini sebagai media penyalur panas dari permukaan yang panas seperti belakang panel surya dan juga biasa digunakan pada prosesor elektronik. Pengaruh air pada plts sebagai media pendingin, sebagai berikut :

- a. Air menyerap panas dari permukaan panel melalui *waterblock*.
- b. Suhu air masuk dan keluar diukur untuk menentukan efektivitas proses pendinginan.
- c. Sirkulasi air pada *waterblock* yang baik mampu menjaga panel tetap dingin dan meningkatkan efisiensi daya keluaran panel.
- d. Jika aliran air lambat atau berhenti, panas tidak terserap maksimal sehingga suhu panel naik cepat.

2.2.8 Reservoir Tank (Tangki Penampung Air)

Tangki penampung air atau *reservoir* tank merupakan wadah penyimpanan air yang dirancang untuk menampung volume tertentu dari aliran air agar dapat digunakan kembali sesuai kebutuhan sistem. Dalam konteks sistem energi, *reservoir* tank berfungsi sebagai media penyimpan energi potensial dari air, yang dapat dimanfaatkan baik untuk pembangkit listrik, sistem pendinginan, maupun sirkulasi fluida. Tangki ini menjaga ketersediaan air tetap stabil meskipun terjadi perubahan debit atau tekanan pada sistem, sehingga operasi sistem menjadi lebih efisien dan berkelanjutan [12].

Selain berfungsi sebagai tempat penampungan air, *reservoir* tank juga memiliki peran penting dalam sistem energi, terutama pada sistem yang menggabungkan dua sumber atau metode kerja yang berbeda. Dalam konteks sistem tenaga surya, *reservoir* berfungsi sebagai media penyimpanan air yang digunakan untuk sirkulasi pendinginan atau proses pengaturan suhu panel. Air di dalam tangki dapat disalurkan kembali ke permukaan panel melalui pompa untuk menyerap panas berlebih, kemudian mengalir kembali ke tangki dalam sistem tertutup. Dengan cara ini, *reservoir* tank membantu menjaga ketersediaan air pendingin, mengurangi kehilangan panas, serta mendukung kinerja sistem pendinginan agar lebih efisien dan berkelanjutan [12].

2.2.9 Prinsip Sirkulasi Air

Sistem pendinginan berbasis air (*water cooling system*) bekerja dengan mensirkulasikan air untuk menyerap panas dari permukaan panel surya. Air dialirkan dari tangki penampung (*reservoir*) ke bagian belakang atau permukaan panel surya menggunakan pompa. Setelah menyerap panas dari panel, air kembali ke tangki untuk

melepaskan sebagian panas ke udara sebelum digunakan kembali. Proses ini membentuk sirkulasi tertutup, yang artinya air terus berputar di dalam sistem tanpa dibuang.



Gambar 2. 5 Cara Kerja Sistem PLTS dengan Pendinginan *Reservoir Air*

Bagian-bagian komponen:

a. Panel Surya (*Solar Panel*)

Panel surya berfungsi sebagai komponen utama yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Setiap sel surya menghasilkan arus listrik searah (DC) yang selanjutnya dialirkan ke sistem pengendali daya untuk diolah dan dimanfaatkan.

b. Sistem Pendingin *Reservoir Air* (*Water Cooling System*)

Sistem pendingin berbasis air digunakan untuk menjaga suhu kerja panel surya agar tetap berada pada batas optimal. Saat panel menyerap radiasi matahari, sebagian energi berubah menjadi panas yang dapat menurunkan efisiensi konversi listrik. Untuk mengatasinya, air dari tangki penampung (*reservoir tank*) dialirkan ke permukaan atau bagian belakang panel guna menyerap panas berlebih. Setelah menyerap panas, air mengalir kembali ke tangki dan mengalami pendinginan alami sebelum disirkulasikan ulang. Dengan sistem ini, suhu panel dapat dikendalikan agar tidak terlalu panas, sehingga efisiensi dan daya keluaran PLTS tetap stabil.

c. Pompa dan Sistem Kontrol Otomatis

Pompa air berfungsi untuk mengalirkan air dari tangki menuju panel surya secara terus-menerus atau sesuai kondisi suhu yang terdeteksi oleh sensor. Dalam penerapan modern, pompa diatur secara otomatis menggunakan mikrokontroler

seperti Arduino atau ESP32 yang terhubung dengan sensor suhu. Ketika suhu panel mencapai batas tertentu, pompa akan aktif untuk mengalirkan air pendingin, dan berhenti saat suhu kembali normal. Pengaturan otomatis ini membuat sistem lebih efisien karena pompa hanya bekerja saat dibutuhkan, serta membantu menghemat air dan energi listrik.

