

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Studi terdahulu mengenai penerapan sistem pendingin pada sistem fotovoltaik dipaparkan pada berbagai jurnal, artikel, dan penelitian menjadi rujukan dalam penelitian ini. Tabel 2.1 adalah pemaparan jurnal, artikel, dan penelitian; dengan pembahasan lanjut setiap entri berdasarkan metodenya, yaitu pendinginan *heatsink* dan pendinginan *heatpipe*.

Tabel 2.1 - Acuan Teori

Ref	Penulis	Tahun	Metode	Hasil
[6]	Krstic dkk	2024	<i>Heatsink</i>	Penurunan suhu 7,5°C
[7]	Refaey dkk	2022		Penurunan suhu 12,8°C - 33,3°C berdasarkan konsentrasi CPV
[8]	Arifin dkk	2020		Penurunan suhu 10,2°C & Peningkatan performa 2,74%
[9]	Egab dkk	2020		<i>Heatsink</i> meningkatkan performa fotovoltaik dan menurunkan suhu sebesar 50%
[10]	Fatoni dkk	2019		Suhu panel menurun sebesar 15,9°C dan efisiensi meningkat 28,65% dengan peningkatan tegangan rata-rata 1,37 V
[11]	Roslan dan Hassim	2019	<i>Heat pipe</i>	Meningkatkan penghasilan daya listrik ~19,45% dan energi hingga ~8,025% dengan penurunan suhu 10,5°C
[12]	Anderson dkk	2008		ΔT antara sel dan suhu lingkungan menurun dari 100°C menjadi 40°C saat rangkaian sistem pendingin diterapkan
[13]	Sabry dan Lashin	2023		Peningkatan daya sebanyak 16% dibanding dengan hanya menggunakan <i>heatsink</i>
[14]	Lashin,	2023		Daya maksimum meningkat 16% untuk <i>heat pipe</i> panjang dan 12% untuk <i>heat pipe</i> pendek pada konsentrasi tinggi.
[15]	Basri dkk.	2022		<i>Heat pipe</i> meningkatkan performa sebanyak 3,2%

2.1.1 *Heatsink*

Telah dilakukan sebuah penelitian yang menguji 36 variasi *heatsink* yang diletakan pada bagian belakang panel surya. Setiap *heatsink* diletakan pada posisi sel surya berbeda, sehingga setiap sel surya memiliki *heatsink* berbeda. Parameter pengukuran adalah tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya menggunakan CMP22 pyranometer, serta suhu menggunakan dan dilakukan perbandingan dengan panel surya yang tidak diberikan perlakuan; pengujian dilakukan dari jam 11:00 - 12:30 dengan cuaca cerah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *heatsink* mampu menurunkan suhu panel sebanyak 7,5°C secara rata-rata. Selain itu, penelitian menemukan bahwa jenis *heatsink* yang paling efektif memiliki kontak permukaan dengan panel yang luas serta jarak antar sirip yang cukup lebar

untuk mendukung aliran udara yang mampu melepaskan panas [6].

Dilakukan sebuah kajian yang meneliti dampak penerapan sistem pendinginan *heatsink* aluminium pada CPV *Triple Junction* dengan pemfokus *fresnel lens* yang memiliki sistem *tracker* untuk mengoptimalkan orientasi panel surya terhadap matahari; lokasi pengujian dilakukan di Yanbu, Arab Saudi. *Heatsink* yang digunakan berjenis sirip lurus dan diletakan di belakang CPV. Proses penelitian membandingkan performa CPV saat diberikan pendinginan dan saat sistem tidak diberikan pendinginan. Ditemukan bahwa penggunaan *heatsink* mampu menurunkan suhu kerja CPV sebanyak $12,8^{\circ}\text{C}$ hingga $33,3^{\circ}\text{C}$ berdasarkan tingkat konsentrasi CPVnya [7].

