

SIMULASI CFD UNJUK KERJA KOLEKTOR *FLOATING PHOTOVOLTAIC (FPV)* MENGGUNAKAN SIRIP *CROSS-CUT*

(Skripsi)

Oleh:

SULTHAN MUHAMMAD ALFARISI

2115021085



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

SIMULASI CFD UNJUK KERJA KOLEKTOR FLOATING PHOTOVOLTAIC (FPV) MENGGUNAKAN SIRIP CROSS-CUT

Oleh:

SULTHAN MUHAMMAD ALFARISI

Salah satu kelemahan sel fotovoltaik (PV) ialah memiliki efisiensi yang lebih rendah seiring dengan meningkatnya temperatur operasi. Metode pendinginan yang banyak digunakan untuk mengatasi masalah ini adalah dengan meningkatkan luas permukaan di bawah sel menggunakan *heatsink* dan menggunakan sistem *floating*, yang membantu meningkatkan pembuangan panas, dan menjaga temperatur operasi yang ideal. Dalam bidang ini, metode komputasi dinamika fluida (*CFD*) telah menjadi populer karena metode ini menyediakan cara yang ekonomis untuk mengurangi waktu penelitian, biaya, dan penggunaan material.

Penelitian ini menggunakan metode simulasi *CFD* untuk mengevaluasi kinerja *floating photovoltaic (FPV)*, dengan fokus pada efek kecepatan udara, radiasi matahari, temperatur air, temperatur lingkungan, ketinggian pv terhadap air, dan bahan sirip pendingin untuk mengidentifikasi parameter operasi yang optimal. Sirip-sirip *cross-cut* disatukan dan diposisikan sebaris di bawah sel FPV untuk meningkatkan efektivitas pendinginan lebih lanjut. Simulasi bertujuan menganalisis unjuk kerja termal sistem sel FPV dalam berbagai kombinasi parameter menggunakan model *CFD* dua dimensi berdasarkan metode volume hingga (FVM).

Ketika dibandingkan dengan sistem sel PV tradisional, sistem FPV yang dilengkapi sirip pendingin menunjukkan peningkatan kinerja termal yang signifikan. Penurunan temperatur sel FPV dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti temperatur air dan temperatur lingkungan, bahan sirip pendingin, serta jarak antara panel PV dan permukaan air. Selain itu, kecepatan udara turut berperan dalam mempercepat perpindahan panas, sehingga membantu menurunkan temperatur panel PV.

Kata kunci: *Floating photovoltaic*; sirip cross-cut; simulasi *CFD*; analisis termal

ABSTRACT

CFD SIMULATION OF THE PERFORMANCE OF FLOATING PHOTOVOLTAIC (FPV) COLLECTORS WITH CROSS-CUT FINS

By:

SULTHAN MUHAMMAD ALFARISI

One of the drawbacks of photovoltaic (PV) cells is that they have lower efficiency as the operating temperature increases. The cooling methods widely used to overcome this problem are by increasing the surface area under the cell using a heatsink and using a floating system, which helps to improve heat dissipation and maintain the ideal operating temperature. In this field, computational fluid dynamics (CFD) methods have become popular because they provide an economical way to reduce research time, cost, and material usage.

This study uses CFD simulation methods to evaluate the performance of floating photovoltaic (FPV), focusing on the effects of wind velocity, solar radiation, water temperature, ambient temperature, PV height to water, and cooling fin materials to identify optimal operating parameters. Cross-cut fins are assembled and positioned in line under the FPV cell to further enhance the cooling effectiveness. The simulation aims to analyze the thermal performance of the FPV cell system in various parameter combinations using a two-dimensional CFD model based on the finite volume method (FVM).

When compared with the traditional PV cell system, the FPV system equipped with cooling fins shows significant improvements in thermal performance. The temperature reduction of FPV cells is influenced by several factors, such as water temperature and ambient temperature, cooling fin material, and the distance between the PV panel and the water surface. In addition, wind velocity also plays a role in accelerating heat transfer, thereby helping to reduce the temperature of the PV panel.

Keyword: *Floating photovoltaic, cross-cut fins, CFD simulation, thermal analysis*

SIMULASI CFD UNJUK KERJA KOLEKTOR *FLOATING PHOTOVOLTAIC (FPV)* MENGGUNAKAN SIRIP *CROSS-CUT*

Oleh

SULTHAN MUHAMMAD ALFARISI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : **SIMULASI CFD UNJUK KERJA KOLEKTOR FLOATING PHOTOVOLTAIC (FPV) MENGGUNAKAN SIRIP CROSS-CUT**

Nama : **Sulthan Muhammad Affarisi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2115021085**

Program Studi : **Strata 1 (S1)**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



Prof. Dr. Amrizal, S.T., M.T.
197002021998031004

Komisi Pembimbing 2



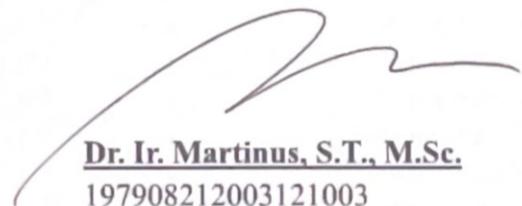
Ahmad Yonanda, S.T., M.T.
199301102019031008

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
197108171998021003

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

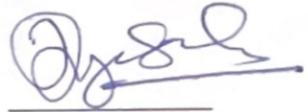
Ketua Penguji : **Prof. Dr. Amrizal, S.T., M.T.**



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



Penguji Utama : **M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **21 April 2025**

PERNYATAAN PENULIS

DENGAN INI SAYA MENYATAKAN BAHWA SKRIPSI INI SAYA BUAT DENGAN USAHA SAYA SENDIRI DAN BUKAN MERUPAKAN HASIL DARI PLAGIARISME, SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 43 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG BERDASARKAN KEPUTUSAN REKTOR NO. 02 TAHUN 2024

Bandar Lampung, 05 Mei 2025

Penulis,



SULTHAN MUHAMMAD ALFARISI

NPM. 2115021085

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Pendopo, Kab. Empat Lawang, Sumatera Selatan pada tanggal 21 Maret 2004 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan bapak Iin Hendri dan Ibu Yurniza.

Pendidikan pertama yang ditempuh penulis adalah di Taman Kanak-kanak (TK) Pertiwi Kecamatan Pendopo pada tahun 2008 dan lulus pada tahun 2009. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Dasar (SD) Negeri 02 Pendopo pada tahun 2009 dan lulus pada tahun 2015. Setelah itu, penulis melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 01 Pendopo Barat pada tahun 2015 dan lulus pada tahun 2018. Kemudian, penulis meneruskan pendidikan di Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 18 Palembang pada tahun 2018 dan lulus pada tahun 2021

Setelah lulus dari SMA Negeri 18 Palembang, penulis melanjutkan pendidikan Strata 1 di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai organisasi, antara lain Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) Fakultas Teknik dan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Penulis tercatat sebagai anggota Eksekutif Muda BEM FT periode 2021, staf BEM FT periode 2022, serta anggota HIMATEM periode 2022/2023.

