

**ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC-THERMAL* (PV/T) DENGAN
KOMBINASI *CROSS-CUT PLATE FINS* DAN *THERMOELECTRIC COOLER***

(Skripsi)

Oleh:

Calvin Andyansa Falah

1915021017



**TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC-THERMAL* (PV/T) DENGAN KOMBINASI *CROSS-CUT PLATE FINS* DAN *THERMOELECTRIC COOLER*

Oleh:

CALVIN ANDYANSA FALAH

Pemanfaatan kombinasi antara *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *cross-cut plate fins* pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dilakukan untuk meningkatkan daya penyerapan panas yang dibuang melalui sirkulasi udara. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi termal dan elektrik serta penurunan temperatur *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *Thermoelectric Cooler* dan *cross-cut plate fins*. Fokus utama penelitian ini adalah menganalisis pada kombinasi antara *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *cross-cut plate fins* dalam susunan *In-Line* dan *Staggered* yang dibandingkan dengan *Photovoltaic* (PV) konvensional melalui metode eksperimental. Selain itu, penelitian dilakukan pada variasi 1 m/s hingga 3 m/s dengan radiasi 1000 W/m². Hasil penelitian ini, penggunaan *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC) pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dapat meningkatkan unjuk kerja termal dan elektrik. Dalam penurunan suhu permukaan PV, susunan *Staggered* dan *In-Line* menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan konvensional, dengan penurunan suhu permukaan tertinggi pada kecepatan udara 3 m/s. Peningkatan efisiensi termal PV/T tertinggi mencapai 45,54% pada kecepatan udara 3 m/s untuk susunan *Staggered* dan 44,68% untuk susunan *In-Line*. Selain itu, efisiensi listrik terbaik yang dapat dicapai adalah 0,74% pada kecepatan udara 3 m/s.

Kata Kunci: *Photovoltaic, fins, Thermoelectric Cooler, Staggered, In-Line, efisiensi*

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC-THERMAL (PV/T) WITH CROSS-CUT PLATE FINS AND THERMOELECTRIC COOLER COMBINATION

By:

CALVIN ANDYANSA FALAH

The utilization of a combination between Thermoelectric Cooler (TEC) and cross-cut plate fins in a Photovoltaic-Thermal (PV/T) system is carried out to enhance the absorption of heat dissipated through air circulation. Therefore, this research aims to analyze the thermal and electrical efficiency as well as the temperature reduction of the Photovoltaic-Thermal (PV/T) system employing the combination of Thermoelectric Cooler and cross-cut plate fins. The primary focus of this study is to analyze the combination of Thermoelectric Cooler (TEC) and cross-cut plate fins in both In-Line and Staggered arrangements, which are compared to conventional Photovoltaic (PV) systems through experimental methods. Furthermore, the study is conducted across air velocity variations ranging from 1 m/s to 3 m/s with a radiation intensity of 1000 W/m². The findings of this research indicate that the implementation of cross-cut plate fins and Thermoelectric Cooler (TEC) in the Photovoltaic-Thermal (PV/T) system can enhance both thermal and electrical performance. In terms of PV surface temperature reduction, both Staggered and In-Line configurations outperform the conventional arrangement, achieving the highest surface temperature reduction at an air velocity of 3 m/s. The highest improvement in PV/T thermal efficiency is attained, reaching 45.54% at an air velocity of 3 m/s for the Staggered arrangement, and 44.68% for the In-Line arrangement. Additionally, the best achievable electrical efficiency is 0.74% at an air velocity of 3 m/s.

Keywords: *Photovoltaic, fins, Thermoelectric Cooler, Staggered, In-Line, efficiency*

**ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC-THERMAL* (PV/T) DENGAN
KOMBINASI *CROSS-CUT PLATE FINS* DAN *THERMOELECTRIC COOLER***

Oleh:

Calvin Andyansa Falah

Skripsi

**Sebagai Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**

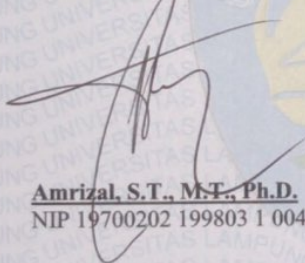


**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : Analisis Unjuk Kerja *Photovoltaic-Thermal* (PV/T)
dengan Kombinasi *Cross-Cut Plate Fins* Dan
Thermoelectric Cooler
Nama : Calvin Andyansa Falah
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021017
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

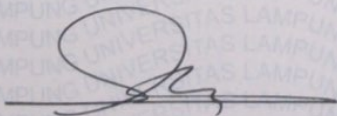
MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



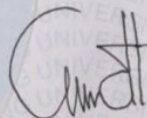
Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19700202 199803 1 004

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



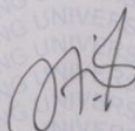
Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP 19710331 199903 1 003

Komisi Pembimbing 2



Ahmad Yonanda, S.T., M.T.
NIP 19930110 201903 1 008

Kepala Proram Studi
S1 Teknik Mesin

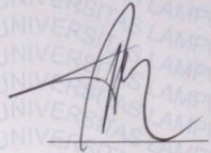


Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP 19701104 199703 2 001

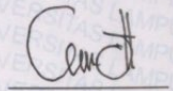
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

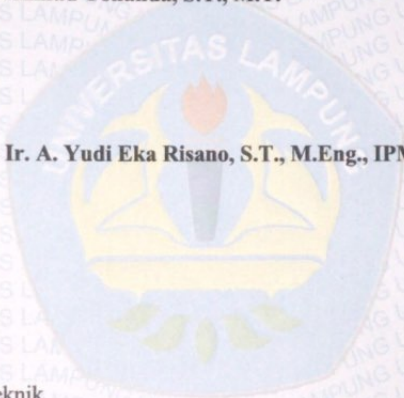
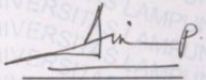
Ketua Penguji : **Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**



Anggota Penguji: **Ahmad Yonanda, S.T., M.T.**



Penguji Utama : **Ir. A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., IPM**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. J
NIP. 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **07 Agustus 2023**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

DENGAN INI SAYA MENYATAKAN BAHWA SKRIPSI INI SAYA BUAT DENGAN USAHA SAYA SENDIRI DAN BUKAN HASIL DARI PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 KEPUTUSAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN KEPUTUSAN REKTOR NO. 13 TAHUN 2019.

Bandar Lampung, 22 Agustus 2023

Penulis,



CALVIN ANDYANSA FALAH
NPM. 1915021017

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Palembang, Sumatera Selatan pada tanggal 13 September 2001 sebagai anak pertama dari empat bersaudara, dari pasangan bapak Anton Tobing dan ibu Lidiana Pane.

Pendidikan yang dijalani pertama kali yaitu di Madrasah Ibtidaiyah Adabiyah II Palembang sejak masa taman kanak-kanak pada tahun 2007. Melanjutkan Sekolah Dasar (SD) pada tahun dan sekolah yang sama hingga lulus pada tahun 2013. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 8 Kota Palembang sejak tahun 2013 dan lulus pada tahun 2016. Setelah kelulusan, penulis belajar sejak tahun 2016 hingga kelulusan pada tahun 2019 di Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 5 Palembang dengan jurusan Ilmu Pengetahuan Alam. Selama berpendidikan, penulis telah mengikuti banyak kegiatan sejak Sekolah Dasar (SD) seperti lomba ceramah tingkat Sekolah, Kota dan Kabupaten. Kemudian pada Sekolah Menengah Pertama (SMP), penulis dinobatkan sebagai salah satu Duta Anti Penyakit HIV yang dimana menyebarkan tentang perilaku berbahaya penyebaran penyakit tersebut antar siswa/i. Selain itu, penulis juga mengikuti perlombaan Pencak Silat se Kota Palembang pada tahun 2017. Pada Sekolah Menengah Atas (SMA), penulis mengikuti kegiatan organisasi Patroli Keamanan Sekolah dan banyak memegang kejuaraan tingkat Provinsi Sumatera Selatan dalam lomba Latihan Baris-Berbaris (LTBB) sebagai juara 1 dalam 3 perlombaan dan Demo Kecelakaan Lalu Lintas sebagai juara 1 dalam 2 perlombaan.

Setelah lulus Sekolah Menengah Atas (SMA), penulis memiliki minat dalam pengetahuan di Teknik Mesin dan melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung pada tahun 2019. Penulis mengikuti Program Studi Strata 1 Teknik Mesin dengan mengambil bidang Konversi Energi. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam mengikuti kegiatan organisasi seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) pada tahun 2021 sebagai anggota bagian Humas dan dilanjutkan sebagai Kepala Bidang Penelitian dan Pengembangan. Dalam proses mengambil pengalaman kerja, penulis melakukan kegiatan Kerja Praktik di PT Pupuk Sriwidjaja (PUSRI) Palembang pada tahun 2022 dan mengambil penelitian dengan judul “Pengaruh Laju Aliran Massa terhadap Efektivitas *Shell and Tube Cooler BASCO Type 500*”. Kemudian pada tahun yang sama, penulis melakukan penelitian Tugas Akhir dengan judul “Analisis Unjuk Kerja *Photovoltaic-Thermal (PV/T)* dengan Kombinasi *Cross-Cut Plate Fins* dan *Thermoelectric Cooler*” dibawah bimbingan Bapak Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. sebagai pembimbing pertama dan Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. sebagai pembimbing kedua.

Motto

Pantang mundur, jika lelah beristirahat sejenak tetapi bukan berarti menyerah
serta tidak ada hadiah bagi yang tidak berusaha.

“Kesederhanaan adalah keunggulan yang paling murni”

~ Leonardo Da Vinci ~

“Kegelapan tidak dapat mengusir kegelapan, hanya cahaya yang bisa
melakukannya. Kebencian tidak dapat mengusir kebencian, hanya cinta yang bisa
melakukannya”

~ Martin Luther King Jr. ~

Keberhasilan bukanlah akhir, kegagalan bukanlah fatal, yang penting adalah
keberanian untuk terus melangkah

~ Winston Churchill ~

SAWACANA

Assalamu‘alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur dipanjatkan kepada Allah SWT dalam penuh rahmat dan hidayahnya, penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan kelancaran. Shalawat serta salam dijunjungkan kepada Baginda Rasulullah SAW yang memberikan tuntunan dan syafaat kepada umatnya agar berada pada jalan yang lurus. Skripsi ini disusun untuk memenuhi kebutuhan penyelesaian tugas akhir dan sebuah karya tulis ilmiah. Skripsi ini juga merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Harapannya dengan skripsi ini dapat memajukan teknologi terkait pengembangan modul energi surya dengan perlakuan termal dan menjadi wawasan serta ilmu yang bermanfaat dalam kemajuan sumber energi baru dan terbarukan (EBT).

Penyelesaian skripsi ini dapat dilakukan dengan bimbingan, dukungan dan arahan dari semua pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak Anton Tobing, S.E. dan Almarhumah Lidiana Pane yang telah membesarkan penulis dengan penuh rasa sayang dengan bimbingan dan usaha serta doa yang selalu terpanjatkan dalam segala kegiatan.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T. M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
3. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Novri Tanti, S.T., M.T. selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang banyak memberikan ilmu terkait penelitian skripsi dan dukungan dalam penyelesaiannya.
6. Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang membimbing dalam penyusunan dan ilmu terkait penelitian skripsi ini.
7. Ir. A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., IPM selaku Dosen Pembahas atas masukan dan saran dalam berjalannya penelitian dalam seminar.
8. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung atas ilmu pengetahuan yang telah disampaikan.
9. Rekan terdekat Laboratorium Termodinamika, Yoggi Pahlevy dalam banyak bantuan serta dukungan sahabat seperjalanan.
10. Sahabat Jumadil Rolian, S.E., Riko Fajariansyah, S.Sos., Achmad Hasbullah, S.T., Hisyam yang telah membantu materi dan non-materi selama proses penelitian.
11. Nadyah Fajrina, S.T. sebagai orang istimewa yang selalu mendukung proses-proses kegiatan dan menemani masa-masa senang dan susah terutama saat penyelesaian skripsi.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu atas dukungannya.