- Kelebihan Sistem Pendinginan Air

Diantara kelebihan pada pengaplikasian sistem pendinginan air menggunakan *Reservoir Tank* ini ialah:

1. Biaya yang terjangkau.
2. Perawatan sederhana.
3. Efisiensi pendinginan yang relatif tinggi.
4. Dapat diintegrasikan dengan sistem otomatis seperti sistem pendinginan *hybrid* menggunakan *reservoir* dan peltier berbasis IoT.

- Kekurangan Sistem Pendinginan Air

Diantara kekurangan dari sistem ini ialah:

1. Konsumsi air yang relatif cukup tinggi.
2. Memerlukan energi tambahan untuk laju alir menggunakan pompa air (*Water Pump*) yang membutuhkan suplai listrik.

2.2.10 Sistem Pendinginan Termoelektrik (Peltier) dan Heatsink

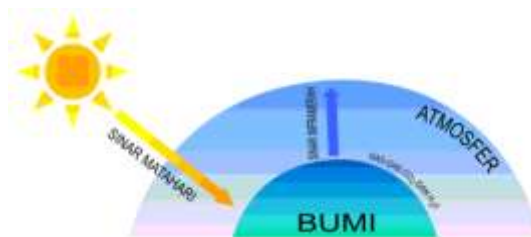
Sistem pendingin merupakan rangkaian yang dirancang untuk menjaga suhu suatu benda atau lingkungan agar tetap berada pada kondisi ideal. Prinsip kerjanya didasarkan pada proses pemindahan panas dari suatu material menuju udara atau media lain di sekitarnya. Proses ini terjadi karena adanya perbedaan suhu antara dua bagian benda, di mana panas akan berpindah dari sisi bersuhu tinggi ke sisi bersuhu rendah hingga mencapai keseimbangan termal [13].

Dalam penelitian ini, sistem pendingin menggunakan kombinasi antara *heatsink* dan modul Peltier. *Heatsink* berfungsi sebagai media penghantar dan pembuang panas, terbuat dari pelat logam seperti aluminium atau tembaga yang dibentuk menyerupai sirip. Sementara, bagian sisi panas dari peltier terhubung dengan *heatsink* dan kipas (*fan*) guna mengeluarkan panas yang ada ke udara secara efektif [14]. Struktur tersebut

memungkinkan panas diserap dari permukaan panel dan dilepaskan ke udara atau cairan di sekitarnya. Sementara itu, modul Peltier bekerja berdasarkan efek termoelektrik, di mana ketika arus listrik searah (DC) dialirkan melalui dua jenis bahan semikonduktor yang berbeda, satu sisi modul menjadi dingin dan sisi lainnya menjadi panas.

Material semikonduktor yang umum digunakan sebagai elemen termoelektrik antara lain *Bismuth Telluride* (Bi_2Te_3), *Lead Telluride* (PbTe), *Silicon Germanium* (SiGe), dan *Bismuth Antimony* (BiSb). Di antara material tersebut, *Bismuth Telluride* banyak digunakan karena memiliki konduktivitas listrik dan performa pendinginan yang baik. Modul ini tersusun dari dua jenis semikonduktor, yaitu tipe N (negatif) dan tipe P (positif), yang disusun bergantian untuk menghasilkan efek termoelektrik ketika dialiri arus listrik.

2.2.11 Radiasi Matahari



Gambar 2. 6 Radiasi Matahari

Radiasi matahari merupakan energi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari sebagai hasil reaksi fusi nuklir di inti matahari, kemudian merambat hingga mencapai atmosfer dan permukaan bumi. Dalam konteks pemanfaatan energi surya, radiasi matahari menjadi parameter utama karena berperan langsung sebagai sumber energi bagi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Radiasi matahari yang diterima di permukaan bumi umumnya dinyatakan sebagai irradiansi matahari (G) dengan satuan W/m^2 , yang menunjukkan besar daya radiasi yang diterima oleh suatu bidang per satuan luas pada waktu tertentu. Nilai G ini bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh posisi matahari, kondisi atmosfer, serta tutupan awan, sehingga menjadi variabel penting dalam analisis performa dan efisiensi panel surya [4].