Dalam perjalanan akademiknya, penulis pernah mengikuti Program Penelitian Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Universitas Lampung tahun 2023 dengan tema '**Pemanfaatan Limbah Serat TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) dan Serat Alam Lampung sebagai Bahan Komposit Katup Pompa Hydram**'. Selain itu, penulis juga mengikuti program Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) Angkatan 6 dalam kegiatan *Engineering Simulation* #Bertaji yang diselenggarakan oleh CADFEM Ansys, dengan fokus pada bidang *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Untuk memperoleh pengalaman kerja, penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik di PT. Huadian Bukit Asam Power (HBAP) pada tahun 2024 dengan mengambil judul '**Analisis Efektivitas Laju Perpindahan Kalor Aktual pada Surface Condenser N-42000-7 Unit 1 di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Mulut Tambang (MT) Sumsel-8 2X660 MW PT. Huadian Bukit Asam Power**'.

Pada tahun yang sama, penulis juga melaksanakan penelitian tugas akhir dan skripsi dengan judul '**Simulasi CFD Unjuk Kerja Kolektor *Floating Photovoltaic (FPV)* Menggunakan Sirip *Cross-Cut***', yang dibimbing oleh Bapak Prof. Dr. Amrizal, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II."

MOTTO

“Kita punya kendala, Allah punya kendali”

**“Barangsiapa yang mengerjakan kebaikan seberat zarah, niscaya dia akan
melihat (balasan)-nya”**

~(Q.S Al-Zalzalah: 7)~

“Rotasikan pandanganmu, ambil sudut yang terbaru”

~Perunggu~

**“Melamban bukanlah hal yang tabu
Kadang itu yang kau butuh, bersandar hibahkan bebanmu”**

~Perunggu~

PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah Rabbil 'Alamin,

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji dan syukur dipanjatkan ke hadirat-Nya atas segala nikmat, taufik, dan hidayah yang telah diberikan. Dengan penuh rasa syukur, karya ini penulis persembahkan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bimbingan selama penyusunan skripsi.

Penulis mempersembahkan skripsi ini kepada:

Ayahanda dan Ibunda Tercinta

In Hendri dan Yurniza

Kepada dua sosok terhebat dalam hidupku,
Terima kasih atas segala bentuk kasih sayang yang telah kalian berikan. Aku berjanji akan menjadi anak yang mampu membanggakan dan membahagiakan kalian.

Keluarga Besar

Terimakasih atas segala dukungan moril maupun materil untuk dapat menyelesaikan pendidikan di tingkat universitas sebagai Sarjana Teknik Mesin

Para guru dan dosen

Terima kasih atas kesabaran dan keikhlasannya dalam membimbing serta mengajarku

Almamater Tercinta Universitas Lampung

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan laporan skripsi ini dengan lancar. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah menuntun umat manusia menuju kehidupan yang penuh ilmu dan akhlak mulia.

Skripsi ini disusun sebagai hasil dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan. Penulis berharap karya tulis ini dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan ilmu di bidang mekanikal dan energi, khususnya dalam bidang pengembangan panel surya. Skripsi ini juga merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Penulis berharap agar karya tulis ini dapat bermanfaat dan dapat dikembangkan lebih lanjut di masa yang akan datang.

Selesainya skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, arahan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tuaku tercinta, terima kasih atas dedikasinya dan dukungan moril maupun materil serta senantiasa mendoakanku agar selalu dalam lindungan Allah SWT.
2. Tiara Ratu Sriwijaya & Claudio Muhammad G. selaku kakak dan adik kandung penulis, serta keluarga yang telah memberikan doa dan semangat kepada penulis.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.

4. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
5. Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
6. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Kepala Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
7. Bapak Prof. Dr. Amrizal, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 1 sekaligus Dosen Pembimbing Akademik yang telah bersedia membimbing dan meluangkan waktu dalam penyusunan skripsi ini.
8. Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah bersedia membimbing penulis di setiap proses simulasi CFD serta penyusunan skripsi ini.
9. Bapak M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik, masukan, dan saran dalam perbaikan penulisan skripsi ini.
10. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalaman.
11. Seluruh staff dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
12. Bang Randa Admiral, S.T. (Teknik Mesin 2016) yang banyak memberikan ilmu desain dan simulasi CFD kepada penulis.
13. Fitrotul Ummaroh yang telah memberikan semangat dan motivasi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
14. Teman-teman KKN Desa Way Tawar 2024: Galuh, Jeni, Justin, Pipit, dan Yuda, yang telah menemani dan memberikan dukungan & semangat kepada penulis selama penyusunan skripsi.
15. Abert, Bobby, Bilal, Glenn, Hussein, Josua, Rama, Riyan, Salomo, Yosafat, dan Bang Hafiz yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan bantuan selama pelaksanaan penelitian hingga penyusunan skripsi.
16. Tim tugas akhir lab Termo: Adi, Elen, dan Shifa, yang telah berjuang bersama.
17. Teman-teman Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2021. Terima kasih atas kebersamaan, keakraban, canda tawa, bantuan, serta dukungan yang telah kalian berikan selama ini

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran dari semua pihak untuk menyempurnakan karya tulis ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun pembaca secara umum. Aamiin.

Wa'alaikumsalam Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung, 05 Mei 2025

Penulis,



SULTHAN MUHAMMAD ALFARISI

NPM. 2115021085

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR NOTASI	xx
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	6
2.1 Energi Matahari.....	6
2.2 <i>Photovoltaic</i>	7
2.3 Klasifikasi Panel Surya	9
2.3.1 Panel surya monokristalin	9
2.3.2 Panel surya polikristalin.....	9
2.3.3 Panel surya film tipis.....	9
2.4 Sirip Pendingin.....	10
2.5 Mekanisme Perpindahan Kalor	12
2.5.1 Konduksi	12
2.5.2 Konveksi	13
2.5.3 Radiasi.....	14
2.6 Aliran Fluida	15
2.7 Komputasi Dinamika Fluida (CFD).....	17
2.7.1 <i>Pre-Processing</i>	21
2.7.2 <i>Processing</i>	21