Penulis menyadari kekurangan dalam skripsi ini dengan harapan masukan dan saran dari berbagai pihak dalam penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua orang.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung, 24 Agustus 2023
Penulis,



CALVIN ANDYANSA FALAH
NPM. 1915021017

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR NOTASI	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Energi Matahari.....	7
2.2 Perpindahan Panas.....	8
2.2.1 Konduksi	8
2.2.2 Konveksi	10
2.2.3 Radiasi.....	11
2.3 <i>Photovoltaic</i>	15
2.4 Jenis <i>Photovoltaic</i>	19
2.4.1 <i>Mono-Crystalline Photovoltaic</i>	19
2.4.2 <i>Poly-Crystalline Photovoltaic</i>	20
2.4.3 <i>Thin-Film Photovoltaic</i>	20
2.5 <i>Photovoltaic-Thermal (PV/T)</i>	21
2.6 <i>Heatsink/Absorber</i>	24
2.7 <i>Thermoelectric (TE)</i>	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	29

3.1.1 Tempat Penelitian.....	29
3.1.2 Waktu Penelitian.....	29
3.2 Diagram Alur Penelitian.....	30
3.3 Alat dan Bahan.....	32
3.4 Prosedur Penelitian.....	40
3.3.1 <i>Heatsink</i> yang digunakan Sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T).....	40
3.3.2 Penempatan dan Susunan <i>Heatsink</i> dan <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC).....	41
3.3.3 Saluran Udara pada Sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T).....	43
3.3.4 Pengujian <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T) dengan Kombinasi <i>Absorber Cross-Cut Plate Fins Heatsink</i> dan <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC).....	45
3.5 Skema Penelitian.....	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Hasil Pengambilan Data	49
4.2 Pembahasan	52
4.2.1 Perbandingan Temperatur Permukaan Sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T) dengan Kombinasi <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC) dan <i>Cross-Cut Plate Fins Heatsink</i>	52
4.2.2 Perbandingan Efisiensi Termal <i>Photovoltaic</i> (PV) Sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T) dengan Kombinasi <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC) dan <i>Cross-Cut Plate Fins Heatsink</i>	55
4.2.3 Perbandingan Efisiensi Elektrik <i>Photovoltaic</i> (PV) Sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T) dengan Kombinasi <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC) dan <i>Cross-Cut Plate Fins Heatsink</i>	58
4.2.4 Perbandingan Efisiensi <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC) yang dihasilkan Sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i> (PV/T) dengan Kombinasi <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC) dan <i>Cross-Cut Plate Fins Heatsink</i>	61

BAB V PENUTUP	65
5.1 Simpulan.....	65
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi arah perpindahan panas konduksi.....	9
Gambar 2.2 Batas lapisan perpindahan panas konveksi	10
Gambar 2.3 Pancaran radiasi.....	12
Gambar 2.4 <i>Exploded view</i> dari modul <i>Photovoltaic</i>	16
Gambar 2.5 Prinsip kerja <i>Photovoltaic</i>	17
Gambar 2.6 Persimpangan P-N dan penyelarasan pita	18
Gambar 2.7 <i>Mono-crystalline Photovoltaic</i>	19
Gambar 2.8 <i>Poly-Crystalline Photovoltaic</i>	20
Gambar 2.9 <i>Copper Indium Diselenide Thin-film Photovoltaic</i>	21
Gambar 2.10 Skema kerja pada <i>Photovoltaic-Thermal (PV/T)</i>	22
Gambar 2.11 (a) <i>Rectangular heatsink</i> , (b) <i>Circular fins heatsink</i> , (c) <i>Cross-cut plate fins heatsink</i>	24
Gambar 2.12 Perbandingan koefisien perpindahan panas jenis <i>fins</i>	25
Gambar 2.13 Efek <i>Seebeck</i> dan <i>Peltier</i> pada <i>Thermoelectric (TE)</i>	27
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	32
Gambar 3.2 <i>Solar Power Meter</i> SPM-1116 SD.....	32
Gambar 3.3 <i>Thermocouple</i>	33
Gambar 3.4 MPPT <i>Tristar</i> TS-45	33
Gambar 3.5 <i>Temperature Recorder</i> Luntun BTM-420 SD.....	34
Gambar 3.6 <i>Multitester</i> Krisbow KW06-276.....	34
Gambar 3.7 <i>Anemometer</i> LM-8000A	35
Gambar 3.8 Aki No. LC-V127R2N41	35
Gambar 3.9 <i>Poly-crystalline Photovoltaic</i>	36
Gambar 3.10 <i>Cross-cut plate fins heatsink</i>	36
Gambar 3.11 <i>Thermoelectric Cooler (TEC1-12706)</i>	37

Gambar 3.12 <i>Solar Simulator</i>	37
Gambar 3.13 <i>Blower SUM-2,5"</i>	38
Gambar 3.14 Saluran Udara	38
Gambar 3.15 Kipas Angin.....	39
Gambar 3.16 Lampu beban DC LED 50 Watt.....	39
Gambar 3.17 Pasta termal GD-900	40
Gambar 3.18 Dimensi <i>cross-cut plate fins heatsink</i>	41
Gambar 3.19 Susunan sistem <i>Photovoltaic-Thermal (PV/T)</i>	42
Gambar 3.20 Susunan (A) <i>In-Line</i> , (B) <i>Staggered</i>	42
Gambar 3.21 Struktur saluran udara sistem <i>Photovoltaic-Thermal</i>	44
Gambar 3.22 Skema rangkaian pengujian <i>Photovoltaic Thermal (PV/T)</i>	48
Gambar 4.1 Grafik perbandingan temperatur permukaan <i>Photovoltaic (PV)</i> dengan variasi kecepatan udara 1 m/s hingga 3 m/s.....	53
Gambar 4.2 Grafik temperatur <i>outlet</i> pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi laju aliran massa.....	56
Gambar 4.3 Grafik efisiensi termal pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi laju aliran massa.....	56
Gambar 4.4 Grafik efisiensi elektrik pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi kecepatan udara 1 m/s hingga 3 m/s	59
Gambar 4.5 Grafik efisiensi TEC pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi kecepatan udara 1 m/s hingga 3 m/s	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat termo-fisik dari lapisan <i>Photovoltaic</i> (PV)	13
Tabel 3.2 Variasi berdasarkan EN-12975-2:2006 untuk sistem PV/T.....	45
Tabel 4.1 Hasil rata-rata pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi kecepatan 1 m/s hingga 3 m/s.....	51
Tabel 4.2 Hasil unjuk kerja termal pengujian PV/T	55
Tabel 4.3 Hasil efisiensi elektrik pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi kecepatan udara 1 m/s hingga 3 m/s.....	59
Tabel 4.4 Hasil efisiensi TEC pengujian PV/T pada 1000 W/m ² dengan variasi kecepatan udara 1 m/s hingga 3 m/s	62

DAFTAR NOTASI

\dot{Q}_{cond}	= Laju perpindahan panas konduksi (Watt)
\dot{Q}_{conv}	= Panas konveksi (Watt)
\dot{Q}_{loss}	= Panas yang hilang (Watt)
G	= Irradiasi (W/m^2)
k	= Konduktivitas termal ($Watt/m \cdot ^\circ C$)
h	= Koefisien perpindahan panas konveksi ($Watt/m^2 \cdot ^\circ C$)
$\eta_{th,PV}$	= Efisiensi termal <i>Photovoltaic</i> (%)
$\eta_{el,PV}$	= Efisiensi elektrik <i>Photovoltaic</i> (%)
η_{TE}	= Efisiensi <i>Thermoelectric</i> (%)
A	= Luas penampang rambat panas (m^2)
A_{PV}	= Luas permukaan <i>Photovoltaic</i> (m^2)
$T_{f,in}$	= Temperatur fluida masuk (K)
$T_{f,out}$	= Temperatur fluida keluar (K)
T_{hot}	= Temperatur sisi panas ($^\circ C$)
T_{cold}	= Temperatur sisi dingin ($^\circ C$)
ΔT	= Perubahan temperatur ($^\circ C$)
Δx	= Perubahan jarak (m)
T_s	= Temperatur permukaan ($^\circ C$)
T_a	= Temperatur lingkungan ($^\circ C$)
T	= Temperatur absolut (K)
Re	= <i>Reynolds number</i>
Pr	= <i>Prandtl number</i>
Nu_L	= <i>Nusselt number</i>
R_{Total}	= Hambatan termal ($^\circ C/W$)
E	= Daya pancar (W/m^2)

σ	= Konstanta Stefan Boltzmann = $5,669 \times 10^{-8}$ (W/m ² .K)
α	= Difusivitas termal (m ² /s)
W	= Lebar permukaan (m)
L	= $4L/K$ = Panjang karakteristik (m)
ρ	= Massa jenis fluida (kg/s)
μ	= Viskositas dinamik fluida (kg.m/s)
ν	= Viskositas kinematis fluida (m ² /s)
\dot{m}	= Laju aliran massa fluida (kg/s)
V_{PV}	= Tegangan yang dihasilkan <i>Photovoltaic</i> (Volt)
I_{PV}	= Arus yang dihasilkan <i>Photovoltaic</i> (A)
P_{TE}	= Daya elektrik <i>Photovoltaic</i> (Watt)
V_{TEC}	= Tegangan yang dihasilkan <i>Thermoelectric</i> (Volt)
I_{TEC}	= Arus yang dihasilkan <i>Thermoelectric</i> (A)
P_{TEC}	= Daya elektrik <i>Thermoelectric</i> (Watt)
Z	= <i>figure of merit</i> , (1/ ⁰ C)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi di Indonesia masih banyak digunakan dalam bentuk energi tak terbarukan seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara yang semakin lama semakin menipis. Untuk mengurangi penggunaan energi tak terbarukan tersebut dilakukan pertumbuhan dan pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT). Sesuai PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050 (Siswanto, 2019). Salah satu energi baru dan terbarukan tersebut adalah *Photovoltaic* yang menangkap radiasi sebagai bentuk energi matahari yang bisa dimanfaatkan secara terus-menerus tanpa harus kehabisan sumber energinya.

Photovoltaic (PV) sendiri merupakan suatu sel yang terbuat dari semikonduktor *silicone-crystalline* yang disusun secara seri ataupun paralel menjadi kesatuan modul surya. *Photovoltaic* (PV) mampu menghasilkan suatu energi listrik dari hasil gelombang elektromagnetik yang dihasilkan dari pancaran cahaya (*photon*) matahari. Penggunaan *Photovoltaic* (PV) sendiri memiliki kelebihan yaitu bersihnya energi yang didapatkan karena tidak menghasilkan emisi karbon (CO₂) dalam prosesnya, perawatan untuk modul juga mudah dilakukan, dan sumber energi yang dapat dihasilkan terus-menerus tanpa harus menunggu lama untuk diperbarui dan dapat terjadi sepanjang waktu. Selain itu, berdasarkan data Ditjen EBTKE (2018), potensi energi baru dan terbarukan di Indonesia yang tertinggi berasal dari energi matahari dengan nilai 207,8 GWp yaitu sekitar 47% dari total EBT lain.

Adapun kelemahan yang dimiliki *Photovoltaic* (PV) adalah biaya awal yang cukup tinggi dan relatif lebih mahal dibandingkan sumber energi lainnya, memerlukan ruang yang luas untuk pemasangannya, efisiensinya bergantung pada kondisi cuaca yang tidak stabil. Selain itu, panas yang ditimbulkan akibat radiasi matahari dapat mengurangi efisiensi dari *Photovoltaic* (PV).

Untuk mengatasi penurunan efisiensi tersebut, maka *Photovoltaic* (PV) dapat dilakukan dengan pendinginan. Melalui pendinginan, (Sajjad dkk., 2019) melakukan penelitian modul *Photovoltaic* (PV) dengan perbandingan pendinginan menggunakan *Air Conditioner* (AC) dan konvensional yang menunjukkan efisiensi elektrik dengan pendinginan *Air Conditioner* (AC) 6% lebih tinggi dibandingkan modul *Photovoltaic* (PV) tanpa pendinginan. Kemudian (Amrizal dkk., 2019) yang melakukan penelitian pendinginan *Photovoltaic* (PV) dengan sistem kerja sistem secara *thermal* menggunakan kolektor termal dapat menghasilkan efisiensi elektrik 2,5% lebih tinggi dibandingkan *Photovoltaic* (PV) konvensional. Adapun penelitian (Hadi dkk., 2021) yang mendinginkan menggunakan *blower* dan saluran udara pada *Photovoltaic* (PV) dapat meningkatkan efisiensi sebesar 0,78% lebih tinggi dibandingkan *Photovoltaic* (PV) konvensional. Beberapa pendinginan tersebut dapat menggunakan *absorber* pada bagian bawah permukaan *Photovoltaic* (PV) yang digunakan untuk meneruskan temperatur dari *Photovoltaic* (PV) dan dikeluarkan melalui fluida.