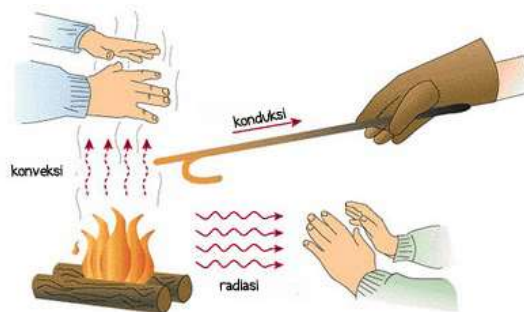
Secara fisik, radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi terdiri atas beberapa komponen, yaitu radiasi langsung (*direct radiation*), radiasi baur (*diffuse radiation*), dan radiasi *global* (*global radiation*). Radiasi *global* merupakan total radiasi yang diterima permukaan horizontal dan merupakan penjumlahan dari radiasi langsung dan radiasi baur. Dalam penelitian sistem PLTS, khususnya pada pengujian kinerja panel surya, nilai G (W/m^2) yang digunakan umumnya merepresentasikan radiasi *global* karena paling relevan terhadap kondisi operasi panel yang terpasang secara tetap. Oleh karena itu, pengukuran atau perolehan data G menjadi dasar dalam perhitungan daya masukan (P_{in}) panel surya melalui hubungan antara intensitas radiasi matahari dan luas efektif permukaan panel.

Dalam penelitian ini, parameter irradiansi matahari (G) dengan satuan W/m^2 digunakan sebagai variabel utama untuk merepresentasikan besarnya energi radiasi yang diterima permukaan panel surya pada kondisi pengujian tertentu. Nilai G dimanfaatkan untuk menganalisis keterkaitannya dengan suhu permukaan panel serta efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan. Data irradiansi matahari tersebut menjadi dasar dalam perhitungan daya masukan panel surya dan evaluasi kinerja sistem PLTS, baik pada kondisi tanpa pendinginan maupun dengan penerapan sistem pendinginan. Dengan demikian, analisis terhadap variabel G memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh kondisi radiasi matahari terhadap performa panel surya secara keseluruhan.

2.2.12 Konsep Perpindahan Kalor

Perpindahan panas merupakan salah satu fenomena fundamental dalam bidang teknik energi dan konversi energi, yang berkaitan langsung dengan proses perubahan dan distribusi energi termal akibat adanya perbedaan temperatur. Dalam sistem termal, panas selalu mengalir secara alami dari daerah yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju daerah dengan temperatur lebih rendah hingga tercapai kondisi kesetimbangan termal. Fenomena ini menjadi dasar dalam perancangan dan analisis berbagai sistem teknik, seperti pembangkit listrik, sistem pendinginan, penukar kalor, serta peralatan termal lainnya. Oleh karena itu, pemahaman mengenai mekanisme perpindahan panas sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja suatu sistem energi [15]. Dalam kajian

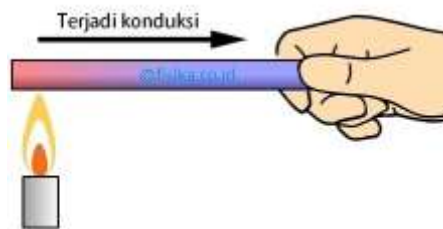
teknik, perpindahan panas diklasifikasikan menjadi tiga mekanisme utama, yaitu perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi.



Gambar 2. 7 Perpindahan Panas Konveksi, Radiasi, dan Konduksi

Ketiga mekanisme ini dapat terjadi secara terpisah maupun bersamaan dalam satu sistem, seperti yang terjadi pada economizer di pembangkit listrik tenaga uap, dimana panas dari gas buang dimanfaatkan kembali untuk memanaskan fluida kerja.