Dalam suatu kajian yang meneliti dampak variasi jenis *heatsink* pada panel surya, disusun rancangan sistem fotovoltaik dengan panel surya *poly-crystalline* 50 WP. Variabel yang diuji adalah jumlah *heatsink*, hasil ini kemudian dibandingkan dengan performa panel tanpa *heatsink*. Kemudian, dilakukan pengujian kombinasi material *heatsink* antara aluminium dan tembaga untuk dasar dan siripnya untuk menentukan kombinasi material yang paling efektif untuk pendingin. Parameter percobaan yang diukur adalah suhu, tegangan, dan arus pada panel surya. Dilaporkan bahwa penerapan *heatsink* membantu efek pendinginan dan kombinasi material *heatsink* tidak memiliki pengaruh banyak terhadap suhu. Konfigurasi dengan pendinginan maksimal adalah penggunaan 15 *heatsink* dengan material tembaga sebagai dasar dan sirip, dengan penurunan suhu $10,2^{\circ}\text{C}$ dan peningkatan performa 2,74% [8].

Berbeda dengan literatur sebelumnya, sebuah studi melakukan pengujian numeris dampak penerapan *heatsink* pada sistem panel surya terhadap penurunan suhu sistem; perangkat lunak yang digunakan untuk pemodelan sistem dan studi numeris adalah ANSYS-Fluent. Dibuat model rancangan *heatsink* dengan sirip kotak dan *heatsink* dengan sirip kotak yang berlubang; material yang digunakan untuk membuat *heatsink* diatur untuk memiliki konduktivitas panas tinggi. Efisiensi pendinginan diperhitungkan untuk konfigurasi *heatsink* berbeda dengan memvariasikan jumlah sirip dan jarak lubang. Ditemukan bahwa penambahan jumlah sirip dan lubang berdampak pada penurunan suhu panel; dengan performa maksimum berupa penurunan suhu panel sebanyak 50% dibanding dengan panel tanpa pendingin [9].

Pengaruh penerapan gabungan sistem pendingin *heatsink* dan sistem pendingin aktif pada panel surya dilakukan. Lokasi pengujian dilakukan pada Palembang. Studi membandingkan performa panel surya tanpa sistem pendingin dengan panel surya yang memiliki gabungan sistem pendingin *heatsink* dan fan. Dilaporkan bahwa perlakuan pendinginan mampu menurunkan suhu panel sebanyak $15,9^{\circ}\text{C}$ dan meningkatkan efisiensi sel surya sebanyak 26,8% [10].

2.1.2 Heat Pipes

Dilakukan kajian yang meneliti dampak pemasangan sistem pendinginan *heat pipes* secara menikung pada bagian belakang panel untuk meningkatkan luas area yang diselubungi pipa. Dibandingkan performa antara panel fotovoltaik dengan *heat pipes* dan panel tanpa *heatsink*. Parameter eksperimen yang diukur adalah suhu panel, pencahayaan matahari, dan tegangan dari tiap panel. Ditemukan penerapan *heat pipes* mampu meningkatkan penghasilan daya listrik hingga 19,45% dan menghasilkan peningkatan energi hingga 8,025% dengan penurunan suhu panel mencapai nilai $-10,5^{\circ}\text{C}$ dari suhu $\sim 51^{\circ}\text{C}$ [11].

Sebuah kajian menguji dampak penerapan sistem pendingin pasif *heat pipes* dan *heat fins* dengan material tembaga untuk menurunkan suhu kerja CPV. Untuk menentukan desain sistem pendingin yang optimal, digunakan simulasi CFDDesign untuk merancang konfigurasi jarak *fins* yang ideal dan dibuat prototipe *heatfins* berdasarkan hasilnya. Pengujian dilakukan dengan bervariasi sudut panel surya dan diukur perbedaan suhu antara sel dengan lingkungan (ΔT) serta daya sistem CPV. Ditemukan bahwa dengan penerimaan fluks panas 40 W/cm^2 , *heat pipes* dan *fins* mampu menghasilkan ΔT 43°C ; sementara, sistem yang tidak diberikan perlakuan memiliki ΔT 110°C . Sehingga, penelitian ini menunjukkan potensi pengambungan *heat pipes* dan *heat fins* untuk mendukung pendinginan CPV [12].

Telah dilakukan sebuah kajian yang meneliti rancangan sistem CPV dengan generator *thermoelectric* (TEG) melalui *heat pipes* sebagai cara memanfaatkan panas berlebihan yang dihasilkan oleh CPV. Panas diterima dari CPV oleh *heat pipes* dan dialirkan ke TEG; digunakan juga *heat fins* pada bagian generator untuk membantu melepaskan panas pada sistem. Parameter percobaan yang diuji adalah variasi ukuran *heat*

pipe berbeda serta apabila TEG digunakan atau tidak. Bila dilihat dari peningkatan performa secara keseluruhan, ditemukan bahwa konfigurasi *heat pipe* panjang, TEG, serta *heatsink* pada TEG mampu memberikan peningkatan penghasilan daya listrik paling besar sebanyak 20% bila dibandingkan dengan konfigurasi dengan hanya *heatsink*. Apabila diperhitungkan performa CPVnya secara tersendiri, maka terdapat peningkatan produksi daya sebanyak 16% dibanding dengan konfigurasi hanya *heatsink* [13].