Absorber merupakan alat yang digunakan untuk pertukaran panas yang baik dalam proses pendinginan. Berdasarkan (Arifin dkk., 2020) menunjukkan pendinginan pada *Photovoltaic* (PV) menggunakan *absorber* berupa plat aluminium berlubang dengan kecepatan udara pendekatan 1,5 m/s yang melaluinya, mampu menghasilkan temperatur dari *Photovoltaic* (PV) sebesar 72,8°C sedangkan tanpa *absorber* sebesar 85,3°C. Kemudian (Fterich dkk., 2021) yang melakukan penelitian pada *Photovoltaic* (PV) dengan *absorber* berupa pipa aluminium panjang mendapatkan penurunan maksimum temperatur pada *Photovoltaic* (PV) sekitar 75°C dengan kecepatan aliran

udara terendah sebesar 0,5 m/s hingga 60°C untuk kecepatan aliran udara tertinggi sebesar 2 m/s. Lalu, (Yu dkk., 2019) melakukan penelitian pada *Photovoltaic* (PV) dengan menggunakan *absorber* berupa kanal “*harp*” dan kanal “*grid*” menghasilkan temperatur pada kanal “*harp*” rata-rata 38,5°C sedangkan kanal “*grid*” rata-rata 35,4°C .

Berdasarkan beberapa penelitian terkait, pemasangan *absorber* pada *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dapat memberikan penurunan temperatur dan meningkatkan efisiensi elektrik *Photovoltaic* (PV). Namun dari penelitian terkait tidak menggunakan *Thermoelectric* (TE) dalam memanfaatkan panas yang dihasilkan oleh *Photovoltaic* (PV). *Thermoelectric* (TE) sendiri berfungsi untuk menangkap panas dari *Photovoltaic* (PV) dan dapat menghasilkan energi listrik dalam keadaan beda temperatur antara sisi panas permukaan dan sisi dingin *Thermoelectric* (TE). Selain itu, *absorber* yang diberikan tidak menggunakan *absorber* dengan permukaan diperluas atau disebut *fins* (sirip). *Fins* sendiri berguna untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas agar lebih efisien.

Maka dilakukan analisis pada *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan menggunakan kombinasi *absorber* berupa *cross-cut plate fins* yang disertai dengan penggunaan *Thermoelectric* (TE). Pengujian dilakukan di dalam ruangan menggunakan *solar simulator* dengan besar radiasi 1000 W/m² dan kecepatan fluida udara bervariasi untuk menghasilkan kenaikan efisiensi pada *Photovoltaic* (PV) dan dalam memanfaatkan termal pada *Photovoltaic* (PV) kepada bagian *Thermoelectric* (TE) sebagai pembangkit listrik. Sedangkan *absorber* tersebut berguna untuk meneruskan temperatur dari *Photovoltaic* (PV) dan *Thermoelectric Cooler* (TEC) dengan sistem kerja secara termal atau sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T).

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang didapatkan berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan sebagai berikut:

1. Menganalisis efisiensi termal dan elektrik *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *absorber cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC).
2. Menganalisis temperatur permukaan yang dihasilkan *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *absorber cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC).

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian kali ini adalah:

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung menggunakan *solar simulator* dengan lampu halogen sebanyak 15 buah yang terdiri dari 5 pasangan parallel.
2. Penelitian digunakan fluida udara dari *air blower* menggunakan metode sistem *single-pass flow* melalui konveksi paksa dengan kecepatan udara *inlet* 1 m/s, 2 m/s dan 3 m/s.
3. Saluran laju udara menggunakan pipa dan triplek yang dilapisi insulasi Aluminium sebagai pencegahan panas dari luar masuk kedalam sistem.
4. Pengujian menggunakan satu panel *Photovoltaic* (PV) dengan daya 100 Wp dengan ukuran 1020 mm x 670 mm.
5. Kenaikan temperatur udara *inlet* sebesar 2°C dipengaruhi gesekan udara dan kenaikan tekanan yang terjadi di saluran udara akibat *baffles* yang diberikan.
6. *Thermoelectric* (TE) yang digunakan adalah TEC-12706 yang banyak beredar umum.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan untuk penyusunan laporan tugas akhir ini sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bagian ini berisikan pendahuluan yang meliputi latar belakang suatu masalah, rumusan masalah yang diambil, tujuan penelitian, batasan masalah, sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tinjauan pustaka yang terdiri atas teori yang bersangkutan untuk mendukung pembahasan dari penelitian yang diambil diantaranya energi matahari, Perpindahan panas, *Photovoltaic*, jenis *Photovoltaic*, *Photovoltaic-Thermal (PV/T)*, *heatsink*, *Thermoelectric (TE)*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisi metode yang dilakukan selama penelitian melalui tempat dan waktu pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan selama penelitian, metode prosedur penelitian, standar yang digunakan, pengumpulan data pengamatan, serta alur dari penelitian. Dalam hal ini setelah data telah dikumpulkan dan akan dianalisis dengan menggunakan metode grafis.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil data yang telah diperoleh selama penelitian, Analisa, dan pembahasan mengenai analisis unjuk kerja *Photovoltaic-Thermal (PV/T)* dengan kombinasi *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler (TEC)* baik temperatur permukaan, efisiensi termal, efisiensi elektrik dan efisiensi *Thermoelectric Cooler (TEC)*.

V. PENUTUP

Menyampaikan kesimpulan dari hasil penelitian berdasarkan tujuan dan pembahasan yang telah diuraikan secara jelas dan saran yang disampaikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi mengenai sumber referensi yang didapatkan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir terhadap penulisan, penyusunan, dan penyelesaian.

LAMPIRAN

Lampiran yang disediakan berupa data-data pelengkap laporan tugas akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Matahari

Energi matahari merupakan sumber energi yang terpancar ke atas permukaan bumi dan tidak akan pernah habis pemakaiannya. Kurang dari 30% energi tersebut dipantulkan kembali ke angkasa 47% dikonversikan menjadi panas, 23% digunakan untuk seluruh sirkulasi kerja yang terdapat di atas permukaan bumi. Sebagian kecil, 0,25% ditampung angin, gelombang, arus dan masih ada bagian yang sangat kecil yaitu 0,025%, disimpan melalui proses fotosintesis di dalam tumbuh-tumbuhan yang akhirnya digunakan dalam proses pembentukan batu bara dan minyak bumi. Sehingga bisa dikatakan bahwa sumber segala energi adalah energi matahari (Yuliananda dkk., 2015).

Dari beberapa penelitian menyatakan bahwa dengan memanfaatkan cahaya matahari terutama intensitasnya, dengan *Photovoltaic* (PV) dapat dibuat sumber energi listrik untuk pemakaian manusia. Pemilihan sumber energi terbarukan ini sangat beralasan mengingat suplai energi matahari dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan bumi mencapai 3×10^{24} Joule pertahun, setara dengan 10.000 kali pemakaian energi di seluruh dunia saat ini. Di Indonesia melimpahnya cahaya matahari dapat ditangkap di seluruh kepulauan Indonesia hampir sepanjang tahun mempunyai potensi energi matahari sangat besar dengan jumlah harian rata-rata 4,5-4,8 (kWh/m²)/hari. Saat tengah hari yang cerah intensitas sinar matahari mencapai 1000 W/m² (Yuliananda dkk., 2015).

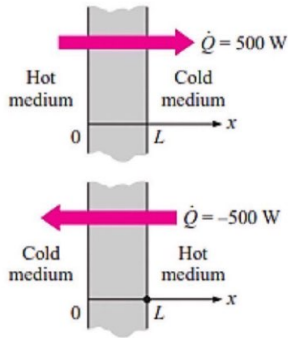
Secara umum, pita gelombang cahaya matahari dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu sinar *ultraviolet* (UV) dengan panjang gelombang 100 - 400 nm, cahaya tampak dengan panjang gelombang 400 - 700 nm, dan sinar inframerah (IR) dengan panjang gelombang 700 nm - 1 mm. Sinar inframerah dan sinar *ultraviolet* tidak dapat dilihat oleh mata manusia. Sinar *ultraviolet* merupakan bagian dari gelombang elektromagnetik pada rentang 100-400 nm, sedangkan radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi terjadi pada rentang panjang gelombang sekitar 100 nm sampai dengan 1 mm (Yuliananda dkk., 2015).

2.2 Perpindahan Panas

Perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut. Perpindahan perpindahan panas pada umumnya dibedakan menjadi tiga cara yang berbeda: konduksi, konveksi dan radiasi (Cengel, 2011).

2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah proses dimana panas berpindah dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan, yang bersinggungan secara langsung. Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Konduksi adalah satu-satunya mekanisme di mana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya. Konduksi penting pula dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat (Cengel, 2011). Berikut adalah arah perpindahan panas pada konduksi diilustrasikan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2. 1 Ilustrasi arah perpindahan panas konduksi
(Sumber: Cengel, 2011)

Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan temperatur, arah perpindahan panas terjadi dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah seperti pada Gambar 2.1. Perpindahan panas melalui konduksi terjadi sampai tercapai kesetimbangan termal, yaitu saat tidak ada lagi perbedaan temperatur antara kedua medium atau di dalam suatu medium yang bersentuhan. Secara matematis nilai perpindahan konduksi dapat ditulis dengan persamaan (2.1) berikut:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

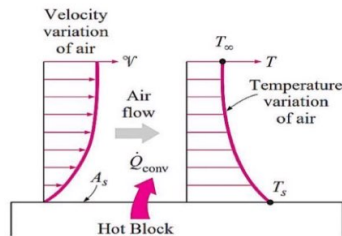
- \dot{Q}_{cond} = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)
- k = Konduktivitas termal (Watt/m. °C)
- A = Luas penampang rambat panas (m²)
- ΔT = Perubahan temperatur (°C)
- Δx = Perubahan jarak (m)

Tanda negatif didalam persamaan untuk menjamin bahwa perpindahan panas dalam arah x positif adalah sebuah nilai positif.

2.2.2 Konveksi

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya diatas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Energi yang berpindah dengan menaikkan suhu partikel-partikel fluida yang berbatasan dan meningkatkan energi dalam partikel-partikel tersebut. Energi yang berpindah dengan cara menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu lebih rendah didalam fluida, dimana partikel akan bercampur dan akan memindahkan sebagian energinya kepada partikel-partikel fluida lainnya (Cengel, 2011).

Perpindahan panas konveksi terdiri dari dua macam, yaitu perpindahan energi panas dan perpindahan partikel acak yang juga membawa energi. Perpindahan panas konduksi berlanjut seiring dengan perpindahan partikel acak dan gerakan fluida pada batas lapisan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2 berikut



Gambar 2.2 Batas lapisan perpindahan panas konveksi
(Sumber: Cengel, 2011)

Aliran fluida di atas permukaan pada Gambar 2.2 semakin melambat ketika mendekati permukaan dan bernilai nol pada titik temu antara fluida dan permukaan (*no-slip condition*). Pada perpindahan panas konveksi terbagi menjadi dua yaitu konveksi alami dan konveksi paksa.

Konveksi paksa terjadi karena ada gaya eksternal yang mengakibatkan fluida mengalir seperti pada kipas angin dan pompa yang bergantung pada nilai inersia terhadap suatu viskositas dinamik fluida tersebut sedangkan konveksi alami dapat terjadi akibat gaya-gaya apung (*buoyancy*) terhadap viskositas kinematik fluida (Cengel, 2011). Persamaan perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan (2.2).

