

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tenaga Surya

Secara umum, energi surya dapat dimaknai sebagai seluruh bentuk energi yang dipancarkan oleh matahari dan mencapai permukaan bumi. Energi tersebut memberikan sinar yang terang, membuat bumi ini hangat dan merupakan sumber energi bagi makhluk hidup untuk hidup (Widodo, Arif, dan Royadi 2015). Dalam konteks pemanfaatannya, energi matahari memiliki potensi luar biasa untuk dikembangkan menjadi sumber energi alternatif yang mendukung aktivitas manusia dalam kehidupan sehari-hari. Matahari memancarkan dua bentuk energi utama, yakni energi *thermal* atau panas (*heat*) dan energi radiasi (*light*), yang keduanya dapat dikonversi dan dimanfaatkan melalui teknologi. Dalam tatanan kosmologis, matahari merupakan pusat tata surya yang menjadi poros pergerakan berbagai benda langit, termasuk bumi yang terus-menerus mengelilinginya. Pergerakan inilah yang menyebabkan distribusi sinar matahari ke seluruh permukaan bumi berlangsung secara bergiliran dan berkesinambungan. Kondisi geografis Indonesia sebagai negara beriklim tropis memberikan keuntungan tersendiri dalam hal ketersediaan radiasi matahari. Hampir sepanjang tahun, wilayah Indonesia menerima intensitas cahaya matahari yang tinggi, menjadikannya wilayah yang sangat potensial untuk pengembangan energi surya sebagai sumber energi terbarukan. Potensi ini semakin relevan mengingat meningkatnya kebutuhan energi dan upaya global untuk beralih dari energi fosil ke energi ramah lingkungan. Energi surya dapat dikonversi melalui dua pendekatan utama: konversi termal dan konversi fotovoltaik. Namun, efisiensi konversi panasnya jauh lebih tinggi, mencapai 70% sedangkan fotovoltaik hanya mencapai 17% (Saputra dan Arizona 2023).

2.2 Panel Surya

Panel surya merupakan perangkat yang tersusun atas sejumlah sel fotovoltaik, yaitu komponen yang bekerja dengan prinsip mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Istilah surya merujuk pada matahari atau dalam bahasa Latin dikenal sebagai *sol* karena matahari merupakan sumber utama cahaya yang paling potensial untuk dikonversi menjadi energi listrik. Secara terminologis, panel surya kerap dikenal pula dengan istilah sel fotovoltaik, kata fotovoltaik sendiri diperoleh dari

gabungan kata foto yang mengacu pada energi cahaya dan besaran voltase yang merujuk pada satuan tegangan listrik, sehingga mencerminkan proses perubahan langsung dari cahaya menjadi listrik. Sel surya, yang dikenal juga sebagai sel PV memanfaatkan prinsip efek fotovoltaiik dalam menyerap energi matahari. Proses ini memungkinkan terjadinya aliran arus listrik yang timbul akibat perbedaan muatan antara dua lapisan yang memiliki polaritas berlawanan.

Panel surya merupakan sebuah alat yang tersusun dari sel-sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor yang memiliki tujuan untuk mengonversikan energi surya menjadi energi listrik. Sel surya merupakan perangkat yang tersusun dari berbagai elemen fotovoltaiik, yaitu komponen-komponen yang memiliki kemampuan guna mengonversi radiasi cahaya matahari menjadi output energi dalam bentuk listrik.

Secara umum, komponen utama dalam struktur sel surya terdiri atas material semikonduktor berbasis silikon, metal, lapisan anti reflektif, serta strip konduktor metal.



Gambar 2. 1 Panel Surya Polycrystalline 135 W

Panel surya berfungsi sebagai perangkat konversi energi yang mengandalkan prinsip efek *photovoltaic* untuk mengubah radiasi sinar matahari menjadi energi listrik. Yang dimaksud dengan efek *photovoltaic* adalah suatu fenomena munculnya tegangan listrik yang terbentuk sebagai hasil interaksi antara dua elektroda yang

saling terhubung melalui media padat atau cair, ketika system tersebut terpapar oleh sinar matahari. Oleh karena itu, *collar cell* bisa diistilahkan sebagai *sel photovoltaic* (PV). Efisiensi sistem fotovoltaiik dengan komposisi material silikon dipengaruhi secara signifikan oleh dua variabel utama, yakni temperatur dan intensitas cahaya yang diterima. Pada bagian berikut, ditampilkan rincian karakteristik teknis dari panel surya 135 Watt.