2.7.3	<i>Post-Processing</i>	22
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	22
3.2	Diagram Alir Metode Penelitian	23
3.3	Parameter Penelitian.....	24
3.3.1	Geometri panel surya dan sirip <i>cross-cut</i>	24
3.4	Metode Komputasi	26
3.4.1	<i>Pre-processing</i>	26
3.4.2	<i>Processing</i>	28
3.4.2.	<i>Post-Processing</i>	30
3.5	Kondisi Batas Simulasi <i>Floating Photovoltaic</i>	30
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1	Mesh Independence Test	34
4.1.1	Hasil <i>meshing</i>	35
4.1.2	Perbandingan jumlah <i>mesh</i> terhadap hasil simulasi.....	38
4.2	Hasil Pengambilan Data	39
4.3	Validasi Data	42
4.4	Pengaruh Variasi Iradiasi Matahari	44
4.5	Pengaruh Variasi Temperatur Lingkungan dan Kecepatan Udara.....	46
4.5.1	Kontur temperatur dan kecepatan pengaruh pengaruh variasi temperatur lingkungan dan variasi kecepatan udara	48
4.6	Pengaruh Variasi Ketinggian FPV	52
4.7	Pengaruh Variasi Material Sirip Pendingin	54
BAB V	PENDAHULUAN.....	55
5.1	Simpulan	55
5.2	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....		58
LAMPIRAN.....		61

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian	22
Tabel 3.2 Sifat termo-fisik material	24
Tabel 4.1 Data hasil simulasi variasi iradiasi 800 W/m ²	39
Tabel 4.2 Data hasil simulasi variasi iradiasi 1000 W/m ²	40
Tabel 4.3 Data hasil simulasi variasi material sirip pendingin FPV	40
Tabel 4.4 Data hasil simulasi variasi ketinggian FPV.....	41
Tabel 4.5 Data validasi	42

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Klasifikasi panel surya. (a) Monokristalin, (b) Polikristalin, (c) Film tipis (Rachmi dkk, 2020).....	10
Gambar 2.2 Macam-macam desain fin (Kim et al, 2023).....	11
Gambar 2.3 Macam-macam aliran fluida (Cengel et al, 2019).....	15
Gambar 2.4 Contoh kontur hasil simulasi.....	22
Gambar 3.1 Flowchart metode penelitian	24
Gambar 3.2 Gambar teknik geometri panel surya dengan sirip cross-cut (mm) ..	25
Gambar 3.3 Tahapan simulasi	26
Gambar 3.4 Metode potong dengan bidang datar	27
Gambar 3.5 Pembuatan surface berdasarkan hasil pemotongan geometri.....	27
Gambar 3.6 Setup models simulasi.....	28
Gambar 3.7 Material setup simulasi.....	29
Gambar 3.8 Cellzone setup simulasi.....	29
Gambar 3.9 Boundary condition setup simulasi	30
Gambar 3.10 Kondisi batas simulasi.....	31
Gambar 3.11 Model perpindahan panas simulasi	32
Gambar 4.1 Tampilan meshing simulasi FPV dengan sirip cross-cut.....	35
Gambar 4.2 Kontur skewness meshing.....	37
Gambar 4.3 Kontur orthogonal quality meshing	37
Gambar 4.4 Grafik mesh independence test simulasi FPV dengan sirip cross-cut	38
Gambar 4.5 Grafik perbandingan temperatur rata-rata permukaan PV dengan dan tanpa sirip	43
Gambar 4.6 Grafik pengaruh variasi iradiasi matahari	45
Gambar 4.7 Kontur temperatur pada percobaan yang dipengaruhi oleh variasi iradiasi matahari (a) 600 W/m ² (b) 800 W/m ² (c) 1000 W/m ² (d) 1200 W/m ²	46
Gambar 4.8 Grafik pengaruh variasi temperatur lingkungan dan kecepatan udara	47

Gambar 4.9 Kontur temperatur pada percobaan yang dipengaruhi oleh variasi temperatur lingkungan (a) Udara 30 °C dan air 30 °C (b) Udara 30 °C dan air 25 °C (c) Udara 25 °C dan air 20 °C (d) Udara 20 °C dan air 20 °C	50
Gambar 4.10 Kontur warna kecepatan fluida	51
Gambar 4.11 Grafik pengaruh variasi ketinggian FPV	52
Gambar 4.12 Grafik pengaruh material sirip pendingin	54

DAFTAR NOTASI

A	: Luas permukaan perpindahan panas (m^2)
a	: Koefisien penyerapan
A_c	: Luas penampang melintang dari sirip (m^2)
CFD	: <i>Computational fluid dynamics</i>
D	: Diameter dalam pipa (m)
ε	: Laju disipasi (W/m^3)
ε_f	: Efektivitas sirip
F	: Gaya eksternal (N)
FPV	: <i>Floating photovoltaic</i>
g	: Percepatan gravitasi (m/s^2)
h	: Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m^2K)
k	: Konduktivitas termal (W/mK)
k_{eff}	: Konduktivitas efektif (W/mK)
m	: Parameter termal (m^{-1})
MIT	: Mesh Independence Test
μ	: Viskositas dinamik fluida (Ns/m^2)
n	: Index bias
Ω'	: Sudut ruang
PLTS	: Pembangkit Listrik tenaga surya
\dot{Q}_{Cond}	: Laju perpindahan panas konduksi (W)
qf	: Panas yang dilepaskan sirip

q_p	: Panas yang dilepaskan panel surya
Re	: Bilangan Reynold
ρ	: Massa jenis fluida (kg/m^3)
S_h	: <i>Heat source</i> (W/m^3)
σ_s	: Koefisien penyebaran
T	: Temperatur (K)
t	: Waktu (s)
T_b	: Temperatur pangkal sirip (K)
V	: Vektor kecepatan (x, y, dan z)
v	: Kecepatan fluida (m/s)
v_{air}	: <i>Wind velocity</i> (m/s)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi terbarukan merujuk pada energi yang diperoleh dari sumber-sumber yang dapat diperbarui secara alami, seperti panas bumi, angin, air, bioenergi, dan tenaga surya. Dari semua potensi energi baru dan terbarukan tersebut Indonesia memiliki potensi terbesarnya di energi matahari. Sebagai negara yang beriklim tropis, Indonesia memiliki potensi untuk pengembangan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Salah satu energi terbarukan yang dapat dikembangkan di Indonesia yaitu energi surya. Potensi energi surya di Indonesia mencapai 3.294,4 GWp sedangkan pemanfaatannya hanya 271,6 MW atau 0,008% dari potensinya (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2023). Energi surya merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang diperoleh melalui pancaran sinar matahari. Untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik diperlukan sel surya (Lubna dkk, 2021). Pemanfaatan energi surya sebagai sumber pembangkit listrik dapat diwujudkan melalui dua teknologi utama, yaitu teknologi fotovoltaik (PV) dan fototermik (termal).

Fotovoltaik adalah komponen yang mampu mengonversi gelombang elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik. Fotovoltaik ini berada dalam sel surya, yang kemudian disusun secara optimal untuk menyerap radiasi elektromagnetik dari matahari. Kumpulan sel surya ini disebut panel surya. Namun, panel surya memiliki kelemahan, yaitu efisiensinya menurun ketika suhu permukaan meningkat. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk menurunkan suhu permukaan panel dengan metode pendinginan. Terdapat dua

metode pendinginan yang dapat diterapkan: pendinginan pasif dan pendinginan aktif. Pada penelitian ini, digunakan metode pendinginan pasif dengan memanfaatkan *heatsink*.