Dampak variasi simulasi sistem pendinginan pasif *heat pipe* diterapkan pada sistem CPV. Dibandingkan dua jenis *heat pipe* dengan diameter yang sama (6mm) namun dengan panjang berbeda (250 mm dan 150 mm). Ditemukan bahwa berdasarkan perlakuan konsentrasi cahaya, *heat pipe* panjang memiliki performa lebih efisien untuk konsentrasi tinggi dibandingkan dengan *heat pipe* pendek; terdapat peningkatan daya sebanyak 16% untuk pipa panjang dan 12% untuk pipa pendek pada CPV konsentrasi tinggi [14].

Pengaruh penerapan sistem pendinginan pasif *heat pipe* pada panel surya dilakukan pada suatu kajian. *Heat pipe* dipasang pada bagian belakang panel surya, kemudian ditambahkan perantara antara panel dengan *heat pipe* untuk mengoptimalkan proses perpindahan panas. Diuji variasi rasio pengisian fluida pada *heat pipe* (25%, 45%, dan 65%). Studi menemukan bahwa rasio pengisian fluida yang ideal adalah 45% dengan hasil produksi energi listrik 3,2% lebih tinggi dibandingkan dengan fotovoltaik konvensional [16].

2.2. Dasar Teori

2.2.1 Fotovoltaik Terkonsentrasi (CPV)

Kebutuhan akan energi terbarukan mengalami peningkatan akibat keterbatasan serta dampak dari penggunaan bahan bakar fosil. Contohnya adalah pemanasan global, emisi gas rumah kaca, dan harga yang fluktuatif [17]. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan adalah energi surya berupa sinar dan panas dari matahari. Cahaya matahari dapat dikonversikan menjadi energi listrik menggunakan sel fotovoltaik akibat efek fotovoltaik [18]. Sel fotovoltaik digabungkan untuk membentuk modul fotovoltaik, dan modul fotovoltaik digabungkan untuk menyusun panel fotovoltaik. Secara konvensional, penerimaan cahaya matahari dilakukan secara langsung; namun terdapat metode lain untuk menerima cahaya matahari yaitu metode fotovoltaik terkonsentrasi.

Fotovoltaik terkonsentrasi atau CPV adalah metode pemasangan panel fotovoltaik yang memanfaatkan lensa dan pemantul cahaya untuk memfokuskan cahaya matahari pada area yang lebih kecil; sehingga energi yang dihasilkan pada area kecil bisa sebanding atau melebihi fotovoltaik konvensional [19]. Sistem CPV lebih cocok digunakan pada fotovoltaik yang memiliki efisiensi tinggi seperti jenis *multi-junction* agar memaksimalkan penggunaan setiap panel; mempertimbangkan bahwa biaya panel ber efisiensi tinggi lebih mahal, maka metode CPV mampu mengurangi jumlah panel yang dibutuhkan. Akan tetapi, metode ini mengakibatkan CPV rentan terhadap pemanasan berlebihan yang mampu menghambat produksi energi, sehingga diperlukan cara untuk mengatasinya [4].

2.2.2 Kebutuhan Pendinginan Fotovoltaik

Panel fotovoltaik mampu menerima cahaya surya dan mengkonversinya menjadi listrik melalui efek fotovoltaik. Akan tetapi, konversi ini tidak sempurna sehingga terdapat energi surya yang terkonversi menjadi panas pada panel fotovoltaik [1]. Dalam penggunaan panel fotovoltaik, terjadinya pemanasan berlebihan mengakibatkan penurunan kinerja fotovoltaik [17]. Peningkatan suhu pada panel surya mengakibatkan penurunan efisiensi modul surya sebesar -0,45% untuk setiap 1°C peningkatan suhu di atas 25°C [20]. Untuk mengatasi pemanasan berlebihan, maka dapat diterapkan sistem pendinginan pada sistem fotovoltaik.