Tabel 2 1 Panel Surya *Polycrystalline* 135 W

Spesifikasi	Keterangan
Rated Maximum Power	135W
Voltage at Pmax (Vmp)	18V
Current at Pmax (Imp)	7.5A
Open-circuit Voltage (Voc)	21.06V
Short-Circuit Voltage (Isc)	8.77A
Weight	2.00 Kg
Dimenssion	1030mm x 670mm x 30mm
Standart Test Condition	35 °C
Power Tolerance	± 3%
Operation Temperature	-40°C ~ +85

2.3 Bagian Panel Surya

Setiap panel surya terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja bersama untuk menghasilkan listrik dari cahaya matahari. Berikut ini adalah komponen penyusun dari sebuah panel surya.



Gambar 2. 2 Bagian-bagian Panel Surya (sumber: <https://zeusbattery.id/>)

2.3.1. Bingkai Aluminium

Kerangka panel surya berperan dalam memberikan perlindungan pada sisi luar laminasi serta menopang struktur utama dari panel tersebut. Bingkai ini terbuat dari aluminium agar memiliki bobot ringan namun tetap memiliki kekuatan yang mumpuni untuk menahan angin yang kencang atau gesekan yang mungkin bisa terjadi.

2.3.2. Kaca Pelindung

Kaca pelindung ini berupa *tempered glass* yang terdiri dari dua sisi yaitu depan dan belakang. Lapisan pelindung bagian depan pada panel surya dirancang untuk menjaga integritas sel dari paparan kondisi cuaca ekstrem, termasuk hujan, es, serta benturan akibat jatuhnya puing dari atmosfer. Sementara itu, permukaan kaca pada sisi belakang dilengkapi dengan lapisan antireflektif guna meminimalkan kehilangan energi akibat pantulan cahaya dan sekaligus meningkatkan efisiensi transmisi cahaya menuju material aktif di dalam panel.

2.3.3. Enkapsulasi-EVA

Bagian ini berfungsi mencegah masuknya kelembaban dan kotoran. Lapisan ini menggunakan material EVA (*ethylene vinyl acetate*), yaitu sejenis polimer transparan yang menyerupai plastik. Material ini dirancang secara khusus untuk merangkum sel dan menstabilkan posisinya selama proses pengolahan berlangsung.

2.3.4. Sel Fotovoltaik

Merupakan komponen utama dalam sistem modul fotovoltaik. Sel ini tersusun dari material semikonduktor yang memiliki kemampuan menangkap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik. Sel-sel tersebut saling terhubung secara seri untuk mendapatkan tegangan total yang lebih tinggi melalui kawat busbar. Material yang paling umum digunakan untuk sel fotovoltaik adalah silikon seperti *polycrystalline* dan *monocrystalline*.

2.3.5. Back Sheet

Back sheet umumnya disusun dari berbagai jenis material polimer seperti *polypropylene* (PP), *polyethylene terephthalate* (PET), dan *polyvinyl fluoride* (PVF) yang masing-masing memiliki karakteristik unggulan dalam hal

perlindungan stabilitas thermal serta ketahanan UV dalam jangka panjang. Fungsi utama lapisan ini adalah memberikan perlindungan mekanis dan isolasi listrik.

2.3.6. *Junction Box*

Junction box berperan dalam menjaga keteraturan instalasi kabel serta melindungi koneksi listrik dari risiko korsleting, korosi, maupun gangguan eksternal lainnya yang dapat memengaruhi kinerja sistem.

2.4 Faktor-Faktor Pengaruh Daya Keluaran Solar Panel

Efisiensi maksimum dan daya yang dihasilkan oleh sel surya tidak semata ditentukan oleh temperatur permukaannya. Terdapat juga faktor lain yang dapat memengaruhi keluaran daya dari sebuah sel surya. Faktor-faktor tersebut ada yang memiliki pengaruh besar dan ada juga yang memiliki pengaruh kecil. Berikut adalah faktor yang dapat memengaruhi kerja maksimum sel surya.

2.4.1. Temperatur Sel Surya

Sel surya mampu mencapai kinerja optimal saat temperaturnya berada pada kondisi normal, yaitu sekitar 35°C; apabila suhu meningkat melebihi batas tersebut, maka tegangan (V) yang dihasilkan cenderung menurun. Setiap kenaikan temperatur sel surya 10° Celsius (dari 25°) akan berkurang sekitar 0,4 % pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua kali (2x) lipat untuk kenaikan temperatur sel per 10° C (Widodo et al. 2015).

2.4.2. Radiasi Matahari

Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi dan sangat tergantung keadaan spektrum matahari ke bumi. Pengaruh intensitas matahari memiliki pengaruh yang besar terhadap arus (Widodo et al. 2015).

2.4.3. Kecepatan Angin

Kecepatan hembusan angin di sekitar lokasi sel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca sel surya (Widodo et al. 2015).