Salah satu inovasi upaya untuk meningkatkan efisiensi sistem fotovoltaik ialah fotovoltaik terapung. Pada panel surya konvensional, penurunan temperatur terjadi karena pengaruh perpindahan panas konvektif alami yang disebabkan oleh angin. Berbeda dengan sistem ini, air di bagian bawah pada sistem *floating photovoltaic* (FPV) memberikan efek pendinginan tambahan pada panel surya bersamaan dengan aliran angin. Agar lebih memaksimalkan pendinginan yang terjadi, maka dapat dilakukan penambahan sirip di bagian bawah panel surya. Penambahan sirip pada panel surya yang menggunakan pendingin konveksi alami meningkatkan luas permukaan perpindahan panas, sehingga memperbesar laju perpindahan panas dari panel surya ke udara sekitarnya. Jenis bahan dasar dan sirip yang digunakan pada heat sink juga memengaruhi kemampuan pendinginan (Arifin *et al*, 2020)

Berdasarkan penelitian dari (Ramanan *et al*, 2024), yang meneliti tentang kinerja PLTS terapung, menunjukkan bahwa efek pendinginan maksimum *photovoltaic* terjadi pada sudut kemiringan 0° pada ketinggian 1500 mm dari permukaan air. Selain itu, perbedaan suhu minimal 5°C antara angin dan air diperlukan untuk peningkatan perpindahan panas dalam sistem *floating photovoltaic* (FPV). Hal ini menunjukkan perlunya ventilasi udara yang tepat dan kedekatan panel surya dengan domain air untuk memperoleh pendinginan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, fabrikasi, pemasangan, dan konstruksi FPV dengan ketinggian dan sudut kemiringan yang rendah merupakan desain yang tepat untuk memperoleh penurunan suhu maksimum pada sel surya. Akibatnya, hal ini akan mengurangi penurunan pembangkitan daya yang terkait dengan kehilangan termal modul PV. Agar memperoleh efek pendinginan yang lebih optimal, salah satu cara yang efektif adalah melakukan pemasangan *heatsink* pada panel surya.

Berdasarkan penelitian dari (Kusumaningtyas dkk, 2024) menunjukkan bahwa ada perbedaan suhu yang cukup signifikan antara PLTS terapung dan PLTS

yang terpasang di darat. Rata-rata suhu PLTS terapung 6% lebih rendah dibandingkan suhu PLTS di darat. Suhu merupakan faktor penting yang mempengaruhi daya keluaran PLTS. Semakin tinggi suhu lingkungan, semakin rendah efisiensi panel surya dan daya keluaran PLTS, yang berlawanan dengan efek peningkatan iradiasi matahari. Pada pengujian ini, suhu minimal pada panel di darat adalah 44,9 °C dan suhu maksimal mencapai 60,7 °C

Berdasarkan penelitian dari (Sjahrudin, 2020), yang meneliti tentang pemasangan *heatsink* pada panel surya. Salah satu upaya untuk menstabilkan suhu permukaan panel surya adalah dengan menambahkan sirip pendingin yang terbuat dari aluminium. Adapun penambahan sirip berguna untuk meningkatkan luas area perpindahan panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sirip pendingin dapat mengurangi temperatur panel surya hingga 3,78%. Peneliti menambahkan bahwa penggunaan kombinasi bahan *heatsink* dari aluminium dan tembaga tidak berpengaruh signifikan terhadap penurunan temperatur dan peningkatan performa.

Berdasarkan tinjauan yang ada, beberapa penelitian dilakukan dengan menambahkan sirip pendingin untuk menurunkan temperatur panel surya yang dapat mempengaruhi nilai efisiensi panel surya. Metode CFD digunakan dalam penelitian dan pengembangan untuk mengurangi biaya, waktu, dan konsumsi material. Evaluasi kinerja FPV dengan sirip *cross-cut* haruslah sangat penting dibandingkan dengan sistem PV konvensional. Desain sirip ini memungkinkan sirkulasi udara yang lebih baik untuk fluida kerja dibandingkan dengan jenis sirip lainnya. Namun demikian, hanya ada sedikit referensi dari penelitian sebelumnya tentang sistem FPV dengan sirip pendingin. Oleh karena itu, studi baru saat ini bertujuan untuk melakukan analisis CFD pada sistem FPV dengan sirip pendingin berbentuk *cross-cut*. Analisis ini akan menentukan seberapa baik metode pendinginan menurunkan temperatur permukaan FPV dengan memeriksa efek radiasi matahari, kecepatan udara, temperatur udara dan air, ketinggian PV terhadap permukaan air, serta material dari sirip pendingin.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian simulasi unjuk kerja floating photovoltaic berbasis CFD ini adalah sebagai berikut:

1. Mensimulasikan dan menganalisis unjuk kerja *photovoltaic* menggunakan *heatsink* dengan variasi ketinggian *floating photovoltaic*, radiasi matahari, kecepatan udara, dan temperatur lingkungan terhadap temperatur permukaan menggunakan software CFD.
2. Menganalisis kinerja sirip aluminium dan sirip tembaga terhadap temperatur permukaan PV.

1.3 Batasan Masalah

Untuk memudahkan dalam proses penelitian, peneliti membatasi cakupan pembahasan masalah. Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan dengan model 2D (dua dimensi).
2. Penelitian dilakukan dengan menggunakan Ansys Fluent.
3. Penelitian dilakukan dengan model simulasi *steady state*.
4. Penelitian dilakukan dengan satu arah aliran
5. Material sirip yang digunakan dalam simulasi adalah aluminium dan tembaga.
6. Fluida yang digunakan dalam simulasi adalah udara dan air.
7. Variasi ketinggian *floating photovoltaic* terhadap air adalah 250 mm, 500 mm, 1000 mm, 1500 mm, 2000 mm, dan 2500 mm.
8. Variasi radiasi matahari yaitu sebesar 600 W/m², 800 W/m², 1000 W/m², dan 1200 W/m².
9. Variasi *wind velocity* yaitu sebesar 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, dan 5 m/s.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan oleh peneliti pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan teori dan konsep dasar perpindahan panas, panel surya, dan simulasi CFD.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan tentang langkah yang dilakukan untuk mensimulasikan *floating photovoltaic* dengan sirip, serta pengambilan data simulasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan tentang hasil desain, hasil simulasi, dan pembahasan dari data-data yang diperoleh.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan simpulan yang diperoleh dari hasil simulasi dan saran yang diberikan oleh peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Matahari

Energi surya merupakan sumber utama energi bebas yang tidak ada habisnya di Bumi. Sebagai salah satu sumber energi terbarukan, energi surya memiliki peranan penting karena matahari merupakan sumber energi terbesar yang masih belum dimanfaatkan secara optimal oleh manusia. Energi surya menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang sedang dikembangkan di Indonesia. Indonesia merupakan negara beriklim tropis, sehingga sepanjang tahun seluruh wilayah Indonesia terus terkena sinar matahari. Suhu dan rentang waktu siang hari yang terjadi relatif konstan di sepanjang tahun sebagai akibat dari stabilnya radiasi matahari yang dipancarkan oleh matahari membuat energi surya dapat menjadi Solusi pengganti sumber energi fosil seperti batubara (Afif & Martin, 2022).