1. Perpindahan Panas Secara Konduksi



Gambar 2. 8 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi merupakan proses perpindahan energi yang terjadi melalui media padat atau fluida dalam kondisi diam akibat adanya perbedaan temperatur. Mekanisme ini umumnya terjadi pada material padat, meskipun konduksi juga dapat berlangsung pada fluida yang berada dalam kondisi diam. Mekanisme ini berlangsung ketika energi berpindah dari partikel yang memiliki tingkat energi lebih tinggi menuju partikel dengan energi lebih rendah melalui interaksi antarpartikel. Perpindahan energi tersebut berkaitan dengan gerak translasi, rotasi, getaran, serta gerak acak molekul-molekul penyusun material. Semakin tinggi temperatur suatu benda,

semakin besar energi kinetik molekulnya, sehingga energi panas akan mengalir ke daerah dengan temperatur yang lebih rendah hingga tercapai kesetimbangan termal. Laju Perpindahan panas secara konduksi terjadi akibat adanya perbedaan suhu di dalam suatu material, di mana energi panas mengalir dari daerah bersuhu lebih tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah tanpa disertai perpindahan massa. Laju perpindahan panas ini dipengaruhi oleh sifat termal material, terutama konduktivitas termal yang menunjukkan kemampuan suatu bahan dalam menghantarkan panas. Material logam seperti besi memiliki konduktivitas termal tinggi sehingga mampu menghantarkan panas dengan cepat, sedangkan material seperti batu bata dan air memiliki konduktivitas termal lebih rendah, sehingga perpindahan panas berlangsung lebih lambat [16].

2. Perpindahan Panas Secara Konveksi



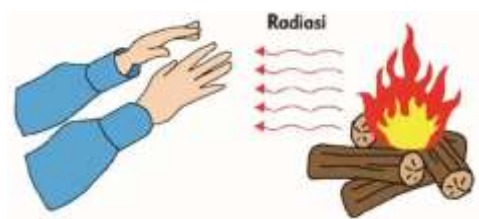
Gambar 2. 9 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi merupakan mekanisme perpindahan energi panas yang terjadi melalui aliran fluida, baik dalam bentuk cair maupun gas. Konveksi dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu konveksi alami dan konveksi paksa. Konveksi alami, proses ini berlangsung akibat adanya perbedaan temperatur yang menyebabkan perbedaan massa jenis fluida. Pada fluida seperti air, bagian yang memiliki temperatur lebih tinggi akan memiliki massa jenis lebih kecil sehingga cenderung bergerak naik, sedangkan fluida dengan temperatur lebih rendah memiliki massa jenis lebih besar dan bergerak turun. Pergerakan fluida tersebut membentuk aliran konveksi yang berperan dalam mentransfer energi panas dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah [17]. Pergerakan ini membentuk pola aliran alami yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas.

Sementara itu, konveksi paksa terjadi ketika aliran fluida dihasilkan oleh gaya dari luar, seperti pompa, kipas, atau blower. Dalam sistem industri dan pembangkit listrik, konveksi paksa lebih sering digunakan karena mampu menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih besar dan lebih terkontrol. Berbeda dengan konduksi, konveksi melibatkan pergerakan fluida sebagai media pembawa energi panas. Proses ini sangat dipengaruhi oleh sifat fluida, kondisi aliran, serta perbedaan temperatur antara fluida dan permukaan yang bersinggungan dengannya.

Efektivitas perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida, luas permukaan kontak, serta perbedaan temperatur antara fluida dan permukaan padat. Oleh karena itu, desain pendingin fluida umumnya dilengkapi dengan sirip atau bentuk pipa tertentu untuk memperbesar luas permukaan kontak dan meningkatkan intensitas perpindahan panas.

3. **Perpindahan Panas Secara Radiasi**



Gambar 2. 10 Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi merupakan mekanisme perpindahan energi panas yang terjadi melalui pancaran gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan media perantara. Berbeda dengan konduksi dan konveksi yang memerlukan *medium material*, radiasi dapat terjadi meskipun terdapat ruang hampa di antara dua benda.

2.2.13 Lux Meter

Intensitas cahaya merupakan besaran fisis yang menyatakan jumlah cahaya yang diterima oleh suatu permukaan dan dinyatakan dalam satuan lux (lx). Pengukuran intensitas cahaya memiliki peranan penting dalam berbagai bidang, seperti perancangan sistem penerangan, kegiatan industri, pertanian, hingga bidang kesehatan. Tingkat pencahayaan yang sesuai diperlukan untuk menjamin kenyamanan visual, keselamatan

kerja, serta efisiensi energi. Di Indonesia, standar pencahayaan ruangan telah diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-6197-2000 yang menetapkan nilai iluminansi minimum untuk berbagai jenis ruang dan aktivitas, sehingga pengukuran intensitas cahaya menjadi aspek penting dalam evaluasi kesesuaian sistem pencahayaan [18].