2.4.4. Keadaan Atmosfer Bumi

Keadaan atmosfer bumi seperti berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara (Rh), kabut, dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari sel surya (Widodo et al. 2015).

2.4.5. Orientasi Sel Surya

Orientasi dari rangkaian sel surya ke arah matahari secara optimum adalah penting agar sel surya dapat menghasilkan energi maksimum. Selain arah orientasi, sudut orientasi dari sel surya juga sangat memengaruhi hasil energi maksimum (Widodo et al. 2015).

2.5 Cara Kerja Solar Panel

Prinsip dasar konversi energi surya menjadi energi listrik pada panel surya berlangsung melalui beberapa tahapan, dengan penjelasan sebagai berikut..

1. Absorpsi cahaya dalam semikonduktor.
2. Muatan positif dan negatif yang dihasilkan akan dipisahkan dan dialirkan ke bagian-bagian berbeda dalam sel surya untuk membentuk tegangan sebagai hasil dari beda potensial yang tercipta.
3. Muatan-muatan yang telah terpisah dialihkan ke terminal-terminal konduktif, menghasilkan aliran elektron yang menjadi sumber arus listrik.



Gambar 2. 3 Skema Kerja Panel Surya (sumber: <https://www.sanspower.com/>)

Cara kerja sel surya dijelaskan melalui rangkaian proses berikut. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, foton-foton dari cahaya tersebut akan menumbuk elektron-elektron pada lapisan semikonduktor bertipe-n, memberikan energi tambahan yang cukup untuk melepaskan elektron dari ikatannya. Elektron yang tereksitasi ini kemudian terdorong menuju lapisan tipe-p karena adanya perbedaan potensial. Pergerakan elektron ini menyebabkan lapisan tipe-n mengalami kekurangan muatan negatif, sehingga bersifat lebih positif secara relatif sedangkan lapisan tipe-p menjadi lebih negatif karena kelebihan elektron yang masuk ke dalam lubang (*hole*) yang tersedia. Ketika kedua lapisan ini

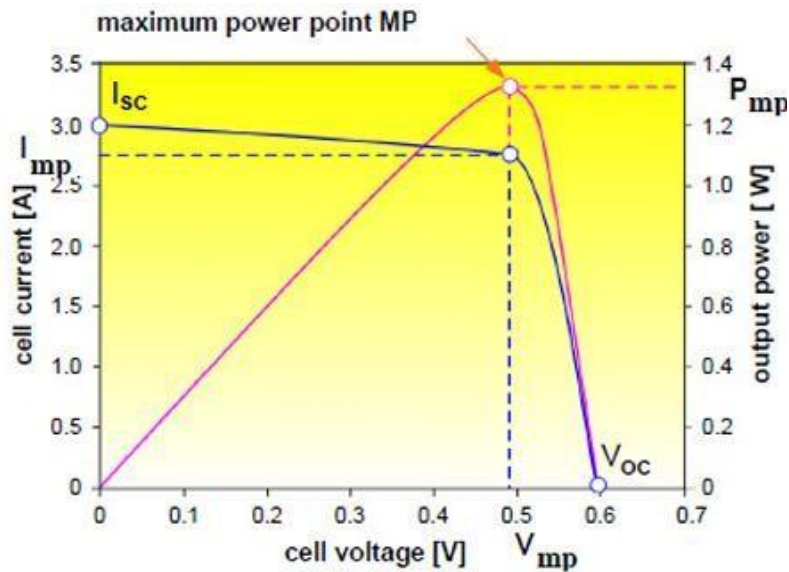
dihubungkan melalui rangkaian eksternal, maka aliran elektron dari tipe-n ke tipe-p menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya.

2.6 Karakteristik Sel Surya

Seperti yang diketahui bahwa temperatur dari sel surya memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja perpindahan elektron karena komponen semikonduktor pada sel surya sangat sensitif terhadap perubahan temperatur. Ketika temperatur naik, maka *band gap* (selisih atau celah antara pita valensi dengan pita konduksi) semikonduktor menurun, sehingga nilai resistansi semakin meningkat dan perpindahan elektron semakin melambat (Saputra dan Arizona 2023). Efisiensi kerja sel surya PV cenderung menurun seiring dengan meningkatnya suhu. Aturan umum ini pertama kali diamati melalui perubahan pada tegangan rangkaian terbuka. Oleh karena itu, sel surya menunjukkan performa paling optimal dalam kondisi suhu yang rendah dan stabil. Dalam penggunaan luar ruang, terutama saat terkena radiasi matahari secara intens, suhu sel APV dapat meningkat drastis hingga mencapai 60-80°C. Peningkatan suhu ini secara langsung memengaruhi beberapa parameter penting kinerja sel surya, meliputi tegangan rangkaian terbuka atau *open circuit* (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), faktor bentuk kurva (CF), serta nilai efisiensi (η). Ketika suhu meningkat, V_{oc} akan berkurang dengan laju 0,1%/°C sedangkan I_{sc} sedikit meningkat dengan suhu (T). (Farhana, 2012). Berdasarkan hal tersebut, pada bagian berikut akan dibahas lebih lanjut mengenai karakteristik kinerja sel surya.