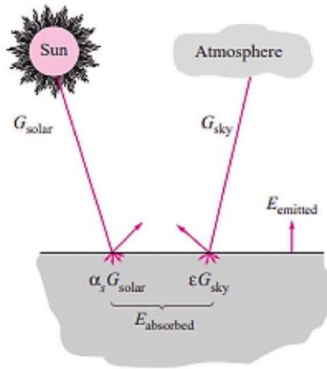
$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_a) \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

- \dot{Q}_{conv} = Panas konveksi (Watt)
- h = Koefisien perpindahan panas konveksi (Watt/m².°C)
- A = Luas permukaan (m²)
- T_s = Temperatur permukaan (°C)
- T_a = Temperatur lingkungan (°C)

2.2.3 Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan energi dari permukaan ke segala arah melalui suatu gelombang elektromagnetik. Radiasi berlangsung karena foton-foton dan temperatur yang dipancarkan pada suatu permukaan ke segala arah yang mengandung gelombang elektromagnetik. Setiap benda memiliki pancaran radiasi yang berbeda berdasarkan temperatur dan sifat permukaan benda itu sendiri. Radiasi dapat dipantulkan, diserap dan diteruskan pada suatu medium (Cengel, 2011).



Gambar 2.3 Pancaran radiasi
(Sumber: Cengel, 2011)

Laju panas yang dipancarkan oleh permukaan benda akan lebih kecil nilainya dari *blackbody* (benda hitam) yang dapat dinyatakan dalam persamaan (2.3) berikut.

$$E = \sigma AT^4 \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

- E = Daya pancar (W/m^2)
- σ = Konstanta Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ ($W/m^2.K$)
- T = Temperatur absolut (K)

Perpindahan panas konduksi dapat terjadi pada bagian *Photovoltaic* (PV) akibat pancaran radiasi. Menurut penelitian oleh (Yonanda dkk., 2022), sifat termo-fisik lapisan *Photovoltaic* (PV) sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Sifat termo-fisik dari lapisan *Photovoltaic* (PV)

Domain	Ketebalan (mm)	Konduktivitas Termal (W/m. ⁰ K)	Massa Jenis (kg/m ³)	Panas Spesifik (J/kg. ⁰ C)
Kaca	3	1.8	3000	500
Cell	0.31	148	2331	677
EVA	0.52	0.353	960	2090
Tedlar	0.13	0.21	1200	1250

Dari nilai-nilai tersebut, untuk menghitung laju perpindahan panas konduksi yang terjadi pada *Photovoltaic* (PV) dari persamaan berikut.

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{R_{Total}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

T_1 = Temperatur permukaan *Photovoltaic* (⁰C)

T_2 = Temperatur *Backsheet* Aluminium (⁰C)

R_{Total} = Hambatan termal (⁰C/W)

Dalam hambatan termal yang terjadi secara konduksi pada *Photovoltaic* yaitu:

$$R_{Total} = \left(\frac{L}{kA_s}\right)_{kaca} + \left(\frac{L}{kA_s}\right)_{cell} + \left(\frac{L}{kA_s}\right)_{EVA} + \left(\frac{L}{kA_s}\right)_{Tedlar} \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

L = Ketebalan material pada *Photovoltaic* (m)

Dalam perpindahan panas yang terjadi pada *Photovoltaic* (PV) akan dialirkan pada bagian *Thermoelectric* (TE) secara konduksi dengan menentukan konduktivitas termal pada *Thermoelectric* (TE) dengan persamaan berikut:

$$k_{TE} = \frac{(T_{hot} - \Delta T) \cdot V_{PV} \cdot I_{PV}}{2L \cdot T_{hot} \cdot \Delta T} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

k_{TE} = Konduktivitas termal pada *Thermoelectric* (W/m.K)

Dari sifat bahan konduktivitas termal pada suatu *Thermoelectric* (TE) tersebut didapatkan perpindahan panas konduksi pada *Thermoelectric* (TE). Untuk mencari nilai koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi pada *heatsink* dan *Thermoelectric* (TE) dengan suatu persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

Re = *Reynolds number*

ρ = Massa jenis fluida (kg/s)

V = Kecepatan mengalir fluida (m/s)

D = Diameter = $4A/K$ = Diameter hidrolik (m)

μ = Viskositas fluida dinamik (kg/m.s)

Kemudian, bilangan *Prandtl* digunakan untuk rasio antara viskositas fluida kinematik dengan difusivitas termal dari suatu fluida,

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana:

Pr = *Prandtl number*

α = Difusivitas Termal (m²/s)

ν = Viskositas kinemaik fluida (m²/s)

Dari persamaan (2.7) dan (2.8), dilakukan penentuan terhadap *Nusselt number*,

$$Nu_L = C.Re^m.Pr^n \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

Nu_L = Nusselt number

Nilai-nilai C merupakan koefisien perpindahan panas empiris sedangkan m dan n adalah konstanta yang tergantung pada jenis aliran dan geometri sistem dalam persamaan bilangan *Nusselt* pada konveksi paksa aliran internal. Lalu, didapatkan suatu koefisien perpindahan panas pada suatu *heatsink* dan *Thermoelectric* (TE) yaitu,

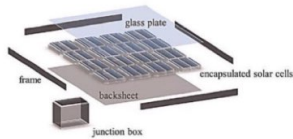
$$h = \frac{k}{L}Nu_L \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

k = Konduktivitas termal pada *heatsink* dan *Thermoelectric* (W/m.K)

2.3 *Photovoltaic*

Photovoltaic atau biasa disebut panel surya merupakan alat penangkap energi matahari terdiri dari beberapa sel yang tersusun dan memiliki sifat untuk penyerapan pancaran energi matahari dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Selama *Photovoltaic* beroperasi di bawah sinar matahari, energi radiasi matahari dikonversi menjadi energi listrik dan terjadi peningkatan temperatur *Photovoltaic*. Pembangkit listrik tenaga matahari dapat diimplementasikan atau diwujudkan dengan menggunakan *Photovoltaic* (Julisman dkk., 2017).

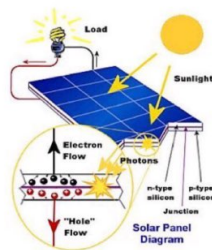


Gambar 2.4 Exploded view dari modul *Photovoltaic*
 (Sumber: Geretschläger dkk., 2016)

Hal ini dikarenakan dengan menggunakan *Photovoltaic*, pemanfaatan energi matahari bisa dilakukan. Adapun untuk memaksimalkan pemanfaatan banyak *Photovoltaic* dapat di pasang secara seri atau paralel untuk mendapatkan energi listrik yang optimal. Pemanfaatan energi matahari dapat dilakukan menggunakan dua cara yaitu pertama *Electrical Photovoltaic* dan yang kedua yaitu *Photovoltaic-Thermal (PV/T)*. Adapun *Photovoltaic (PV)* tersusun dari material-material semi konduktor yang disusun membentuk sebuah modul. Modul ini dapat disusun secara seri atau paralel untuk meningkatkan arus atau tegangan yang dihasilkan dari *array Photovoltaic (PV)* (Carlo dkk., 2014).

Prinsip kerja dari *Photovoltaic (PV)* menggabungkan simpangan P-N dalam bahan semikonduktor di mana tegangan dikembangkan dari radiasi matahari. Tegangan yang dihasilkan di seluruh simpangan tergantung pada sifat P-bahan dan N-bahan serta konstanta difusi. Sel solar dibuat dengan membutuhkan dua mekanisme untuk mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya harus diserap oleh sel di mana elektron harus dihasilkan dalam konduksi dan lubang dari pita valensi. Elektron dan lubang yang dihasilkan harus terpisah dan dipindahkan ke kontak selektif. Prinsip paling sederhana dari *Photovoltaic* dapat direalisasikan dengan menggunakan persimpangan P-N tunggal, artinya persimpangan antara semikonduktor tipe-P dan semikonduktor tipe-N. Fitur semikonduktor ini dapat dikontrol dengan doping, yang dalam bentuknya yang paling sederhana terdiri dari penggantian atom dalam kisi material dengan elemen lain yang memiliki valensi yang lebih tinggi (donor) atau valensi yang lebih rendah (penerima) (Carlo dkk., 2014).

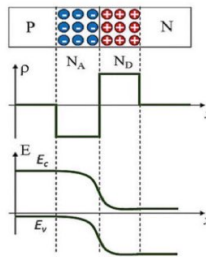
Keadaan donor dan penerima ini dekat dengan tepi pita dan dapat dengan mudah memindahkan muatan melalui eksitasi termal ke dalam pita konduksi (17egative dari keadaan donor) atau valensi (lubang dari keadaan penerima). Karena pembawa muatan bebas dari doping berada di pita semikonduktor, semikonduktor tipe-N memiliki kerapatan negatif yang lebih tinggi pada pita konduksi, dan semikonduktor tipe-P yang demikian pula akan memiliki kerapatan lubang yang lebih tinggi pada pita valensi. Setelah membentuk persimpangan P-N, konsentrasi 17egative yang lebih tinggi pada tipe-N dibandingkan dengan semikonduktor tipe-P, akan menginduksi difusi pembawa negatif dari semikonduktor tipe-N ke tipe-P. Sebaliknya, lubang akan berdifusi dari tipe-P ke tipe-N (Carlo dkk., 2014).



Gambar 2.5 Prinsip kerja *Photovoltaic*
(Sumber: Maulana Ibrahim & Slamet, 2020)

Aliran muatan ini akan berlanjut sampai tercapai keseimbangan termal dan menginduksi pembentukan wilayah muatan ruang (atau wilayah penipisan) tanpa pembawa muatan bebas di dalamnya. Muatan positif menumpuk di antarmuka sisi-N antara dua semikonduktor, sementara muatan negatif yang sama berkumpul di sisi-P, menghasilkan medan listrik di seluruh wilayah penipisan yang menentang difusi muatan lebih lanjut. Faktanya, keberadaan medan listrik akan memaksa semua elektron berlebih yang melewati wilayah muatan ruang menuju sisi-N, sementara lubang akan bergerak ke persimpangan sisi-P (Carlo dkk., 2014).

Kesetimbangan tercapai ketika arus mengalir dan difusi elektron dan lubang seimbang. Melihat diagram pita pada Gambar 2.6, terjadi pembentukan zona penipisan dengan kepadatan muatan bersih. Lubang akan bermigrasi ke persimpangan sisi-P. Kesetimbangan tercapai ketika arus mengalir dan difusi elektron dan lubang seimbang. Perbedaan resistansi pada kedua sisi persimpangan akan menciptakan medan listrik yang pada gilirannya akan menekuk profil pita di seluruh wilayah penipisan. Perbedaan potensial antara dua wilayah muatan ruang disebut potensial bawaan dan terkait dengan perbedaan antara tingkat Fermi dari kedua sisi persimpangan. Doping yang lebih kuat dari kedua sisi akan menginduksi potensi bawaan yang lebih tinggi dan wilayah penipisan yang lebih kecil (Carlo dkk., 2014).



Gambar 2.6 Persimpangan P-N dan penyalarsan pita

(Sumber: Carlo dkk, 2014)

Jika energi *photon* lebih rendah dari celah energi, maka material akan transparan terhadap radiasi. Semua *photon* dengan energi yang lebih tinggi dari celah akan benar-benar membangkitkan elektron ke tingkat energi yang lebih tinggi dari pita minimum konduksi (atau lubang lebih rendah dari maksimum pita valensi). Namun, energi ini akan hilang melalui proses yang disebut termalisasi, di mana akhirnya dilepaskan ke kisi-kisi material, menghasilkan peningkatan suhu persimpangan. Setelah pembangkitan *photon*, pembawa muatan harus melakukan perjalanan ke kontak tempat mereka dikumpulkan secara selektif (Carlo dkk., 2014).

2.4 Jenis *Photovoltaic*

Terdapat dari beberapa jenis dasar dari sel *Photovoltaic* yang digunakan atau diaplikasikan secara umum berikut ini.