Lux meter merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya yang jatuh pada suatu permukaan. Prinsip kerja lux meter didasarkan pada kemampuan sensor cahaya dalam mengubah energi cahaya menjadi sinyal listrik yang selanjutnya diolah menjadi nilai iluminansi dalam satuan lux. Pada umumnya, lux meter menggunakan sensor berbasis fotodiode atau fototransistor yang memiliki sensitivitas terhadap spektrum cahaya tampak. Meskipun lux meter konvensional memiliki tingkat akurasi yang baik, penggunaannya masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti harga yang relatif mahal, keterbatasan akses bagi kalangan pendidikan dan usaha kecil, serta kurang fleksibel untuk dikembangkan sesuai kebutuhan tertentu.

2.2.14 Sensor BH1750

Perkembangan teknologi elektronika dan sistem tertanam mendorong pengembangan alat ukur intensitas cahaya berbasis sensor digital yang lebih ekonomis dan fleksibel. Salah satu sensor cahaya digital yang banyak digunakan adalah sensor BH1750. Sensor ini dirancang untuk mengukur intensitas cahaya secara langsung dalam satuan lux dengan rentang pengukuran yang luas, yaitu sekitar 1 hingga 65.535 lux. BH1750 bekerja menggunakan antarmuka komunikasi I2C, sehingga memungkinkan integrasi yang mudah dengan berbagai mikrokontroler. Keunggulan utama sensor ini terletak pada tingkat akurasi dan linearitas yang lebih baik dibandingkan sensor cahaya konvensional seperti LDR, serta respons yang lebih stabil terhadap perubahan intensitas cahaya [18].

Penggunaan sensor BH1750 menjadi semakin optimal ketika diintegrasikan dengan mikrokontroler, salah satunya Arduino yang berbasis ATmega328P. Arduino merupakan platform open-source yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem akuisisi data karena kemudahan pemrograman dan fleksibilitasnya. Dengan memanfaatkan Arduino, data hasil pengukuran intensitas cahaya dari sensor BH1750 dapat diolah secara digital dan ditampilkan secara *real-time* melalui media seperti LCD

atau serial monitor. Integrasi ini memungkinkan pengembangan lux meter digital yang bersifat portabel, mudah dikalibrasi, dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna.

Pengembangan lux meter berbasis sensor BH1750 dan mikrokontroler memberikan solusi alternatif terhadap keterbatasan lux meter konvensional. Selain lebih ekonomis, sistem ini juga menawarkan kemudahan dalam pemantauan dan analisis data pencahayaan secara berkelanjutan. Dengan akurasi yang memadai dan kemampuan integrasi dengan sistem digital, lux meter berbasis BH1750 dapat digunakan untuk berbagai keperluan, baik dalam penelitian, pendidikan, maupun aplikasi industri. Oleh karena itu, pemanfaatan sensor BH1750 sebagai komponen utama dalam pengukuran intensitas cahaya menjadi pendekatan yang relevan dan efektif dalam pengembangan sistem pengukuran pencahayaan.



Gambar 2. 11 Sensor BH1750

Tabel 2. 3 Spesifikasi Sensor BH1750

SPESIFIKASI	
Jenis Sensor	: Sensor intensitas cahaya digital
Besaran Terukur	: Intensitas cahaya
Satuan Keluaran	: lux (lx)
Rentang Pengukuran	: 1 – 65.535 lux
Resolusi	: 1 lux
Tegangan Operasi	: 3.3 V – 5 V
Konsumsi Daya	: < 0.12 mA
Waktu Pengukuran	: ±120 ms
Sudut Respon Cahaya	: Mendekati respon mata manusia
Suhu Operasional	: - 40°C hingga +85°C

Dimensi Modul	: $\pm 15 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$
Kompatibilitas	: Arduino, ESP8266, ESP32
Aplikasi Umum	: Sistem pencahayaan otomatis, <i>monitoring</i> intensitas cahaya, PLTS.

2.2.15 Solar charge controller

Solar charge controller (SCC) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya pada sistem yang menggunakan baterai sebagai media penyimpanan energi. SCC juga dikenal dengan istilah *Battery Control Unit* (BCU) atau *Battery Charge Regulator* (BCR), yang memiliki fungsi utama untuk mengatur, melindungi, dan mengoptimalkan proses pengisian serta pengosongan baterai. Keberadaan SCC menjadi krusial karena karakteristik baterai yang sensitif terhadap kondisi pengisian daya, baik kelebihan pengisian (*overcharging*) maupun pengosongan berlebih (*deep discharging*), yang dapat memperpendek umur pakai baterai bahkan menyebabkan kerusakan permanen [5].