2.6.1. Karakteristik Kurva I-V terhadap Daya

Besarnya daya yang dihasilkan oleh suatu panel surya ditentukan melalui hasil perkalian antara tegangan (V) dan arus (I). Karakteristik tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sel surya saat menerima penyinaran matahari dapat dianalisis melalui kurva I-V, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Kurva MPP Sel Surya (sumber: belajarsolarblog.wordpress.com)

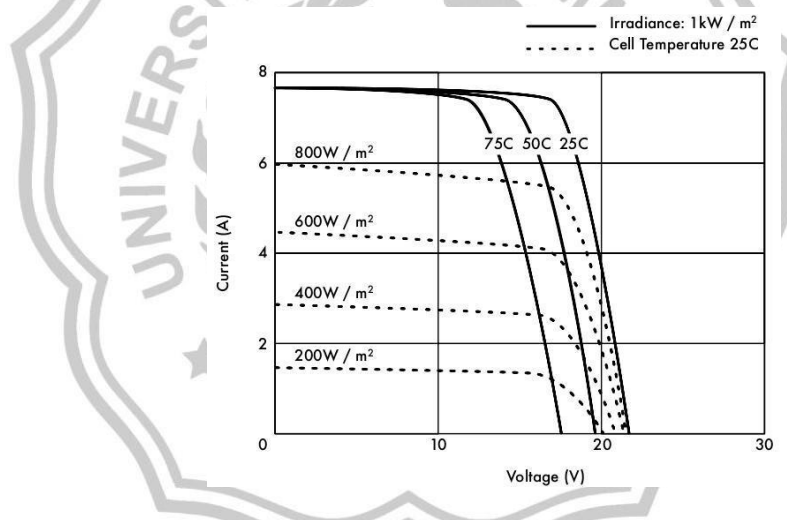
Dari kurva diatas dapat diketahui bahwa kombinasi nilai arus dan tegangan saat kondisi kerja maksimum, yang dikenal sebagai *Maximum Power Point* (MPP), akan menghasilkan keluaran daya listrik tertinggi yang dapat dicapai oleh modul tersebut. Nilai tegangan pada titik *Maximum Power Point* (V_{MPP}) umumnya berada di bawah tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), sedangkan arus pada MPP (I_{MPP}) juga lebih kecil dibandingkan dengan arus hubung singkat (I_{sc}). Ketika terminal keluaran sel surya tidak terhubung dengan beban atau berada dalam kondisi rangkaian terbuka (*open circuit*), maka tidak terjadi aliran arus listrik. Dalam keadaan ini, tegangan yang dihasilkan oleh sel surya mencapai nilai maksimum, yang dikenal dengan istilah tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage*/ V_{oc}). Pada keadaan yang lain, disaat keluaran sel surya dihubungsingkatkan (*short circuit*) maka arus tersebut bernilai maksimum, yang disebut arus *short circuit* (I_{sc}). Selain itu terdapat nilai daya maksimum (P_{mp}) yang dapat dihasilkan saat terjadi tengangan maksimum (V_{mp}) dan saat terjadi arus maksimum (I_{mp}). *Maximum Power Point* (MPP) merupakan titik operasi pada kurva karakteristik sel surya di mana kombinasi arus dan tegangan menghasilkan daya keluaran tertinggi.

Tegangan rangkaian terbuka atau *open circuit* (V_{oc}) merupakan nilai tegangan yang terukur ketika tidak terdapat aliran arus listrik, atau dengan kata lain, saat arus berada pada kondisi nol. Cara untuk mencapai *open circuit* (V_{oc}) dapat

diperoleh dengan menghubungkan kutub positif dan negatif dari modul surya ke alat ukur voltmeter, sehingga melalui pengukuran ini, nilainya akan ditampilkan langsung pada voltmeter.