Beberapa penelitian menyebutkan salah satu pemanfaatan energi matahari adalah dengan memanfaatkan cahaya matahari yang kemudian dapat diubah menjadi energi listrik. Teknologi tersebut ialah *photovoltaic* yang memanfaatkan matahari terutama intensitasnya sehingga dapat dibuat menjadi sumber energi listrik untuk pemakaian manusia. Intensitas radiasi matahari di Indonesia dibagi menjadi dua wilayah, yaitu Indonesia bagian barat (IBB) dan Indonesia bagian timur (IBT). Di IBB, rata-rata intensitas penyinaran matahari mencapai sekitar 4,5 kWh/m² per hari, dengan fluktuasi bulanan sekitar 10%. Sementara itu, di IBT, intensitas penyinaran lebih tinggi, yakni sekitar 5,1 kWh/m² per hari dengan fluktuasi bulanan sekitar 9%. Secara umum, potensi

penyinaran matahari rata-rata di Indonesia adalah sekitar 5,8 kWh/m² per hari, dengan fluktuasi bulanan sekitar 9%.

Secara umum, pita gelombang cahaya matahari dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu sinar ultraviolet (UV) yang berada pada pita gelombang 100 - 400 nm tersebut dibagi lagi menjadi UV A (315-400 nm), UV B (280-325 nm), dan UV C (100-280 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 termasuk dalam spektrum gelombang elektromagnetik dengan rentang panjang gelombang antara 100 hingga 400 nm. Sementara itu, radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi mencakup rentang panjang gelombang sekitar 100 nm hingga 1 mm. (Cengel *et al*, 2019).

2.2 Photovoltaic

Sel surya, sering juga disebut sebagai *solar cell* atau fotovoltaik, adalah teknologi yang sedang aktif dikembangkan oleh pemerintah Indonesia. Mengingat posisi geografisnya, Indonesia memiliki potensi energi matahari yang signifikan. Energi surya ini dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik, dikenal juga sebagai modul PV atau panel surya. Sistem pemanfaatan energi surya ini secara umum dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Panel surya yang tersedia di pasaran saat ini umumnya memiliki efisiensi konversi cahaya matahari menjadi listrik sekitar 16–20%. Ini menunjukkan bahwa hanya sebagian dari cahaya matahari yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan alami bahan penyusun sel surya, yang hanya mampu menyerap radiasi matahari pada spektrum atau panjang gelombang tertentu. Sementara itu, spektrum cahaya matahari sendiri mencakup rentang panjang gelombang yang sangat luas. (Disnavbenoa, 2022).

Panel surya sendiri merupakan kumpulan sel surya yang disusun seefektif mungkin agar dapat menyerap gelombang elektromagnetik dari matahari. Di

dalam sel surya itu sendiri terdapat komponen *photovoltaic* atau komponen yang dapat merubah gelombang elektromagnetik matahari menjadi energi listrik. Terdapat berbagai jenis panel surya dan yang paling banyak digunakan adalah panel surya *monocrystalline*. Panel surya jenis ini tidak banyak memakan ruang saat instalasinya dan memiliki ketahanan umur pakai yang cukup panjang dibandingkan jenis panel surya lainnya.

Dalam pengaplikasiannya, panel surya atau pembangkit listrik tenaga surya ini tidak terlalu membutuhkan ruangan atau tempat yang luas untuk pemasangannya. Dalam beberapa kasus, panel surya diaplikasikan di atap rumah, sehingga memungkinkan untuk mendapat pancaran sinar matahari yang lebih kuat. Selain itu, terdapat inovasi dalam pengaplikasian panel surya yaitu panel surya terapung. Panel surya dirancang untuk dipasang di permukaan air seperti di waduk, danau, ataupun di lepas pantai. Pemanfaatan panel surya terapung dapat meningkatkan efisiensi energi karena pendinginan oleh air di sekitarnya dan mengurangi evaporasi. Hal ini merupakan solusi yang efektif untuk penggunaan energi terbarukan tanpa memerlukan lahan daratan tambahan.

Berdasarkan penelitian (Choi, 2023), yang meneliti mengenai analisis pembangkitan daya pada sistem PLTS terapung menyimpulkan bahwa efisiensi pembangkitan sistem PLTS terapung lebih unggul hingga 11% atau lebih dibandingkan dengan PLTS darat. Ketika irradiasi matahari meningkat, daya keluaran PLTS pada kedua sistem juga meningkat, namun PLTS terapung menunjukkan peningkatan yang lebih konsisten dan signifikan. Hal ini disebabkan oleh suhu panel yang lebih rendah pada PLTS terapung, yang membantu menjaga efisiensi konversi energi tetap tinggi. Sebaliknya, pada PLTS darat, peningkatan iradiasi matahari berbanding lurus dengan kenaikan suhu yang lebih tinggi, yang justru menurunkan efisiensi panel surya dan mengurangi daya keluaran. Dengan demikian, PLTS terapung tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga stabilitas performa dalam berbagai kondisi.

2.3 Klasifikasi Panel Surya

Berdasarkan (Rachmi dkk, 2020), panel surya diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

2.3.1 Panel surya monokristalin

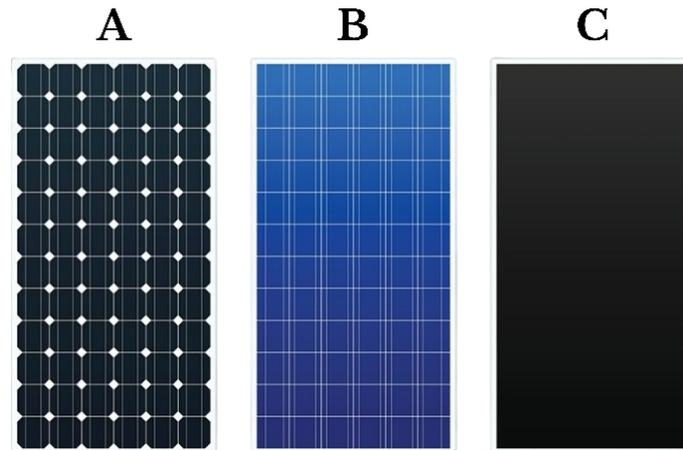
Panel surya monokristal dibuat dari kristal silikon tunggal yang besar. Proses pembuatannya cukup rumit dan mahal, namun hasil akhirnya adalah panel surya dengan efisiensi konversi energi yang sangat tinggi. Monokristal silikon memiliki struktur yang sangat teratur, yang memungkinkan elektron bergerak lebih bebas, sehingga meningkatkan efisiensi. Panel ini sering diidentifikasi dengan tampilan warnanya yang gelap dan potongan sudut yang khas. Keunggulan utama panel monokristal adalah umur panjang dan efisiensinya yang tetap tinggi, bahkan pada kondisi cahaya rendah. Panel jenis ini memiliki Tingkat efisiensi antara 12 sampai 14% (Rachmi dkk, 2020).