2.4.1 *Mono-Crystalline Photovoltaic*

Merupakan jenis *Photovoltaic* (PV) merupakan jenis paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini dan menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. *Mono-crystalline* dirancang untuk penggunaan yang memerlukan konsumsi listrik besar pada tempat-tempat yang beriklim ekstrim dan dengan kondisi alam yang sangat ganas. Memiliki efisiensi sampai dengan 15%. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya matahari kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan (Hari Purwoto dkk., 2018). Seperi yang terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 *Mono-crystalline Photovoltaic*
(Sumber: Harahap, 2020)

2.4.2 Poly-Crystalline Photovoltaic

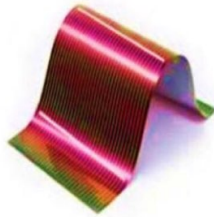
Merupakan *Photovoltaic* (PV) yang memiliki susunan kristal acak karena dipabrikasi dengan proses pengecoran. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis *mono-crystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama. *Photovoltaic* (PV) jenis ini memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan tipe *mono-crystalline*, sehingga memiliki harga yang cenderung lebih rendah (Hari Purwoto dkk., 2018).



Gambar 2.8 *Poly-Crystalline Photovoltaic*
(Sumber: Harahap, 2020)

2.4.3 Thin-Film Photovoltaic

Merupakan *Photovoltaic* (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis *micro-crystalline silicone* dan *amorphous* dengan efisiensi modul hingga 8,5%, sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per watt, daya yang dihasilkan lebih besar daripada *mono-crystalline* dan *poly-crystalline*. Inovasi terbaru adalah *Thin-Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam kondisi yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik hingga 45% lebih tinggi dari *Photovoltaic* (PV) jenis lain dengan daya yang setara.

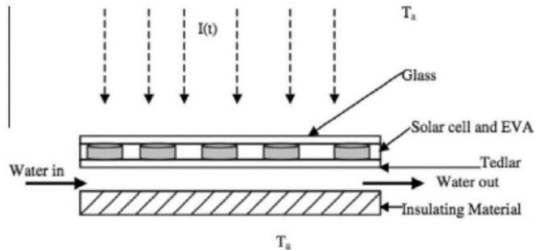


Gambar 2.9 *Copper Indium Diselenide Thin-film Photovoltaic*
(Sumber: Harahap, 2020)

2.5 *Photovoltaic-Thermal (PV/T)*

Area keseluruhan yang diperlukan untuk memenuhi permintaan energi panas dan listrik terlalu besar. Oleh karena itu, merupakan ide yang baik untuk menggunakan energi matahari dalam menghasilkan energi listrik dan aplikasi pemanas pada saat yang bersamaan. Ketika *absorber* panas matahari (SC) dan *Photovoltaic* (PV) digabungkan bersama, efisiensi pemanfaatan energi secara keseluruhan ditingkatkan untuk *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) (Jia dkk., 2019). Sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) adalah integrasi komponen *Photovoltaic* (PV) dan solar kolektor termal.

Hal ini akan menghasilkan listrik dan panas dari sistem gabungan. Terdiri dari kolektor termal konvensional dengan penyerap yang ditutupi oleh lapisan *Photovoltaic* (PV). Modul *Photovoltaic* (PV) menghasilkan listrik, dan secara bersamaan energi panas yang diserap diangkat oleh fluida kerja. Akibatnya, efisiensi dari *Photovoltaic* (PV) meningkat. Sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dapat memberikan *input* energi yang berguna dan mengurangi konsumsi jenis sumber energi lainnya. Pada tahap awal pengembangan teknologi surya, daerah radiasi matahari tinggi atau akses terbatas ke jaringan listrik dianggap sebagai tempat yang cocok untuk implementasi teknologi *Photovoltaic* (PV).



Gambar 2.10 Skema kerja pada *Photovoltaic Thermal* (PV/T)
(Sumber: Reddy dkk., 2015)

Namun, efisiensi sel surya bergantung pada temperatur. Ketika temperatur meningkat, efisiensi konversi listrik biasanya turun karena pengaruh suhu pada mobilitas, panjang difusi dan masa pakai pembawa muatan minoritas dan arus saturasi *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang dijelaskan oleh (Vorobiev dkk., 2006). Sistem ini terdiri dari konsentrator radiasi, sel *Photovoltaic* (PV), dan *Thermoelectric Generator* (TEG). Menurut perhitungan mereka, efisiensi keseluruhan dari sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dapat mencapai sekitar 30%, yang mengusulkan sistem pembangkit listrik hibrida PV/TE dengan manajemen termal yang dioptimalkan dan efisiensi sistem ini dievaluasi menjadi sekitar 23%.

Hasil penelitian (Zhu dkk., 2016) menunjukkan bahwa sistem PV/T praktis dan efisien. Namun, masih ada banyak energi yang masuk yang diserap sebagai panas atau dipantulkan, yang mengarah pada peningkatan temperatur kerja sel *Photovoltaic* (PV) dan penurunan efisiensi listrik. Untuk meningkatkan kinerja *Photovoltaic* (PV), banyak desain *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang telah diusulkan. Efisiensi listrik dan efisiensi termal yang lebih baik dapat dicapai dengan kontak termal yang baik antara penyerap termal dan modul *Photovoltaic* (PV).

Efisiensi termal pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) berguna untuk mengetahui seberapa besar panas yang mampu dipindahkan dari kolektor pada *Photovoltaic* (PV) terhadap maksimum radiasi yang dipancarkan ke permukaan *Photovoltaic* (PV). Untuk mendapatkan efisiensi termal dari sistem *Photovoltaic-Thermal*, digunakan persamaan berikut:

$$\eta_{th,PV} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{f,in} - T_{f,out})}{G \cdot A_{PV}} \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana:

- $\eta_{th,PV}$ = Efisiensi termal *Photovoltaic* (%)
- \dot{m} = Laju aliran massa fluida (kg/s)
- $T_{f,in}$ = Temperatur fluida masuk (K)
- $T_{f,out}$ = Temperatur fluida keluar (K)
- G = Irradiasi (W/m²)
- A_{PV} = Luas permukaan *Photovoltaic* (m²)

Perhitungan efisiensi termal ini penting untuk mengevaluasi kinerja sistem PV/T secara keseluruhan dan untuk mendapatkan informasi tentang berapa banyak energi termal yang dapat dipindahkan dari kolektor ke dalam sistem. Dengan menggunakan persamaan tersebut, kita dapat menentukan seberapa efisien sistem PV/T dalam menghasilkan energi listrik dan panas dari sumber energi matahari. Kemudian pada suatu *Photovoltaic* dalam pengujian secara *Thermal* (PV/T) dihasilkan arus, tegangan, dan daya. Dalam hal tersebut didapatkan efisiensi dari *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yaitu:

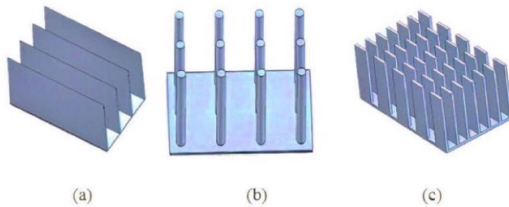
$$\eta_{el,PV} = \frac{V_{PV} \cdot I_{PV}}{G \cdot A_{PV}} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana:

- $\eta_{el,PV}$ = Efisiensi elektrik *Photovoltaic* (%)
- V_{PV} = Tegangan yang dihasilkan *Photovoltaic* (Volt)
- I_{PV} = Arus yang dihasilkan *Photovoltaic* (A)
- G = Irradiasi (W/m²)
- A_{PV} = Luas permukaan *Photovoltaic* (m²)

2.6 Heatsink/Absorber

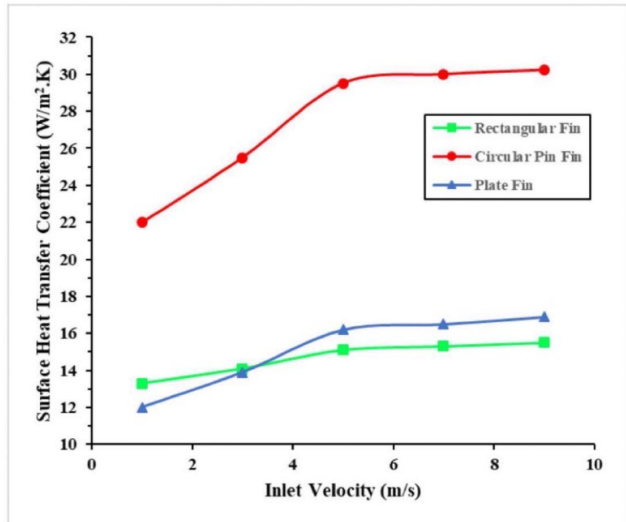
Heatsink/Absorber adalah alat untuk menyerap atau membuang panas secara efektif (energi panas) dari lingkungan sekitar (udara) menggunakan permukaan yang diperluas seperti sirip dan duri. *Heatsink/Absorber* digunakan dalam berbagai aplikasi di mana pembuangan panas yang efisien diperlukan. Kinerja pendinginan pasif biasanya ditingkatkan dengan menggunakan *heatsink*. Pada material sirip standar yaitu aluminium, nilai konduktivitas termal bahannya adalah $207 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Berbagai desain *heatsink* dapat memiliki karakteristik termal yang berbeda (Khor dkk., 2021).



Gambar 2.11 (a) *Rectangular heatsink*, (b) *Circular fins heatsink*, (c) *Cross-cut plate fins heatsink*

(Sumber: Khor dkk., 2021)

Sirip pada heatsink secara luas dianggap sebagai metode utama perpindahan panas untuk permukaan yang dipanaskan di lingkungan sekitar. Peningkatan luas kontak perpindahan panas dan turbulensi aliran fluida dapat meningkatkan efisiensi termal dan elektrik. Dengan menambahkan heatsink dengan sirip yang cukup pada sistem *Photovoltaic*, maka sistem tersebut menjadi *Photovoltaic-Thermal (PV/T)*. Fungsi dari penambahan sirip pada desain heatsink adalah bertujuan untuk mengacaukan aliran udara yang melewatinya sehingga aliran udara menjadi turbulen dan akan meningkatkan koefisien dari perpindahan panas (Khor dkk., 2021).



Gambar 2.12 Perbandingan koefisien perpindahan panas jenis *fins*
(Sumber: Khor dkk., 2021)

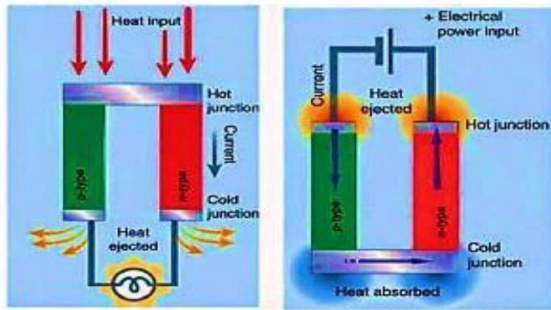
Gambar 2.12 menunjukkan koefisien perpindahan panas untuk tiga jenis *heatsink*. *Heatsink* dengan sirip bundar menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan panas dengan meningkatnya kecepatan fluida masuk. Namun, *heatsink* dengan sirip persegi panjang dan lubang-lubang potong menunjukkan koefisien perpindahan panas terendah setelah kecepatan fluida mencapai 4 m/s, yang mungkin disebabkan oleh jarak antar sirip yang terlalu kecil. Saluran udara yang sempit telah membatasi aliran udara melalui sirip pada *heatsink* tersebut. Dari Gambar 2.12 dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kecepatan aliran udara masuk, koefisien perpindahan panas permukaan meningkat, sehingga meningkatkan perpindahan panas konveksi fluida dan akhirnya menurunkan temperature (Khor dkk., 2021).

2.7 *Thermoelectric* (TE)

Thermoelectric merupakan fenomena yang mengkonversi perbedaan temperatur menjadi energi listrik atau sebaliknya, dari energi listrik menjadi perbedaan temperatur. Fenomena ini telah dikembangkan menjadi modul sehingga dapat digunakan sebagai pembangkit listrik atau perangkat pendingin/pemanas. Modul *Thermoelectric* terdiri dari susunan 2N pellet dari material semikonduktor yang berbeda (tipe-P dan tipe-N) menjadi pasangan *Thermoelectric* N yang dihubungkan secara termal dan listrik, yaitu paralel dan seri. Jenis semikonduktor tipe-P cenderung kekurangan elektron dan tipe-N cenderung kelebihan elektron. Sumber panas akan masuk dari sisi panas modul kemudian ditolak ke sisi dingin. Semakin baik pendinginannya, maka listrik yang dihasilkan semakin besar (Rafika dkk., 2016).