Short-circuit current (I_{sc}) adalah arus yang mengalir melalui sirkuit eksternal ketika elektroda sel surya dihubungkan pendek. Arus hubung singkat sel surya tergantung pada insiden kerapatan foton-fluks pada sel surya, yang ditentukan oleh spektrum cahaya datang (Safitri et al. 2020). Sementara itu, nilai arus hubung singkat (I_{sc}) dapat diamati secara langsung melalui pembacaan pada alat ukur arus (amperemeter). Besarnya arus keluaran dari modul surya berperan penting dalam menentukan kecepatan proses pengisian baterai. Di samping itu, intensitas arus yang dihasilkan oleh panel surya memiliki peran penting dalam menentukan besarnya daya maksimum yang dapat disuplai ke perangkat yang terhubung.

2.6.2. Karakteristik Kurva I-V terhadap Perubahan *Irradiance* dan *Temperature*



Gambar 2. 5 Karakteristik Hubungan Arus dan Tegangan terhadap Variasi Radiasi dan Temperatur (sumber: <http://onnocenter.or.id/>)

Gambar 2.5 menyajikan kurva karakteristik korelasi antara arus dan tegangan dari hasil pengujian modul *photovoltaic* (PV) yang dilakukan berdasarkan *Standard Test Condition* (STC), yakni dengan Air Mass (AM) 1,5 intensitas *irradiance* sebesar 1000 W/m^2 dan *temperature* 25°C . Pada kondisi nyata, intensitas penyinaran tidak mencapai tingkat yang dimaksud. Hal ini ditentukan oleh sejumlah faktor seperti letak geografis (lintang), sudut elevasi matahari, serta kondisi atmosfer atau cuaca. Selain itu, nilai *irradiance* di suatu lokasi juga mengalami fluktuasi bulanan tergantung pada musim dan pola radiasi. Perlu diketahui bahwa

nilai *irradiance* dapat memengaruhi nilai dari sel surya. Semakin tinggi nilai *irradiance* maka semakin tinggi pula nilai *temperature* pada sebuah sel surya.

Merujuk pada Gambar 2.5, kurva yang ditampilkan menunjukkan karakteristik hubungan antara arus dan tegangan pada kondisi *irradiance* serta temperatur tertentu. Dari kurva tersebut dapat dipahami bahwa peningkatan *irradiance* berdampak langsung pada peningkatan daya keluaran sel surya. Secara fisik, hal ini terjadi karena semakin tinggi tingkat *irradiance*, maka jumlah foton yang mengenai permukaan sel surya juga meningkat. Peningkatan jumlah foton ini mendorong terjadinya lebih banyak eksitasi elektron, sehingga menghasilkan arus listrik yang lebih besar. Namun, pengaruh temperatur terhadap sel surya, di setiap kenaikan pada temperaturnya pasti akan ditandai oleh penurunan tegangan saat arus berada dalam keadaan stabil. Jadi dari kurva karakteristik diatas dapat diketahui daya keluaran dari sebuah PV sangat tergantung pada temperatur dan sangat berpengaruh pada *temperature*. (Nazaar 2022).

2.7 Rumus Teoritis Kinerja Panel Surya

Layaknya sebuah sistem mesin, panel surya memiliki fungsi konversi energi, di mana radiasi cahaya matahari sebagai *input* diubah menjadi *output* berupa energi listrik melalui mekanisme kerja efek *photovoltaic*. Dipengaruhi oleh berbagai faktor, tidak seluruh energi dari cahaya yang diterima dapat diubah menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya umumnya berupa arus tegangan DC.

2.7.1. Faktor Pengisi (*Fill factor*)

Faktor pengisi merupakan indikator penting yang merepresentasikan tingkat kualitas kinerja suatu sel surya. Nilai ini diperoleh dengan membandingkan daya maksimum teoritis yang dapat dihasilkan sel surya terhadap daya teoritis yang dihitung dari hasil perkalian antara tegangan pada kondisi rangkaian terbuka dan arus pada kondisi hubung singkat. Nilai fill factor umumnya berada dalam rentang antara 0,7 hingga 0,85. Faktor pengisi yaitu parameter yang menyatakan seberapa besar $I_{sc} \times V_{oc}$ dari daya *maksimum* $V_m \times I_m$ yang dihasilkan sel surya (Achmad et al. 2023).