2.3.2 Panel surya polikristalin

Panel surya polikristal terbuat dari potongan-potongan silikon yang dilebur bersama-sama. Hal ini menciptakan beberapa kristal yang lebih kecil dalam satu modul. Meskipun proses pembuatannya lebih sederhana dan lebih murah dibandingkan dengan monokristal, efisiensi panel polikristal lebih rendah, biasanya sekitar 10 sampai 12%. Bentuk fisik panel ini biasanya dapat dikenali dengan warna biru dan tampilan yang berkilauan karena adanya batas-batas antara kristal yang berbeda.

2.3.3 Panel surya film tipis

Panel surya thin-film atau lapisan tipis dibuat dengan menyebarkan satu atau lebih lapisan tipis bahan fotovoltaik pada permukaan seperti kaca, plastik, atau logam. Bahan yang umum digunakan termasuk *Cadmium telluride* (CdTe) dan tembaga indium gallium selenide (CIGS). Panel *thin-film* lebih fleksibel dan dapat digunakan di berbagai permukaan, termasuk yang melengkung. Efisiensi panel *thin-film* umumnya lebih rendah dibandingkan panel silikon kristal, sekitar 11%.

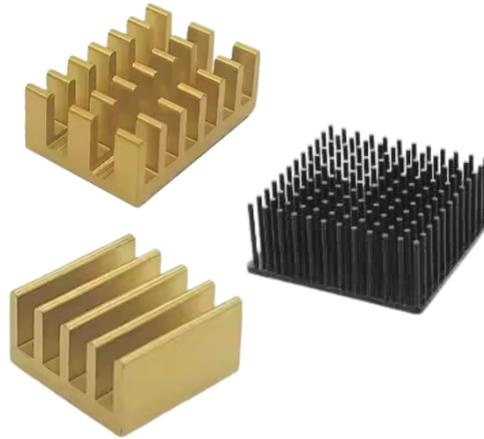


Gambar 2.1 Klasifikasi panel surya. (a) Monokristalin, (b) Polikristalin, (c) Film tipis (Rachmi dkk, 2020)

2.4 Sirip Pendingin

Naiknya temperatur fotovoltaik berpengaruh pada turunnya efisiensi fotovoltaik sehingga dapat memberikan dampak buruk untuk suatu pembangkit listrik tenaga surya. Untuk mengatasi hal tersebut, maka dibutuhkan komponen tambahan untuk menyerap panas dari panel surya. Komponen tambahan tersebut yaitu sirip pendingin atau *fin*. Penambahan *fin* bertujuan untuk membuang panas pada panel surya. Penambahan sirip pada bagian bawah panel akan memperluas area permukaan perpindahan panas. Hal ini akan meningkatkan efektivitas perpindahan panas dari panel, sehingga dapat membantu menurunkan suhu maksimal panel surya serta meningkatkan efisiensi kinerja panel surya.

Sirip adalah ekstensi pada permukaan luar suatu objek yang meningkatkan laju perpindahan panas antara objek tersebut dan lingkungannya dengan memperkuat proses konveksi.. Ini merupakan pendekatan yang lebih efisien dibandingkan meningkatkan koefisien perpindahan panas yang bergantung pada sifat material dan kondisi operasi Karena itu, modifikasi geometris pada permukaan lebih mudah diimplementasikan (Kim *et al*, 2023).



Gambar 2.2 Macam-macam desain *fin* (Kim *et al*, 2023)

Penggunaan sirip berbentuk *cross-cut* pada panel surya memberikan berbagai keunggulan, terutama dalam meningkatkan efisiensi termal sistem. Desain sirip yang dipotong melintang ini mampu meningkatkan turbulensi aliran udara, sehingga mempercepat pelepasan panas dari panel surya ke lingkungan. Desain ini juga sangat efektif dalam sistem konveksi alami, karena celah-celah antar sirip memungkinkan udara panas naik dan digantikan udara dingin secara efisien tanpa memerlukan pendinginan tambahan. Selain itu, bentuk sirip yang terpotong-potong ini menciptakan lebih banyak sudut dan celah, yang secara efektif memperbesar luas permukaan pendinginan dan meningkatkan perpindahan panas secara keseluruhan.

Sirip sangat efektif dalam aplikasi di mana perlu meningkatkan perpindahan panas, dan bahan yang digunakan untuk sirip umumnya harus memiliki konduktivitas termal tinggi. Dalam kebanyakan situasi, sirip berinteraksi dengan fluida yang bergerak, yang membantu mempercepat proses perpindahan panas karena luas permukaan sirip yang besar. Konduktivitas termal tinggi dari material sirip memastikan perpindahan panas yang efisien dari atau ke objek utama. Salah satu metode yang umum digunakan adalah membuat model sirip secara komputasi dan mensimulasikan kinerjanya di bawah kondisi operasi yang relevan. Adapun persamaan untuk mencari efektivitas dari sirip adalah (Cahyono dkk, 2021):

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{q_p} \times 100\% \dots\dots\dots 2.1$$

Di mana:

ε_f : Efektivitas sirip

q_f : Panas yang dilepaskan sirip

q_p : Panas yang dilepaskan panel surya

2.5 Mekanisme Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor merupakan proses perpindahan energi dari suatu daerah ke daerah yang lain sebagai akibat dari gradien temperatur. Umumnya mekanisme perpindahan panas dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu konduksi, radiasi dan konveksi (Cengel, 2019).

2.5.1 Konduksi

Konduksi merupakan mekanisme perpindahan kalor dari area bersuhu tinggi ke area bersuhu lebih rendah, baik dalam satu medium (padat, cair, atau gas) maupun antar dua medium berbeda yang saling bersentuhan langsung. Pada perpindahan panas secara konduksi, energi ditransfer melalui interaksi antar molekul tanpa disertai perpindahan molekul dalam jumlah besar. Dalam zat padat yang tidak tembus cahaya, konduksi menjadi satu-satunya cara panas dapat mengalir. Meski dominan pada benda padat, mekanisme ini juga berperan dalam perpindahan panas di dalam fluida.