Sejarah fenomena *Thermoelectric* bermula pada tahun 1821, ketika ilmuwan asal Jerman bernama Thomas Johann Seebeck melakukan percobaan dengan menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian, lalu diletakkan sebuah jarum kompas di antara kedua logam tersebut. Saat sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata bergerak. Fenomena ini terjadi karena adanya aliran listrik pada logam, yang menghasilkan medan magnet yang membuat jarum kompas bergerak. Efek ini kemudian dikenal dengan nama efek *Seebeck* (Rafika dkk., 2016).

Efek *Peltier* terjadi jika dua logam yang berbeda disambungkan pada arus listrik (DC), maka fenomena yang terjadi yaitu perbedaan kalor yang pada prinsip ini yang disebut dengan *Thermoelectric* sebagai pendingin/pemanas. Efek *Seebeck* yaitu jika terjadi perbedaan temperatur diantara kedua sambungan, maka akan terjadi arus listrik. Pada prinsip ini disebut dengan *Thermoelectric Generator* (pembangkit listrik). Semakin besar beda temperatur (koefisien *Seebeck*) maka beda potensial listrik yang dihasilkan juga semakin besar (Rafika dkk., 2016).



Gambar 2.13 Efek Seebeck dan Peltier pada *Thermoelectric* (TE)
 (Sumber: Rafika dkk., 2016)

Parameter yang digunakan untuk mengukur kesesuaian material *Thermoelectric* disebut dengan *figure of merit* (Z). Untuk menghasilkan keadaan yang optimal, sebuah *Thermoelectric* haruslah memiliki kemampuan untuk memompa panas yang baik. *Figure of merit* menunjukkan seberapa baik kualitas sebuah *Thermoelectric* dalam memompa panas. Nilai *figure of merit* tergantung pada temperatur. Semakin tinggi nilai *figure of merit* semakin baik pula kualitas sebuah *Thermoelectric* yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Z = \frac{2 \cdot (T_{hot} - T_{cold})}{(T_{hot} - (T_{hot} - T_{cold}))^2} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.13)}$$

Dimana:

- Z = *figure of merit*, ($1/^\circ\text{C}$)
- T_{hot} = Temperatur sisi panas ($^\circ\text{C}$)
- T_{cold} = Temperatur sisi dingin ($^\circ\text{C}$)

Kemudian untuk mendapatkan nilai dari efisiensi dalam suatu *Thermoelectric* digunakan persamaan, yaitu:

$$\eta_{TE} = \frac{P_{TE}}{Q_h} = \frac{\Delta T}{T_{hot}} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.14)}$$

Dimana:

η_{TE} = Efisiensi *Thermoelectric* (%)

P_{TE} = Daya elektrik (Watt)

Q_h = Laju perpindahan panas memasuki permukaan panas
(Watt)

ΔT = Perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$) = $T_{hot} - T_{cold}$

T = Temperatur rata-rata ($^{\circ}\text{C}$) = $\frac{T_{hot} - T_{cold}}{2}$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian yang dilakukan oleh penulis dalam tempat dan waktu pelaksanaan meliputi berikut:

3.1.1 Tempat Penelitian

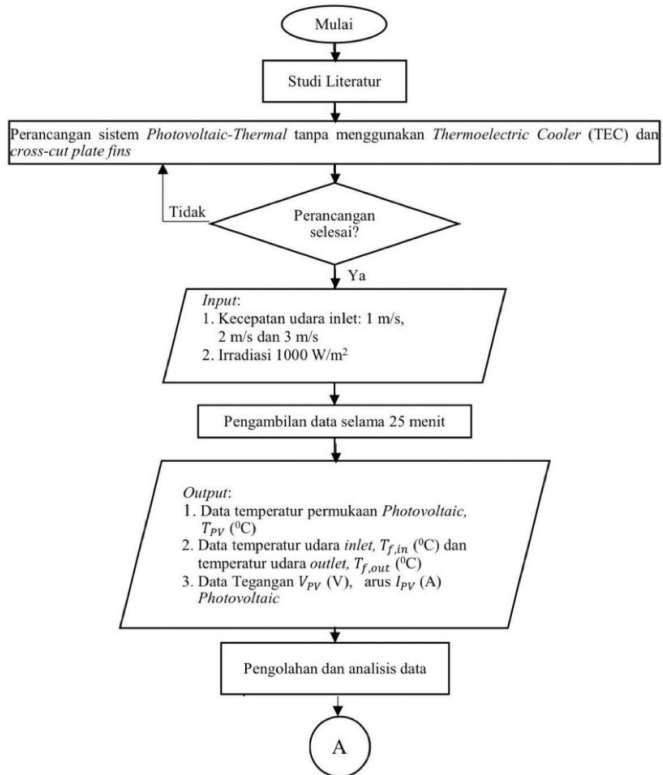
Adapun tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

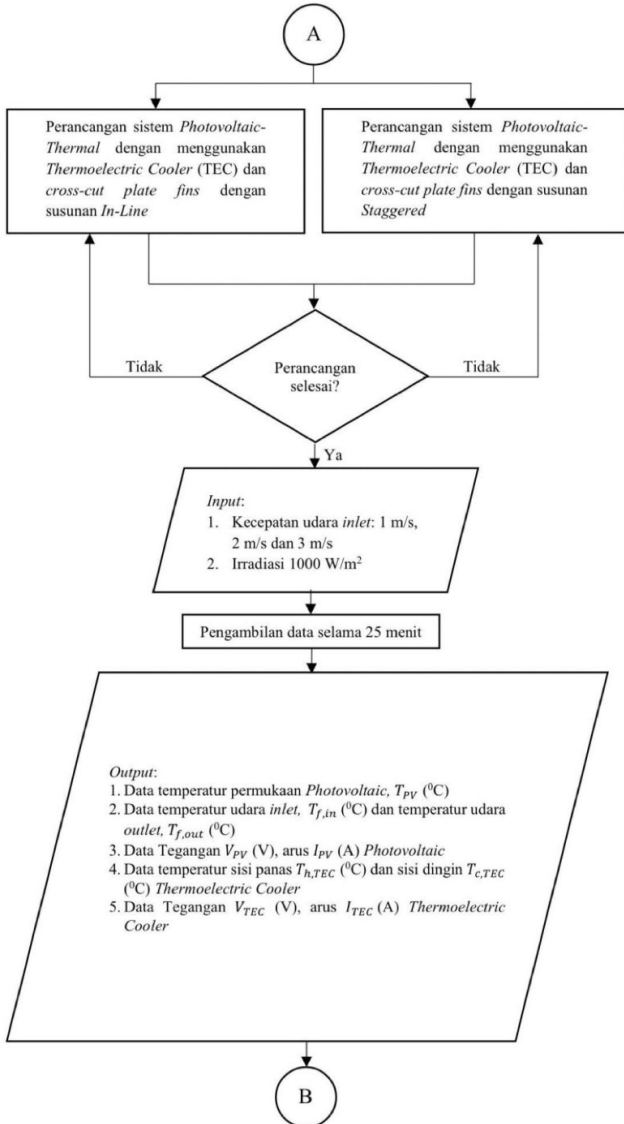
3.1.2 Waktu Penelitian

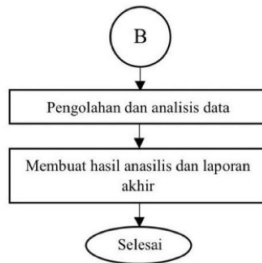
Penelitian dilakukan pada periode tanggal 20 Januari 2023 hingga 26 Juli 2023.

3.2 Diagram Alur Penelitian

Dibawah ini merupakan diagram dari alur penelitian yang dilaksanakan penulis pada Gambar 3.21. berikut.







Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

3.3 Alat dan Bahan

Berikut merupakan alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. *Solar Power Meter* SPM-1116 SD

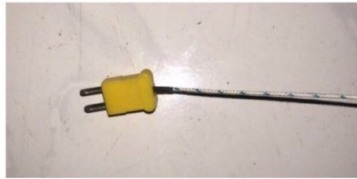
Gambar 3.2. menunjukkan *Solar Power Meter* SPM-1116 SD digunakan sebagai alat yang mengukur besar radiasi yang dipancarkan lampu halogen ke permukaan modul *Photovoltaic* (PV). Satuan yang diberikan yaitu W/m^2 . Spesifikasi alat ini dapat menyimpan data hingga 16 GB dengan respon *spectral* 400-1100 nm dengan akurasi pembacaan 5%.



Gambar 3.2 *Solar Power Meter* SPM-1116 SD

2. *Thermocouple*

Seperti yang terlihat pada Gambar 3.3. *thermocouple* yang berfungsi untuk mengukur temperatur yang terjadi pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T), seperti *Thermoelectric Cooler*, *heatsink*, fluida *inlet* dan *outlet*. Spesifikasi dari *thermocouple* ini dapat mengukur temperatur dengan besar $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan bertipe “K”.



Gambar 3.3 *Thermocouple*

3. MPPT *Tristar TS-45*

Terlihat pada Gambar 3.4. MPPT *Tristar TS-45* ini berfungsi sebagai alat yang digunakan mengontrol listrik yang dihasilkan oleh modul *Photovoltaic* (PV). Alat ini membaca kuat arus dan tegangan yang dihasilkan dari *Photovoltaic* (PV) serta data yang didapatkan dari aki dan merekam dengan cara menghubungkan antara alat dan aplikasi *software* MSView. Seperti yang tertampil pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 MPPT *Tristar TS-45*

4. *Temperature Recorder*

Terlihat pada Gambar 3.5. *Temperature recorder* digunakan sebagai alat yang merekam ukuran temperatur yang terjadi pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T). Alat yang digunakan dengan merek Luntun BTM-420 SD yang dapat merekam data temperatur hingga 12 data.



Gambar 3.5 *Temperature Recorder* Luntun BTM-420 SD

5. *Multitester*

Multitester ini dengan model Krisbow KW06-276 yang digunakan untuk mengukur besaran listrik seperti kuat arus, voltase, hambatan atau beban dan lain sebagainya. Seperti yang ditampilkan Gambar 3.6.



Gambar 3.6 *Multitester* Krisbow KW06-276

6. *Anemometer*

Terlihat Gambar 3.7. *Anemometer* ini digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang mengalir masuk ke dalam sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan model LM-8000A. Spesifikasi alat ini bias mengukur kelembapan 10% hingga 95%, pengukuran kecepatan udara 0,4 m/s hingga 30 m/s. Alat ini juga bisa mengukur cahaya dan temperatur.



Gambar 3.7 *Anemometer* LM-8000A

7. *Aki*

Aki digunakan untuk menyimpan daya yang dihasilkan dari sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T). Aki ini memiliki model No. LC-V127R2N41. Aki yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan 12 V, 7,2 Ah / 20HR. Berikut Gambar 3.8. aki yang digunakan.



Gambar 3.8 Aki No. LC-V127R2N41

8. *Poly-crystalline Photovoltaic*

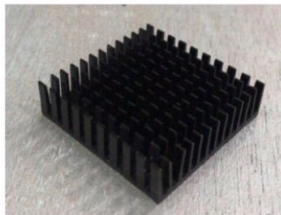
Jenis *Photovoltaic* yang digunakan adalah *Poly-crystalline* dengan dimensi modul sebesar 1020 mm x 670 mm x 30 mm dengan besar daya 100 Wp. Tegangan maksimal sebesar 18,3 V dan kuat arus maksimal 5,49 A. Tertampil pada Gambar 3.9, jenis *Photovoltaic*.



Gambar 3.9 *Poly-crystalline Photovoltaic*

9. *Cross-Cut Plate Fins Heatsink*

Terlihat Gambar 3.10, *cross-cut plate fins* adalah *heatsink* bahan yang digunakan untuk meningkatkan turbulensi dari aliran udara pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dan terjadinya daya penyerapan panas. *Heatsink* ini dibuat dari material Aluminium dengan dimensi 40 mm x 40 mm x 11 mm.