Jenis sistem pendinginan yang dapat diterapkan pada sistem fotovoltaik terbagi menjadi dua, yaitu pendinginan aktif dan pasif [5]. Teknik pendinginan aktif menggunakan alat yang memerlukan tenaga untuk diaktifkan seperti pompa atau fan untuk melakukan pendinginan [21]. Contoh metode pendinginan aktif adalah pendinginan aliran air, sirkulasi udara, dan penyemprotan air. Sementara, teknik pendinginan pasif hanya memerlukan instalasi alat pendinginan untuk melakukan pendinginan tanpa memerlukan penggunaan tenaga [21]. Contoh metode pendinginan pasif adalah *heat pipes*, *heatsinks*, dan perendaman panel pada air.

2.2.3 Pendinginan *Heatsink*

Heatsink merupakan sebuah komponen pendinginan pasif yang terbentuk dari logam dalam bentuk jajaran sirip. Susunan sirip meningkatkan luas permukaan sehingga mendukung perpindahan panas dari sumber panas ke lingkungan melalui konveksi; panas akan berpindah dari sumber menuju sirip yang memiliki suhu yang rendah dan dilepaskan melalui konveksi alami [6]. Sehingga, efek pendinginan pasif pada sumber meningkat karena didukung oleh luas permukaan untuk melepaskan panas melalui konveksi yang lebih luas.

Agar *heatsink* mampu bekerja secara maksimal, maka diperlukan jenis logam dengan konduktivitas panas tinggi seperti aluminium dan tembaga [22]. Selain itu, efektivitas pendinginan oleh *heatsink* dipengaruhi oleh bentuk, ketebalan sirip, jarak antar sirip, serta jumlah sirip [22]. Karena sifat *heatsink* yang sederhana, mudah diproduksi, dan hemat biaya, *heatsink* menjadi solusi pendinginan yang memiliki banyak penerapan seperti pada perangkat elektronik atau sistem HVAC; dan sifat tersebut juga ideal pada penerapan pendinginan fotovoltaik pasif. Pelepasan panas pada *heatsink* dapat dideskripsikan melalui persamaan:

$$Q = h \cdot A_{fins} \cdot \Delta T$$

Di mana:

- Q : Pelepasan panas (W)
- h : Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
- A_{fins} : Luas area total sirip *heatsink* (m^2)
- ΔT : Perbedaan suhu antara *heat pipe* dengan lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.4 Pendinginan *Heat Pipes*

Heat pipes merupakan alat pendinginan pasif yang memanfaatkan konsep perpindahan panas untuk melakukan pendinginan. *Heat pipes* berupa pipa yang terbuat dari material konduktivitas panas tinggi yang terisi dengan fluida [23]. Perpindahan panas terjadi ketika panas dari sebuah sumber diterima pada bagian evaporator *heat pipes*, sehingga mengevaporasikan fluida menjadi uap; akibat perbedaan tekanan uap mengalir ke bagian kondensor *heat pipes* yang memiliki suhu lebih rendah dan melepaskan panas ke

lingkungan, uap kemudian mampu mengembun kembali menjadi fluida dan mengulang prosesnya [23].

Akibat proses tersebut, terjadi pendinginan karena panas yang dihasilkan oleh sebuah sumber dapat diterima dan dilepaskan pada bagian yang memiliki suhu lebih rendah, sehingga suhu di sumber dapat berkurang. Karena tidak diperlukan sistem yang diaktifkan, maka proses pendinginan ini bersifat pasif. Dalam proyek tugas akhir yang dilakukan, pemasangan *heat pipes* diletakan pada bagian belakang panel karena mampu menyelubungi banyak area panel sehingga meningkatkan efektivitas pendinginannya; terdapat juga bagian *heat pipe* yang terpapar pada lingkungan untuk melepaskan panas. Bagian *heat pipe* yang terhubung dengan sel surya merupakan bagian evaporator yang menerima panas, dan bagian yang terpapar pada lingkungan merupakan bagian kondensor yang melepaskan panas. Pelepasan panas pada *heat pipe* dapat dideskripsikan melalui persamaan:

$$Q = h \cdot A_{pipe} \cdot \Delta T$$

Di mana:

Q : Pelepasan panas (W)

h : Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

A_{pipe} : Luas area konveksi pipa (m^2)