Pada sistem FPV dengan sirip cross-cut, proses perpindahan yang terjadi yaitu perpindahan panas konduksi melalui medium padat atau kontak langsung antara dua benda dengan suhu berbeda. Dalam hal ini, perpindahan panas konduksi terjadi pada kontak langsung sel PV dengan sirip. Secara matematis, nilai perpindahan kalor konduksi dapat dengan persamaan (2.1) berikut:

$$\frac{\dot{Q}_{cond}}{\sqrt{kAhP}(T_b - T_\infty)} = \tanh (mL) \dots\dots\dots 2.2$$

Di mana:

\dot{Q}_{Cond} : Laju perpindahan panas konduksi (W)

A : Luas permukaan perpindahan panas (m²)

k : Konduktivitas termal (W/mK)

T : Temperatur (K)

Tanda negatif pada persamaan untuk memastikan bahwa perpindahan kalor dalam arah x positif adalah sebuah nilai positif.

2.5.2 Konveksi

Perpindahan kalor secara konveksi dari suatu permukaan yang temperaturnya lebih tinggi dibandingkan temperatur fluida sekitarnya terjadi melalui beberapa tahap. Mula-mula, energi panas meningkatkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida yang berada di dekat permukaan. Selanjutnya, partikel-partikel ini bergerak menuju wilayah fluida yang bersuhu lebih rendah, bercampur dengan partikel lain, dan mentransfer sebagian energi panasnya ke partikel-partikel tersebut (Cengel dkk, 2019).

Pada sistem FPV dengan sirip cross-cut, perpindahan panas konveksi yang terjadi yaitu konveksi alami. Konveksi alami terjadi karena angin yang mengenai bagian sel PV dan sirip. Persamaan koefisien perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan (2.3) (Watmuff, 1977)

$$h = 2.8 + 3v_{air} \dots\dots\dots 2.3$$

Di mana:

h : Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²K)

v_{air} : *wind velocity* (m/s)

Dalam praktiknya, ujung sirip sering terpapar ke lingkungan sekitarnya, sehingga kondisi batas yang relevan untuk ujung sirip melibatkan perpindahan panas secara konveksi, yang dalam beberapa kasus juga dapat mencakup efek radiasi. Jika hanya konveksi yang diperhitungkan pada ujung sirip, maka kondisi di ujung tersebut dapat dirumuskan berdasarkan keseimbangan energi di ujung sirip ($\dot{Q}_{konduksi} = \dot{Q}_{konveksi}$), yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{conv} &= -kA_c \left(\frac{dT}{dx} \right) |_{x=0} \\ &= \sqrt{hpkA_c} (T_b - T_\infty) \frac{\sinh(mL) + \left(\frac{h}{mk} \right) \cosh(mL)}{\cosh(mL) + \left(\frac{h}{mk} \right) \sinh(mL)} \dots\dots\dots 2.4 \end{aligned}$$

Di mana:

- m : Parameter termal (m^{-1})
- T_b : Temperatur pangkal sirip (K)
- A_c : Luas penampang melintang dari sirip (m^2)

2.5.3 Radiasi

Radiasi merupakan proses perpindahan kalor melalui gelombang elektromagnetik. Pada proses radiasi, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan) dan absorpsi (diserap) dan menjadi kalor. Hal itu tergantung pada jenis benda, menurut hukum Stefan Boltzman tentang radiasi panas dan berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa kalor yang dipancarkan (dari benda hitam) dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat temperatur absolut benda tersebut dan berbanding lurus dengan permukaan benda.

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \dots\dots 2.5$$

Di mana:

- a : Koefisien penyerapan
- n : Index bias

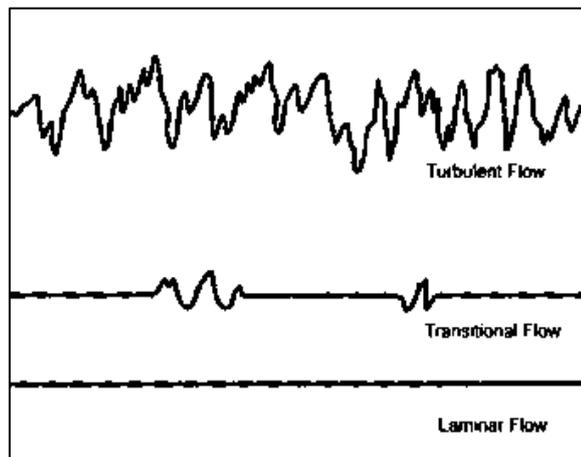
σ_s : Koefisien penyebaran

Ω' : Sudut ruang

Dalam sistem PV, perpindahan panas radiasi yang terjadi akan dipantulkan dan diserap oleh sel PV. Radiasi tersebut kemudian akan dipantulkan kembali ke lingkungan, dalam hal ini yaitu ke udara dan air.

2.6 Aliran Fluida

Aliran fluida adalah perpindahan fluida yang membentuk garis aliran dengan kecepatan tertentu. Aliran fluida dibagi menjadi tiga jenis yang dibedakan berdasarkan nilai bilangan Reynold-nya, yaitu:



Gambar 2.3 Macam-macam aliran fluida
(Cengel *et al*, 2019)

1. Aliran Laminar

Aliran laminar adalah aliran fluida yang salah satu lapisannya bergerak dengan lancar di dalam lapisan atau laminar pada lapisan yang berdekatan dan saling bertukar momentum pada waktu yang bersamaan secara molekuler. Ketidakstabilan pada aliran laminar hilang karena pengaruh dari gaya geser viskos yang terjadi di mana gaya viskos ini menahan gerakan relatif yang terjadi pada lapisan fluida yang berdekatan. Aliran laminar memiliki bilangan Reynolds yang kurang dari 2300 ($Re < 2300$).

2. Aliran Transisi

Aliran transisi adalah kondisi aliran fluida saat mulai beralih dari aliran laminar menuju aliran turbulen. Aliran transisi memiliki bilangan Reynolds yang berada antara 2300 sampai dengan 4000 ($2300 < Re < 4000$).

3. Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah aliran fluida yang bergerak dengan lintasan yang tidak teratur yang menyebabkan pertukaran momentum pada suatu bagian fluida ke bagian fluida lain. Aliran turbulen berskala kecil terdiri dari pusaran-pusaran kecil yang bergerak cepat dan menyebabkan konversi energi mekanik menjadi energi yang tidak dapat dikembalikan. Sementara itu, aliran turbulen juga berskala besar ditandai oleh keberadaan pusaran-pusaran besar dalam aliran fluida. Fluktuasi kecil yang ada pada aliran turbulen skala kecil terjadi dengan frekuensi yang tinggi. Intensitas turbulensi sangat dipengaruhi oleh bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds pada aliran turbulen lebih besar dari 4000 ($Re > 4000$).