Gambar 3.10 *Cross-cut plate fins heatsink*

10. *Thermoelectric Cooler (TEC)*

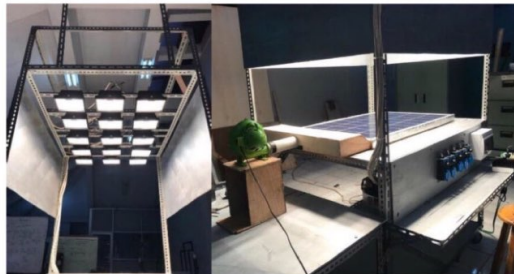
Thermoelectric Cooler (TEC) merupakan suatu modul pembangkit yang digunakan untuk mendinginkan pelat pada *Photovoltaic (PV)* dengan bagian panas dan dingin pada dua permukaan yang berbeda. *Thermoelectric Cooler (TEC)* ini memiliki model TEC1-12706 berdimensi 40 mm x 40 mm x 3,6 mm. TEC ini memiliki spesifikasi 0-15,4 VDC dan 0-6,4 A dengan maksimum daya konsumsi 60 Watt. Terlihat pada Gambar 3.11. jenis *Thermoelectric Cooler* yang dipakai.



Gambar 3.11 *Thermoelectric Cooler (TEC1-12706)*

11. *Solar Simulator*

Solar Simulator menggunakan lampu halogen yang terlihat pada Gambar 3.12. sebagai pengganti dari pancaran irradiansi matahari dengan besar 1000 W/m^2 . Lampu Halogen berjumlah 15 buah secara tersusun. Masing-masing lampu memiliki daya sebesar 500Watt, 220 V.



Gambar 3.12 *Solar Simulator*

12. *Blower*

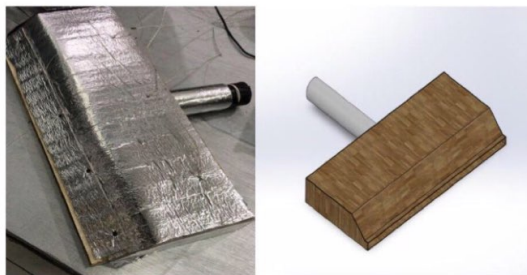
Blower yang digunakan terlihat pada gambar 3.13. dengan model SUM-2,5" berjumlah dua buah. Spesifikasi dari *blower* ini memiliki tegangan 220 V, kuat arus maksimal 1,6 A cycles 50/60 dan RPM 3000/3600 yang digunakan untuk mengalirkan udara masuk kedalam sistem *Photovoltaic* (PV).



Gambar 3.13 *Blower* SUM-2,5"

13. Saluran Udara

Saluran udara berfungsi untuk meneruskan angin yang dihasilkan *blower* kedalam sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T). alat ini dibuat dengan pipa PVC 2,5 in yang dipasangkan dengan keran yang berguna mengatur kecepatan udara yang melaju. Kemudian disambungkan dengan potongan triplek yang berbentuk persegi. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Saluran Udara

14. Kipas Angin

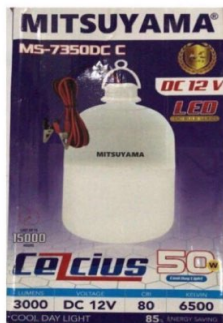
Kipas angin berguna untuk mengatur temperatur pada permukaan dari *Photovoltaic* (PV) dengan meneruskan udara ke permukaannya. Kipas angin yang digunakan adalah model MT-1882 (18 *inch*) seperti pada Gambar 3.15 dengan daya 70 Watt dan tegangan 220 V-AC/50 Hz.



Gambar 3.15 Kipas Angin

15. Lampu Beban DC

Pada Gambar 3.16, terlihat lampu beban yang digunakan pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) adalah 50 Watt. Spesifikasi dari beban yang digunakan yaitu 12 V.



Gambar 3. 16 Lampu beban DC LED 50 Watt

16. Pasta Termal

Pasta termal yang digunakan bermerk GD900 yang digunakan untuk merekatkan antara permukaan *Thermoelectric Cooler* (TEC), *cross-cut plate fins* dan juga *Photovoltaic* (PV). Pasta termal ini memiliki nilai konduktivitas sebesar 4,8 W/m.K dengan SG 2,3 g/cm³. Pasta termal yang digunakan terlihat pada gambar 3.17.



Gambar 3. 17 Pasta termal GD-900

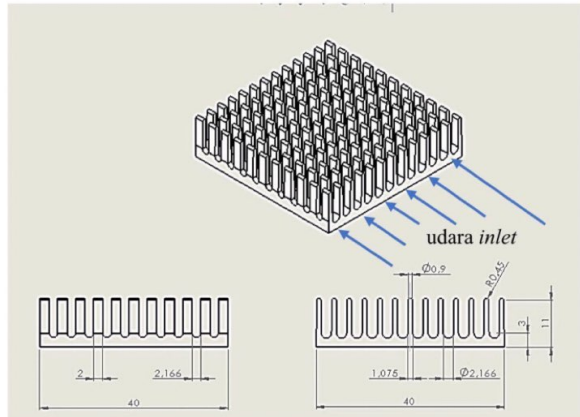
3.4 Prosedur Penelitian

Adapun dalam proses penelitian ini adalah desain dari *heatsink* yang digunakan pada bagian sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T), Susunan dari *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *heatsink* pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T), serta saluran udara yang berlangsung pada *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) untuk menguji penelitian yang berlangsung pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan uraian berikut ini.

3.3.1 *Heatsink* yang digunakan Sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T)

Heatsink yang digunakan sebagai *absorber* pada sistem *Photovoltaic-Thermal* adalah *cross-cut plate fins* yang diletakkan di bagian bawah *Thermoelectric Cooler* (TEC). *Heatsink* ini memiliki dimensi panjang

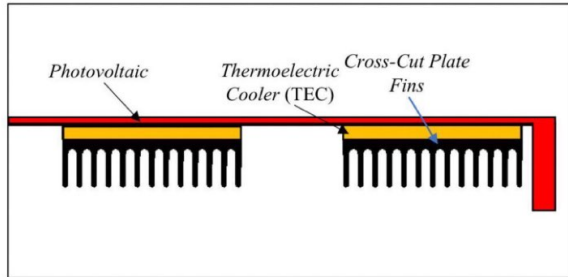
dan lebar 40 mm x 40 mm serta tinggi 30 mm. Material *heatsink* ini terbuat dari Aluminium dengan konduktivitas 222,706 Watt/m.⁰C dan massa 25 g. Pada bagian *heatsink* terdapat 143 sirip kecil dengan dimensi pada Gambar 3.18. berikut.



Gambar 3.18 Dimensi *cross-cut plate fins heatsink*

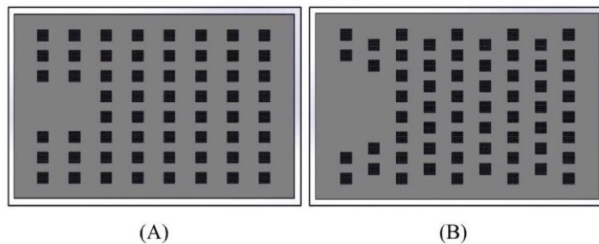
3.3.2 Penempatan dan Susunan *Heatsink* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC)

Penempatan dari sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dilakukan dengan meletakkan *Thermoelectric Cooler* (TEC) di bawah backsheet pelat dari *Photovoltaic* (PV). Kemudian, *cross-cut plate fins* diletakkan pada bagian atas *Thermoelectric Cooler* (TEC1-12706), seperti yang terlihat pada Gambar 3.19 berikut.



Gambar 3.19 Susunan sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T)

Susunan pada bagian *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC1-12706) memiliki 2 variasi susunan yaitu susunan *In-Line* dan *Staggered*. Pada susunan *In-Line* memiliki jumlah masing-masing *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *cross-cut plate fins* adalah 60 buah sedangkan *Staggered* berjumlah 61 buah.

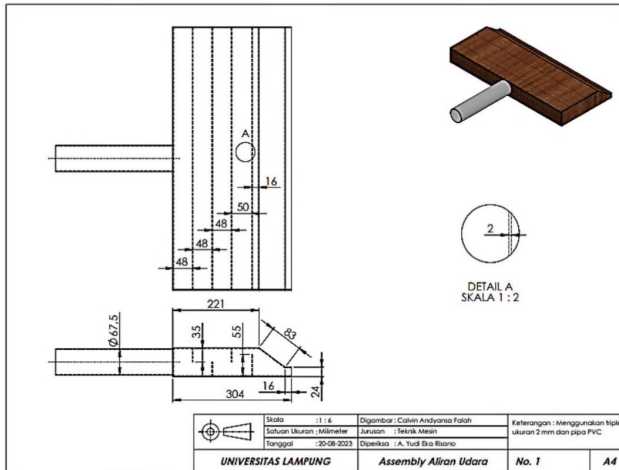


Gambar 3.20 Susunan (A) *In-Line*, (B) *Staggered*

Jarak antar *Thermoelectric Cooler* dan *cross-cut plate fins* ditentukan berdasarkan jumlah ketersediaan dari *Thermoelectric Cooler* dan *cross-cut plate fins* yaitu secara total adalah 61 buah. Kemudian, berdasarkan motif susunannya akan dibagi perluasan dari *Photovoltaic*. Susunan *Thermoelectric Cooler* dan *cross-cut plate fins* seperti yang terlihat pada gambar 3.20.

3.3.3 Saluran Udara pada Sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T)

Saluran udara menggunakan pipa yang menghubungkan antara *blower* dan ruang perluasan yang dibuat menggunakan triplek dengan bagian *baffles* didalamnya. *Baffles* tersebut digunakan pada saluran udara untuk mengatur penyebaran udara yang ditargetkan merata sekaligus membuat batasan kecepatan udara berada di *range* 1-3 m/s yang berlangsung menuju sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T). Pipa dan triplek tersebut dilapisi dengan insulasi Aluminium untuk menahan panas dari luar. *Baffle* yang diberikan berjumlah 4 dengan 3 ketinggian lebih rendah dan 1 terakhir lebih tinggi berfungsi untuk penyebaran udara agar lebih merata seperti pada Gambar 3.21. berikut.



Gambar 3.21 Struktur saluran udara sistem *Photovoltaic-Thermal*

3.3.4 Pengujian *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan Kombinasi *Absorber Cross-Cut Plate Fins Heatsink* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC)

Pengujian *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC) dilakukan dengan variasi kecepatan udara *inlet* kedalam sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) berdasarkan standar EN12975-2. Berikut standar EN-12975-2:2006.

Tabel 3.1 Variasi berdasarkan EN-12975-2:2006 untuk sistem PV/T (Vivar dkk., 2012)

Test title	Test condition	Variation proposed for hybrid PV-thermal systems
High temperature resistance	Solar irradiance > 1000 W/m ² in the plane of the solar collector. Ambient temperature between 20 and 40°C. Wind speed < 1 m/s. No fluid in the absorber	Define a maximum temperature in the absorber according to the materials in the PV receiver; or Include fluid circulation
Exposure	30 days with a minimum irradiation of 14 MJ/m ² per day. 30h of at least 850 W/m ² with ambient temperature > 10°C. No fluid inside the absorber	Include fluid circulation
External thermal shock	Initial exposure for 1h at high irradiance (> 850 W/m ²), with no fluid inside. Water spray for 15 min	Include fluid circulation; or Redefine the test according to the CPV characteristics, Intermittent shadows (clouds) produce thermal shock
Internal thermal shock	Initial exposure for 1h at high irradiance (> 850 W/m ²), with no fluid inside. Fluid circulated till the absorber temperature drops below 50°C.	Include fluid circulation and redefine the test including large fluid temperature changes below the maximum of the materials

Adapun tahapan pengujian yang dilakukan pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T):

1. Percobaan tanpa *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *Cross-Cut Plate Fins Heatsink*
 - a) Melakukan pengukuran irradiansi (G) pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang diberikan *solar*

simulator menggunakan *solar power meter* dengan besar 1000 W/m^2 .