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \dots\dots\dots (2.1)$$

FF = Faktor pengisi
 Vm = Tegangan maksimum (V)
 Im = Arus maksimum (A)
 Voc = Rangkaian tegangan terbuka (V)
 Isc = Arus hubung singkat (A)

2.7.2. Daya Input

Daya masuk (Pin) diperoleh dari perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area *solar cell*, dapat dihitung dengan persamaan berikut (Achmad et al. 2023).

$$P_{in} = I_r \times A \dots \dots \dots (2.2)$$

P_{in} = Daya input akibat radiasi matahari (W)
 I_r = Intensitas radiasi matahari (W/m²)
 A = Luas area permukaan sel surya (m²)

2.7.3. Daya Output

Daya keluaran (Pout) pada sel surya yaitu besaran nilai dari hasil perkalian antara tegangan rangkaian terbuka (Voc) dengan arus hubung singkat (Isc) dan faktor pengisi (FF) yang dihasilkan oleh sel surya dapat dihitung dengan persamaan (Achmad et al. 2023).

$$P_{out} = V \times I \dots \dots \dots (2.3)$$

P_{out} = Daya keluaran (W)
 V = Tegangan panel surya (V)
 I = Arus panel surya (A)

2.7.4. Efisiensi Panel Surya

Efisiensi panel surya merujuk pada perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan (dalam satuan Watt) dengan luas permukaan yang digunakan. Secara umum, semakin tinggi tingkat efisiensi suatu panel, maka semakin besar pula energi listrik yang mampu dihasilkan dari area permukaan yang

sama. Akan tetapi efisiensi panel surya akan menurun apabila suhu panel surya berada di atas 25°C. (Shanea Harafany et al. 2021). Berikut adalah rumus efisiensi dari panel surya.

:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% \dots \dots \dots (2.4)$$

η = Efisiensi panel surya

P_{out} = Daya yang keluar pada panel surya (W)

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

2.8 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor atau yang juga dikenal sebagai alih bahang (*heat transfer*) merupakan cabang ilmu yang mempelajari mekanisme perpindahan energi *thermal* yang terjadi akibat perbedaan suhu yang terjadi antara dua atau lebih benda atau material. Ketika dua benda dengan perbedaan suhu saling bersentuhan, panas akan mengalir dari objek bersuhu lebih tinggi ke objek bersuhu lebih rendah sebagai akibat dari perbedaan temperature tersebut. Hal itu terjadi karena benda panas melepaskan kalor kepada benda dingin. Jadi, kalor secara alami berpindah dari benda yang suhunya lebih tinggi ke benda yang suhunya lebih rendah. (Irawati, Huda, dan Kurniawan 2019). Berikut perpindahan kalor yang dibagi menjadi tiga yaitu sebagai berikut.

2.8.1. Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan panas melalui mekanisme konduksi merupakan proses perpindahan kalor otomatis terjadi akibat terdapat variasi suhu di antara dua titik dalam suatu medium. Dalam mekanisme ini, transfer panas terjadi berpindah dari area panas ke area yang lebih dingin tanpa disertai perpindahan partikel atau massa zat, melainkan semata-mata melalui perambatan energi panas.

2.8.2. Perpindahan Kalor Konveksi

Konveksi merupakan mekanisme perpindahan panas yang berlangsung akibat gerakan molekuler dalam suatu medium fluida, di mana energi *thermal* ditransfer melalui aliran partikel-partikel zat tersebut. Kondisi tersebut memicu terjadinya perpindahan panas melalui mekanisme konveksi. Proses ini berperan

penting dalam mentransfer energi *thermal* antara permukaan padat dengan medium fluida, seperti cairan maupun gas.

2.8.3. Perpindahan Kalor Radiasi

Radiasi adalah mekanisme perpindahan panas yang berlangsung melalui pemancaran gelombang elektromagnetik dari suatu benda tanpa memerlukan media perantara apa pun.

Dalam konteks penelitian ini, mekanisme perpindahan kalor yang terlibat mencakup dua jenis utama, yakni konduksi dan konveksi. Proses konduksi terjadi pada *heatsink* sementara itu, konveksi berlangsung ketika aliran udara (yang dalam hal ini dihasilkan oleh *fan* atau kipas) melewati permukaan *heatsink*.

2.9 Teknik Pendinginan Panel Surya

Penerapan sistem pendinginan memegang peran krusial dalam meningkatkan efisiensi kerja panel surya serta memperpanjang usia operasionalnya. Dalam teknologi panel surya, metode pendinginan umumnya terbagi menjadi dua tipe: aktif dan pasif. Prinsip yang membedakan dari kedua jenis tersebut adalah pada sistem aktif dibutuhkan sumber tenaga dari luar untuk menjalankan sistem pendinginan. (Marausna 2021).

Upaya untuk meningkatkan efisiensi sel surya dapat dilakukan dengan menurunkan atau menjaga suhu operasionalnya agar tetap mendekati kondisi standar sebesar 25°C. Strategi ini dapat dicapai melalui beberapa pendekatan berikut.