Pada sistem PLTS, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya bersifat fluktuatif karena sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dan kondisi lingkungan. Tanpa adanya pengendalian yang baik, panel surya dapat mengalirkan tegangan dan arus secara langsung ke baterai melebihi batas kemampuan baterai tersebut. Kondisi ini dapat menyebabkan sel-sel baterai mengalami kerusakan akibat tegangan berlebih, peningkatan suhu, hingga risiko kegagalan baterai seperti kebocoran atau ledakan. Oleh karena itu, SCC berperan sebagai penghubung sekaligus pengendali antara panel surya dan baterai agar proses pengisian berlangsung dalam batas aman sesuai spesifikasi baterai.

Selain mengatur proses pengisian, SCC juga berfungsi untuk melindungi baterai dari kondisi tegangan rendah. Ketika baterai terus digunakan untuk menyuplai beban tanpa pengendalian, tegangan baterai dapat turun di bawah batas minimum yang diizinkan. Penggunaan baterai dalam kondisi tegangan sangat rendah dapat mengakibatkan penurunan kapasitas permanen dan mempercepat degradasi baterai. SCC mampu mendeteksi kondisi ini dengan memantau *level* tegangan baterai secara terus-menerus. Apabila tegangan baterai turun di bawah ambang batas tertentu, SCC secara

otomatis akan memutuskan hubungan antara baterai dan beban, sehingga baterai tidak mengalami pengosongan berlebih dan umur pakainya dapat dipertahankan.

Solar charge controller bekerja berdasarkan prinsip deteksi tegangan baterai sebagai parameter utama pengendalian. Pada saat baterai berada dalam kondisi belum penuh, SCC akan mengizinkan arus dari panel surya mengalir untuk mengisi baterai hingga mencapai *level* tegangan yang telah ditentukan. Ketika baterai telah mencapai kondisi penuh, SCC secara otomatis akan menghentikan atau membatasi aliran arus pengisian untuk mencegah overcharging. Jika pada suatu kondisi tegangan baterai kembali menurun akibat penggunaan beban, SCC akan kembali mengaktifkan proses pengisian. Mekanisme ini membuat sistem pengisian menjadi otomatis dan berulang sesuai kebutuhan energi, sehingga sistem PLTS dapat bekerja secara efisien dan aman.

Dalam implementasinya, SCC umumnya menggunakan teknologi pengendalian tertentu, di antaranya Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking (MPPT). SCC tipe PWM bekerja dengan cara mengatur lebar pulsa tegangan yang dikirimkan ke baterai, sehingga tegangan pengisian dapat disesuaikan dengan kondisi baterai. Teknologi ini relatif sederhana, memiliki biaya lebih rendah, dan banyak digunakan pada sistem PLTS berskala kecil hingga menengah. Sementara itu, SCC tipe MPPT memiliki kemampuan lebih lanjut dalam mengoptimalkan daya yang dihasilkan panel surya dengan menyesuaikan titik kerja panel pada kondisi daya maksimum. Meskipun SCC MPPT memiliki efisiensi yang lebih tinggi, SCC PWM tetap banyak digunakan karena keandalannya dan kemudahan implementasi.

Solar charge controller memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keandalan dan keberlanjutan sistem PLTS. Dengan kemampuan pengendalian pengisian dan pengosongan baterai secara otomatis, SCC tidak hanya meningkatkan efisiensi sistem, tetapi juga memperpanjang umur pakai baterai dan meningkatkan faktor keselamatan.



Gambar 2. 12 *Solar charge controller* Tipe PWM

Tabel 2. 4 Spesifikasi Solar charge controller Tipe PWM

SPESIFIKASI	
Jenis Alat	: <i>Solar charge controller</i>
Tipe Pengendali	: PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)
Tegangan Sistem	: DC 12 V / 24 V
Arus Pengisian Maksimum	: 10 A
Daya Panel Maksimum	: 130 W (DC 12 V) / 260 W (DC 24 V)
Tegangan Masukan Panel (PV)	: 50 V
Jenis Baterai	: <i>Lead-acid (Flooded, AGM, Gel)</i>
Metode Pengisian	: PWM 3 tahap (<i>Bulk, Absorption, Float</i>)
Tegangan Cut-Off Pengisian	: $\pm 14,4$ V (12 V sistem)
Tegangan Float	: $\pm 13,7$ V
Tampilan	: LCD
Suhu Operasional	: -20°C hingga $+ 55^{\circ}\text{C}$
Dimensi	: ± 133 mm (P) $\times$ 70 mm (L) $\times$ 35 mm (T)