ΔT : Perbedaan suhu antara *heat pipe* dengan lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.5 Perpindahan Panas dan Resistansi Termal

Perpindahan panas merupakan proses aliran energi panas akibat adanya perbedaan suhu; energi panas pada suatu sistem cenderung mengalir dari suhu tinggi menuju suhu rendah [24]. Kemudian, metode perpindahan panas terbagi menjadi 3 yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi merupakan perpindahan panas melalui kontak langsung dengan sumber panas, konveksi merupakan perpindahan panas melalui perantara fluida mengalir, dan radiasi merupakan perpindahan panas melalui emisi gelombang elektromagnetik tanpa perantara [24].

Dalam proyek tugas akhir ini, diperhitungkan proses penerimaan dan perpindahan panas pada sel surya dari iradiasi matahari untuk menemukan pemodelan suhu kerja sel

surya pada kondisi *steady-state*. Panas yang diterima oleh sel surya berpindah melalui konduksi menuju komponen-komponen sistem pendingin; selain dari itu, panas juga mengalami dilepaskan melalui konveksi alami. Kondisi *steady-state* berlaku ketika energi panas yang diterima sama dengan energi panas yang dilepaskan [24]. Dalam sistem CPV, panas yang dihasilkan pada sel surya akibat konversi cahaya surya menjadi energi listrik yang tidak sempurna dapat dideskripsikan melalui persamaan berikut:

$$Q_{in} = (1 - \eta) \cdot G \cdot A_{sel} \cdot CR$$

Di mana:

- Q_{in} : Energi panas yang diterima oleh sel surya (W)
- η : Efisiensi sel surya (%)
- G : Iradiasi matahari (W/m^2)
- CR : *Concentration ratio* konsentrator

Berdasarkan energi panas yang diterima oleh sel surya, peningkatan suhu pada sel surya dapat dimodelkan melalui persamaan berikut [24]:

$$\Delta T = Q_{in} \cdot R_{total}$$

Di mana:

- ΔT : Perubahan suhu sistem ($^{\circ}C$)
- Q_{in} : Energi panas yang diterima oleh sel surya (W)
- R_{total} : Resistansi termal total sistem (K/W)

Resistansi termal mendeskripsikan kemampuan suatu material untuk memindahkan/melepaskan panas; bila nilai resistansi termal semakin tinggi, maka perpindahan panas lebih sulit terjadi [25]. Dalam pemodelan penerimaan dan perpindahan panas pada sistem CPV, resistansi termal total dari sistem merupakan salah satu komponen untuk mendeskripsikan perubahan suhu sistem. Resistansi termal total yang diperhitungkan merupakan gabungan dari resistansi termal konduksi dan konveksi sistem CPV.

Resistansi termal konduksi diperhitungkan melalui persamaan berikut [25]:

$$R_{cond} = \frac{\Delta x}{k \cdot A}$$

Di mana:

R_{cond} : Resistansi termal konduksi sistem (K/W)

Δx : Ketebalan (m)

k : Konduktivitas termal ($W/m \cdot K$)

A : Luas area konduksi panas (m^2)

Dengan penjumlahan setiap komponen resistansi termal konduksi diperhitungkan sebagai berikut [26]:

$$\Sigma R_{cond} = R_{cond.1} + R_{cond.2} + \dots + R_{cond.n}$$

Resistansi termal konveksi diperhitungkan melalui persamaan berikut [25]:

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Di mana:

R_{conv} : Resistansi termal konveksi sistem (K/W)

h : Koefisien konveksi panas ($W/m^2 \cdot K$)

A : Luas area permukaan konveksi. (m^2)

Dengan penjumlahan setiap komponen resistansi termal konveksi diperhitungkan sebagai berikut [26]:

$$\frac{1}{\Sigma R_{conv}} = \frac{1}{R_{conv.1}} + \frac{1}{R_{conv.2}} + \dots + \frac{1}{R_{conv.n}}$$

Berdasarkan perubahan suhu yang terjadi pada sistem, maka perhitungan suhu akhir sistem CPV dilakukan melalui persamaan berikut:

$$T_i = T_o + \Delta T$$

Di mana:

T_i : Suhu akhir sistem ($^{\circ}C$)

T_o : Suhu awal sistem ($^{\circ}C$)

ΔT : Perubahan suhu sistem. ($^{\circ}C$)