- a. Sistem pendinginan berdasarkan letak permukaan yang diturunkan temperaturnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu bagian depan (*front side*) dan bagian belakang (*back side*) modul. Pada sisi depan, pendinginan dapat dilakukan dengan metode penyemprotan cairan secara periodik sesuai jadwal tertentu, atau dengan mengalirkan air secara kontinu di permukaan modul. Sementara itu, pada sisi belakang, metode yang umum digunakan adalah pendinginan aktif dengan mengalirkan udara menggunakan kipas untuk mempercepat pelepasan panas.
- b. Berdasarkan media pendingin bisa menggunakan cairan atau bisa juga menggunakan udara.

- c. Berdasarkan sistem pengendaliannya, diklasifikasikan menjadi dua jenis, yakni pendinginan pasif dan aktif. Pendinginan pasif mengandalkan kondisi alami dari lingkungan seperti udara, air atau aluminium tanpa memerlukan sistem otomatisasi atau tambahan. Sebaliknya, pendinginan aktif melibatkan penggunaan energi tambahan atau perangkat tertentu guna mempercepat proses pelepasan panas, misalnya melalui pemanfaatan kipas, pompa, atau sistem kontrol otomatis lainnya.

Terdapat beberapa metode pendinginan aktif yang dapat diterapkan pada sel surya, di antaranya sebagai berikut.

- a. Mendinginkan bagian bawah panel menggunakan sirip atau *heatsink* aluminium, seperti yang dilakukan pada penelitian yang dilakukan oleh (Widodo et al. 2015).
- b. Mendinginkan panel surya menggunakan metode *immersion cooling* yaitu dengan cara merendam panel surya kedalam cairan seperti yang dilakukan oleh (Tri Febiana et al. 2023).

Adapun metode pendinginan aktif pada sel surya dapat diperinci sebagai berikut.

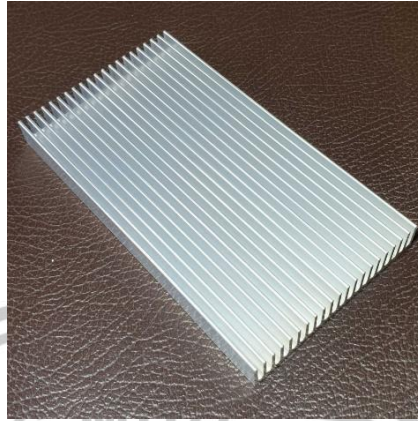
- a. Mengalirkan air dipermukaan panel. Proses ini dilakukan dengan tambahan pompa dan sistem kontrol, seperti penelitian yang telah dilaksanakan oleh (Dewi, Rahmat, dan Musyafiq 2022).
- b. Sistem pendinginan diaplikasikan pada sisi bawah panel dengan menambahkan jalur aliran masuk dan keluar air. Aliran ini bersumber dari tangki penyimpanan dan dikendalikan oleh pompa yang bekerja secara otomatis melalui kontroler.

Dalam penelitian ini metode pendinginan dilakukan dengan menggabungkan *heatsink* dan kipas (*fan*).

2.9.1. *Heatsink*

Heatsink adalah sebuah komponen yang memiliki fungsi untuk mengurangi temperatur pada panel surya. Dalam penelitian *heatsink* terbuat dari aluminium yang diharapkan dapat menyerap panas yang kemudian disalurkan dengan bantuan udara yang dihasilkan oleh *fan* (Fisika dan Konferensi 2019). *Heatsink* berfungsi sebagai media pendingin yang bekerja dengan cara menyerap panas dari permukaan panel surya, sehingga membantu menurunkan suhu operasi dan menjaga stabilitas

kinerja panel. Secara teknis, peningkatan luas permukaan pada heatsink akan mempercepat proses pelepasan panas. Penggunaan aluminium (Al) sebagai bahan *heatsink* memungkinkan terjadinya perpindahan panas melalui proses konduksi, karena hanya memindahkan zat tanpa diikuti perpindahan partikelnya.



Gambar 2. 6 Heatsink (sumber: www.tokopedia.com)

Dalam sebuah penelitian yang telah dilaksanakan oleh (Lupu et al. 2018) menunjukkan bahwa integrasi *heatsink* dengan saluran kecil pada sistem pendinginan panel surya (PV) menghasilkan performa pertukaran panas yang efisien. Salah satu keunggulan dari penerapan teknologi pendinginan ini terletak pada kemampuannya dalam membuang panas dalam jumlah signifikan meskipun diterapkan pada area yang relatif sempit, serta efisiensinya dalam konsumsi daya yang tergolong rendah. Kelemahan dari penerapan metode pendinginan ini meliputi potensi terjadinya korosi pada komponen logam, ketidakteraturan distribusi suhu di seluruh permukaan sistem, serta keterbatasan dalam mencapai efisiensi optimal akibat adanya hambatan dalam penurunan tekanan fluida.