2.2.16 Modul LM2596 DC to DC Step down

DC-DC *step-down converter* atau yang dikenal sebagai *buck converter* merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk menurunkan tegangan arus searah (DC) dari sumber tegangan yang lebih tinggi ke tingkat tegangan yang lebih rendah sesuai kebutuhan beban. Berbeda dengan trafo *step-down* konvensional yang bekerja pada arus bolak-balik (AC), DC-DC *step-down converter* bekerja langsung pada sumber DC dan memanfaatkan proses pensaklaran elektronik berfrekuensi tinggi. Prinsip kerja ini memungkinkan penurunan tegangan dilakukan secara lebih efisien, ringkas, dan fleksibel, sehingga sangat banyak digunakan pada sistem catu daya modern dan sistem energi terbarukan [19].

Buck converter bekerja dengan mengatur rasio waktu hidup dan mati (*duty cycle*) dari saklar elektronik, seperti transistor atau MOSFET, sehingga tegangan keluaran dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan sistem. Energi disimpan sementara pada komponen induktor dan kemudian dilepaskan secara terkontrol ke beban, sementara kapasitor berfungsi untuk meredam riak tegangan agar keluaran menjadi lebih stabil.

Dengan mekanisme ini, DC-DC *step-down converter* mampu menghasilkan tegangan keluaran yang relatif konstan meskipun terjadi variasi pada tegangan input atau perubahan beban, menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan suplai tegangan stabil.

Dalam penerapannya, DC-DC *step-down converter* banyak digunakan pada sistem panel surya, pengisian baterai, dan rangkaian kendali berbasis mikrokontroler seperti Arduino yang umumnya memerlukan tegangan kerja rendah dan stabil. Penggunaan *converter* ini memungkinkan tegangan dari baterai atau panel surya yang relatif tinggi diturunkan ke *level* tegangan yang aman tanpa kehilangan daya yang besar. Oleh karena itu, DC-DC *step-down converter* memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keamanan sistem catu daya, khususnya pada aplikasi elektronika daya dan sistem energi terbarukan.



Gambar 2. 13 LM2596 DC to DC Step down

Tabel 2. 5 LM2596 DC to DC Step down

SPESIFIKASI	
Jenis Modul	: DC–DC <i>Step down</i> (<i>Buck converter</i>)
IC Utama	: LM2596
Prinsip Kerja	: <i>Switching regulator</i> berbasis PWM
Tegangan Masukan (Vin)	: 4,0 – 40 V DC
Tegangan Keluaran (Vout)	: 1,25 – 35 V DC (dapat diatur)
Arus Keluaran Maksimum	: 3 A (kontinu)
Efisiensi Maksimum	: Hingga 92 %
Frekuensi Switching	: ± 150 kHz
Metode Pengaturan Tegangan	: Potensiometer <i>multi-turn</i>

Indikator	: LED <i>power</i>
Suhu Operasional	: -40 °C hingga +85 °C
Terminal Koneksi	: VIN+, VIN-, VOUT+, VOUT-
Aplikasi Umum	: Catu daya Arduino, ESP32, sensor IoT, PLTS skala kecil

2.2.17 Sistem *Monitoring* Berbasis IoT

Sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) merupakan metode pemantauan parameter sistem secara jarak jauh dengan memanfaatkan konektivitas internet sebagai media transmisi data. Pada penelitian ini, sistem *monitoring* dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat akuisisi dan pengiriman data dari berbagai sensor, seperti sensor arus dan tegangan DC, sensor suhu, serta sensor intensitas cahaya. Data hasil pembacaan sensor diproses kemudian dikirim melalui jaringan internet ke server, selanjutnya ditampilkan pada *website monitoring* yang dirancang secara mandiri sebagai antarmuka pengguna. *Website* ini berfungsi untuk menampilkan data secara *real-time*, menyimpan riwayat data (*data logging*), serta memudahkan proses analisis performa sistem tanpa harus berada di lokasi alat. Dengan adanya sistem *monitoring* berbasis *website* ini, proses pengawasan kondisi sistem menjadi lebih efektif, fleksibel, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengoperasian sistem.