- b) Mengukur temperatur ruangan ($T_{ambient}$) pada Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- c) Mengukur temperatur permukaan pada bagian *Photovoltaic* (PV), (T_{PV}).
- d) Mengukur dan mengatur kecepatan udara *inlet* rata-rata sebagai variasi 1 m/s , 2 m/s , 3 m/s (v_{in}) dan temperatur udara *inlet* ($T_{f,in}$) serta *outlet* ($T_{f,out}$).
- e) Mengukur luas penampang saluran udara masuk (A) untuk menghitung laju aliran massa udara (\dot{m}) dengan densitas udara $1,293 \text{ kg/m}^3$ dan panas spesifik rata-rata 1005 J/kg.K .
- f) Mengukur tegangan (V_{PV}), arus (I_{PV}), dan menghitung daya *Photovoltaic* (P_{PV}) dengan Tristar TS-45.
- g) Menghitung panas hilang pada (\dot{Q}_{PV}) *Photovoltaic-Thermal* (PV/T).
- h) Menghitung efisiensi termal ($\eta_{th,PV}$) dan efisiensi elektrik ($\eta_{el,PV}$) pada *Photovoltaic-Thermal* (PV/T).
- i) Mengolah data hasil yang diperoleh pengujian

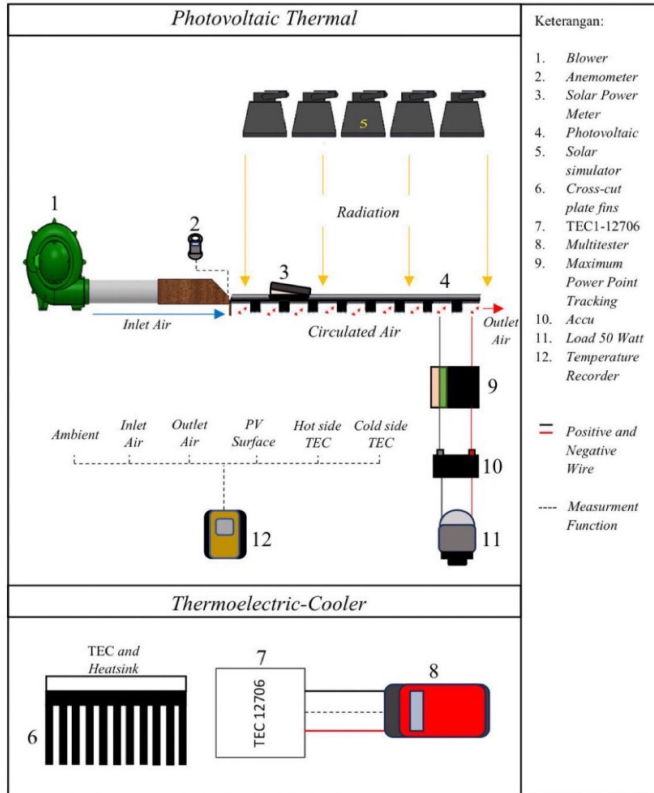
2. Percobaan dengan *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *Cross-Cut Plate Fins Heatsink* susunan *In-Line* dan *Staggered*

- a) Melakukan pengukuran irradiansi (G) pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang diberikan *solar simulator* menggunakan *solar power meter* dengan besar 1000 W/m^2 .
- b) Mengukur temperatur ruangan ($T_{ambient}$) pada Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.
- c) Mengukur temperatur permukaan pada bagian *Photovoltaic* (PV), (T_{PV}).

- d) Mengukur dan mengatur kecepatan udara *inlet* rata-rata sebagai variasi 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s (v_{in}) dan temperatur udara *inlet* ($T_{f,in}$) serta *outlet* ($T_{f,out}$).
- e) Mengukur temperatur pada bagian permukaan panas (T_{hot}) dan bagian dingin (T_{cold}) *Thermoelectric Cooler* (TEC).
- f) Mengukur luas penampang saluran udara masuk (A) untuk menghitung laju aliran massa udara (\dot{m}) dengan densitas udara 1,293 kg/m³ dan panas spesifik rata-rata 1005 J/kg.K.
- g) Mengukur tegangan (V_{PV}), arus (I_{PV}), dan menghitung daya *Photovoltaic* (P_{PV}) dengan Tristar TS-45.
- h) Menghitung panas hilang pada (\dot{Q}_{PV}) *Photovoltaic-Thermal* (PV/T).
- i) Menghitung efisiensi termal ($\eta_{th,PV}$) dan efisiensi elektrik ($\eta_{el,PV}$) pada *Photovoltaic-Thermal* (PV/T).
- j) Mengukur tegangan (V_{TE}), arus (I_{TE}), dan menghitung daya (P_{TE}) pada *Thermoelectric Cooler* (TEC) dengan *multitester*.
- k) Menghitung efisiensi (η_{TE}) pada *Thermoelectric* (TEC)
- l) Mengolah data hasil yang diperoleh selama pengujian

3.5 Skema Penelitian

Berikut ini pada Gambar 3.22. merupakan skema dari penelitian sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang akan diuji.



Gambar 3.22 Skema rangkaian pengujian *Photovoltaic Thermal* (PV/T)

BAB V PENUTUP

5.1 Simpulan

Dalam rangka penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan penting berdasarkan analisis sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC):

1. Kombinasi *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC) pada sistem PV/T berhasil meningkatkan efisiensi termal. Susunan *Staggered* lebih efektif dalam menurunkan suhu dibandingkan *In-Line*, dan kecepatan udara yang tinggi juga berkontribusi pada efisiensi termal yang lebih baik. Efisiensi termal tertinggi dicapai pada kecepatan udara 3 m/s, dengan efisiensi termal sebesar 75,77% untuk susunan *Staggered* dan 74,91% untuk susunan *In-Line*. Tegangan elektrik tertinggi yang dihasilkan susunan *Staggered* pada kecepatan yang sama yaitu 17,95 Volt pada susunan *In-Line* dan 17,29 Volt pada susunan *Staggered*.
2. Susunan *Staggered* memberikan penurunan suhu permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan susunan *In-Line* pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *absorber cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC). Pada kecepatan udara 1 m/s, susunan *Staggered* menurunkan suhu permukaan menjadi 60,65°C, sedangkan susunan *In-Line* menurunkan suhu permukaan menjadi 61,18°C. Kemudian, pada kecepatan udara 2 m/s, susunan *Staggered* menurunkan suhu permukaan menjadi 58,75°C, sedangkan susunan *In-Line* menurunkan suhu permukaan menjadi 59,46°C. Lalu, pada kecepatan

udara 3 m/s, susunan *Staggered* menurunkan suhu permukaan menjadi 57,73°C, sedangkan susunan *In-Line* menurunkan suhu permukaan menjadi 58,57°C. Oleh karena itu, susunan *Staggered* dapat dianggap sebagai susunan terbaik untuk mencapai penurunan suhu permukaan yang lebih efektif.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan kombinasi *cross-cut plate fins* dan *Thermoelectric Cooler* (TEC).

1. Mengintegrasikan teknologi kontrol otomatis, seperti *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan oleh sistem PV/T dengan memaksimalkan efisiensi listrik dalam berbagai kondisi operasional.
2. Mengganti penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) dengan *Thermoelectric* yang lebih memiliki efisiensi lebih tinggi.
3. Memperhitungkan pendekatan dengan menggunakan teori dan rumus untuk menentukan luas dari *heatsink* yang digunakan untuk memperkirakan kebutuhan luas yang optimal dalam perpindahan panas konveksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrizal, Putra, C. C., Nugroho, Amrul. (2019). Pengaruh Variasi Temperatur Fluida Masuk Terhadap Unjuk Kerja Kolektor Surya *Hybrid Pv-T*. *Jurnal Mechanical*, 10(2), 49-53.
- Arifin, Z., Tjahjana, D. D. D. P., Hadi, S., Rachmanto, R. A., Setyohandoko, G., & Sutanto, B. (2020). Numerical and experimental investigation of air cooling for photovoltaic panels using aluminum heat sinks. *International Journal of Photoenergy*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1574274>
- Carlo, D. A., Lamanna, E., & Nia, N. Y. (2014). Photovoltaics. Dalam *Ecohouse* (hlm. 171–202). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202024600005>
- Fterich, M., Chouikhi, H., Sandoval-Torres, S., Bentaher, H., Elloumi, A., & Maalej, A. (2021). Numerical simulation and experimental characterization of the heat transfer in a PV/T air collector prototype. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101209>
- Geretschläger, K. J., Wallner, G. M., & Fischer, J. (2016). Structure and basic properties of photovoltaic module backsheets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.060>
- Hadi, S., Setyawan, H., Valeria, S. S. M., Muzakki, M., Nurhadi, N., Emzain, Z. F., & Nugraha, A. A. (2021). PENGARUH PENDINGINAN MENGGUNAKAN SIRIP TERHADAP PERFORMA PANEL SURYA. *ELEMEN: JURNAL TEKNIK MESIN*, 8(1), 01. <https://doi.org/10.34128/je.v8i1.139>

- Harahap, P. (2020). Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan Dari Berbagai Jenis Sel Surya. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 2(2), 73-80. <https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.4420>
- Hari Purwoto, B., Alimul, M. F., & Fahmi Huda, I. (2018). *EFISIENSI PENGGUNAAN PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF*.
- Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (2019). Development and applications of photovoltaic–thermal systems: A review. Dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 102, hlm. 249–265). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.030>
- Julisman, A., Sara, I. D., Siregar, R. H., Elektro, J. T., & Komputer, D. (2017). *PROTOTIPE PEMANFAATAN PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI PADA SISTEM OTOMASI ATAP STADION BOLA*. 2(1), 35–42.
- Khor, C. Y., Rosli, M. U., Nawi, M. A. M., Kee, W. C., & Ramdan, D. (2021). Influence of inlet velocity and heat flux on the thermal characteristic of various heat sink designs using CFD analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2051(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012013>
- Maulana Ibrahim, K., & Slamet, P. (2020). PEMBANGKIT TENAGA SURYA MENGGUNAKAN RANCANGAN PANEL SURYA HYBRID DENGAN THERMOELECTRIC GENERATOR. *Jurnal Teknik Elektro*
- Rafika, H., Iman Mainil, R., & Azridjal Aziz. (2016). KAJI EKSPERIMENTAL PEMBANGKIT LISTRIK BERBASIS THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG) DENGAN PENDINGINAN MENGGUNAKAN UDARA. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 15(1), 7–11. <http://wiwinsndrtermodinamika.blogspot.co.id/2015>
- Reddy, S. R., Ebadian, M. A., & Lin, C. X. (2015). A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling. Dalam *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Vol. 91, hlm. 861–871). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.134>

- Sajjad, U., Amer, M., Ali, H. M., Dahiya, A., & Abbas, N. (2019). Cost effective cooling of photovoltaic modules to improve efficiency. *Case Studies in Thermal Engineering*, *14*. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100420>
- Siswanto, Joko. (2019). Indonesia Energy Outlook. Jakarta: *Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral*. <https://www.esdm.go.id/id/publikasi/indonesia-energy-outlook>
- Vivar, M., Clarke, M., Pye, J., & Everett, V. (2012). A review of standards for hybrid CPV-thermal systems. Dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Nomor 1, hlm. 443–448). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.008>
- Vorobiev, Y., González-Hernández, J., Vorobiev, P., & Bulat, L. (2006). Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. *Solar Energy*, *80*(2), 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.022>
- Yonanda, A., Riszal, A., & Ibrahim, F. (2022). Photovoltaic (PV) thermal performance simulation using segmentation lapping fin passive cooling. *Desiminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, *20*(2), 2022. <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Yu, Y., Yang, H., Peng, J., Long, E. (2019). Performance comparisons of two flat-plate photovoltaic thermal collectors with different channel configurations. *Energy*, *175*, 300–308. <https://doi:10.1016/j.energy.2019.03.054>
- Yuliananda, S., Sarya, G., & Retno Hastijanti, R. (2015). PENGARUH PERUBAHAN INTENSITAS MATAHARI TERHADAP DAYA KELUARAN PANEL SURYA. Dalam *Jurnal Pengabdian LPPM Untag Surabaya Nopember* (Vol. 01, Nomor 02).
- Zhu, W., Deng, Y., Wang, Y., Shen, S., & Gulfam, R. (2016). High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management. *Energy*, *100*, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.055>