2.9.2. Kipas (*fan*)

Gambar 2.5 memperlihatkan komponen kipas (*fan*) yang berfungsi untuk menghasilkan aliran udara dengan berbagai tujuan, antara lain sebagai pendingin, penyegar, pembuang hawa panas (ventilasi), maupun pengering. Dalam konteks penelitian ini, kipas berperan sebagai penggerak utama dalam proses perpindahan panas melalui mekanisme konveksi paksa. Istilah konveksi paksa merujuk pada kondisi di mana aliran udara tidak terjadi secara alami, melainkan dihasilkan oleh dorongan eksternal, dalam hal ini kipas itu sendiri.

Kipas DC memiliki spesifikasi tegangan standar 12 V dan arus operasional sebesar $0,07 \pm 10\%$ A. Setiap kipas membutuhkan daya input sebesar 0,84 Watt agar dapat beroperasi secara optimal. Selanjutnya masing-masing kipas DC dapat menghilangkan panas yang dihasilkan dengan karakteristik aliran udara maksimum sebesar 44,7 *cubic feet* per menit (CFM) masing-masing. (Amelia et al. 2016).



Gambar 2. 7 Kipas (fan) (sumber: www.tokopedia.com)

Kipas yang digunakan untuk sistem pendinginan memperoleh sumber dayanya dari suplai eksternal, sehingga tidak memengaruhi keluaran listrik dari panel surya. Operasional kipas tersebut dikendalikan oleh sistem kontrol otomatis yang terhubung dengan sensor suhu, yang dipasang pada permukaan panel untuk mengatur proses menyalaan dan pemadaman kipas secara efisien sesuai kondisi *thermal*.

2.10 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan suatu konsep jaringan sistem komputasi yang memungkinkan integrasi antara sistem komputasi dengan perangkat mekanik, digital, objek, serta makhluk hidup termasuk manusia dan hewan melalui identifikasi digital yang bersifat unik, dikenal sebagai *Unique Identifiers* (UID). Dengan penerapan sistem ini, masing-masing komponen mampu berinteraksi dan melakukan pertukaran data secara otomatis melalui jaringan internet, tanpa membutuhkan keterlibatan langsung dari pengguna manusia. Hal ini dimungkinkan karena seluruh elemen dalam jaringan IoT telah dirancang untuk saling terhubung dan mampu bertukar informasi secara *real-time*.

Melalui pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT), manusia kini dapat mengontrol berbagai perangkat di sekitarnya, bahkan dari jarak jauh, dengan

memanfaatkan jaringan internet. Prinsip kerja *Internet of Things* (IoT) didasarkan pada pemrosesan instruksi yang diprogramkan ke dalam perangkat, di mana sistem secara otomatis mengeksekusi perintah yang telah tertanam melalui bahasa pemrograman tertentu. Perangkat tersebut biasa disebut sebagai mikrokontroler. Mikrokontroler yang telah diprogram tersebut kemudian dihubungkan dengan perangkat modul konektivitas, seperti modul Wi-Fi atau SIM card, agar dapat mengakses jaringan internet.

2.10.1. NodeMCU ESP8266



Gambar 2. 8 NodeMCU ESP8266 (sumber: <https://shopee.co.id/>)

Gambar 2.8 merupakan gambar dari NodeMCU ESP8266. NodeMCU ESP8266 merupakan platform open-source yang menyediakan fleksibilitas tinggi, di mana desain perangkat kerasnya dapat diedit, dimodifikasi maupun direplikasi sesuai kebutuhan. NodeMCU Dev Kit/board terdiri dari chip ESP8266 yang mendukung Wi-Fi. ESP8266 merupakan chip Wi-Fi berbiaya ekonomis yang dirancang oleh *Espressif Systems* dengan kemampuan mendukung protokol TCP/IP. NodeMCU menggunakan sistem berkas SPIFFS (Serial Peripheral Interface Flash File System) berbasis flash pada modul. NodeMCU diimplementasikan dalam C dan berlapis pada Espressif NON-OS SDK. *Firmware* awalnya dikembangkan sebagai proyek pendamping modul pengembangan NodeMCU berbasis ESP8266 yang populer tetapi proyek ini sekarang didukung komunitas, dan *firmware* sekarang dapat dijalankan pada modul ESP apapun. (Azman 2020).

NodeMCU adalah perangkat seperti Arduino. Komponen utamanya adalah ESP8266. Memiliki pin yang dapat diprogram. Memiliki Wi-Fi internal. Dapat memperoleh daya melalui port micro-usb. Biayanya rendah. Dapat diprogram melalui beberapa lingkungan pemrograman. (Azman 2020).