Jenis aliran fluida dapat diketahui melalui bilangan Reynolds (Re). Bilangan Reynolds tidak memiliki dimensi dan sangat berpengaruh pada aliran fluida. Bilangan Reynold dapat dihitung dengan persamaan (2.6):

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \dots\dots\dots 2.6$$

Di mana:

Re : Bilangan Reynold

ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)

D : Diameter dalam pipa (m)

v : Kecepatan fluida (m/s)

μ : Viskositas dinamik fluida (Ns/m^2)

2.7 Komputasi Dinamika Fluida (CFD)

Komputasi Dinamika Fluida (CFD) adalah cabang mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida berdasarkan persamaan yang mengatur tentang kekekalan massa, momentum, dan energi. Dengan bantuan komputer, CFD memungkinkan kita untuk mensimulasikan dan memvisualisasikan bagaimana fluida (cairan atau gas) bergerak dan berinteraksi dengan permukaan padat dalam berbagai kondisi. Kelebihan utama CFD adalah kemampuannya untuk memodelkan situasi kompleks yang sulit atau tidak mungkin dianalisis secara eksperimental. Namun, hasil dari simulasi CFD sangat bergantung pada kualitas model matematika dan akurasi metode numerik yang digunakan.

Proses perhitungan fenomena aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan pendekatan kontinuitas dan energi. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

1. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad \dots\dots\dots 2.7$$

Di mana:

- ρ : Massa jenis fluida (Kg/m³)
- t : Waktu (s)
- V : Vektor kecepatan (x, y, dan z)

2. Persamaan momentum

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \cdot V) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho g + F \quad \dots\dots\dots 2.8$$

Di mana:

- g : Percepatan gravitasi (m/s²)
- F : Gaya eksternal (N)
- V : Vektor kecepatan (x, y, dan z)

3. Persamaan energi

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left(\rho v \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) - \sum_j (h_j J_j + \tau_{eff} v) + S_h \quad \dots \quad 2.9$$

Di mana:

ε : Laju disipasi (W/m³)

k_{eff} : Konduktivitas efektif (W/mK)

S_h : Heat source (W/m³)

Proses perhitungan dalam perangkat lunak CFD dilakukan dengan membagi area simulasi menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sel melalui proses yang disebut *meshing*. Sel-sel ini menjadi dasar atau kontrol dalam perhitungan yang dilakukan perangkat lunak CFD. Untuk menjalankan simulasi dengan metode ini, ada beberapa kriteria yang harus dipenuhi.

1. Metode beda hingga

Metode ini merupakan salah satu pendekatan dalam menyelesaikan skema numerik dari persamaan diferensial parsial (PDP). Penyelesaiannya dilakukan dengan memanfaatkan deret Taylor untuk mengaproksimasi persamaan diferensial ke dalam bentuk beda hingga. Setelah transformasi tersebut dilakukan, proses iteratif digunakan untuk memperoleh solusi dari persamaan yang telah didiskretisasi.

2. Metode elemen hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu pendekatan untuk menyelesaikan persoalan diferensial, baik berupa persamaan diferensial biasa maupun parsial. Prinsip kerja metode ini adalah membagi permasalahan kompleks menjadi elemen-elemen kecil, kemudian menyelesaikannya melalui pendekatan interpolasi.

3. Metode volume hingga

Metode volume hingga sama dengan metode yang dua sebelumnya yaitu untuk menyelesaikan persoalan diferensial. Metode penyelesaian yang digunakan mengacu pada volume yang mengitari setiap titik *node* pada

sebuah *mesh*. Metode Volume hingga ini biasa digunakan dalam permasalahan diferensial yang berhubungan dengan dinamika fluida.

Terdapat berbagai pendekatan dalam pemodelan aliran fluida, mulai dari penyelesaian langsung persamaan mekanika fluida melalui *Direct Numerical Simulation* (DNS), pemodelan skala turbulensi tertentu menggunakan *Large Eddy Simulation* (LES), hingga pendekatan dengan menghitung nilai rata-rata fluktuasi aliran melalui metode *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). Di antara metode-metode tersebut, RANS merupakan salah satu yang paling umum digunakan dalam aplikasi sehari-hari karena menawarkan keseimbangan antara akurasi hasil dan kebutuhan komputasi yang relatif rendah. Dalam metode RANS, terdapat beberapa model turbulensi yang digunakan, yaitu:

1. Model k-ε (k-epsilon)

Model turbulensi k-ε (k-epsilon) merupakan salah satu model dua persamaan yang paling umum digunakan dalam simulasi CFD. Model ini memecahkan dua persamaan transport, yaitu untuk energi kinetik turbulen (k) dan laju dissipasi turbulen (ε). Kelebihan utama model k-ε adalah kestabilannya dan efisiensinya secara komputasi, sehingga sering digunakan dalam aplikasi industri untuk aliran turbulen penuh. Model ini juga cukup akurat dalam memprediksi fenomena aliran yang jauh dari dinding (wall). Namun, model k-ε kurang akurat dan sulit dalam memprediksi fenomena yang terjadi di dekat permukaan, terutama pada zona *viscous sublayer*, serta kurang tepat dalam memodelkan fenomena separasi aliran, kecuali jika dimodifikasi dengan varian seperti *Realizable* atau *RNG k-ε*.

Persamaan *Transport* untuk k (Energi Kinetik Turbulen):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \varepsilon \quad \dots\dots\dots 2.10$$

Di mana:

P_k adalah produksi energi turbulen.

μ_t adalah viskositas turbulen.

σ_k adalah konstanta yang terkait dengan difusi turbulen.

Persamaan *Transport* untuk ε (Laju Disipasi Turbulen):

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) P_k - C_2 \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad \dots \quad 2.11$$

Di mana:

C_1 dan C_2 adalah konstanta empiris dalam model k- ε .

σ_ε adalah konstanta yang terkait dengan difusi disipasi turbulen.

2. Model k- ω (k-omega)

model k- ω (k-omega) juga merupakan model dua persamaan, tetapi menggunakan frekuensi spesifik dissipasi turbulen (ω) sebagai ganti ε . Model k- ω lebih unggul dalam menangani aliran dekat dinding tanpa memerlukan fungsi dinding tambahan, serta lebih akurat dalam memprediksi aliran dengan separasi dan gradien tekanan tinggi. Meskipun demikian, model ini cukup sensitif terhadap kondisi batas di luar lapisan batas. Salah satu varian yang paling banyak digunakan adalah SST (*Shear Stress Transport*) k- ω , yang menggabungkan kelebihan model k- ε di daerah jauh dari dinding dan keunggulan model k- ω di dekat dinding.

Persamaan *Transport* untuk k (Energi Kinetik Turbulen):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \beta * k \omega \quad \dots \dots \dots \quad 2.12$$

Dimana:

P_k adalah produksi energi turbulen.

β^* adalah konstanta empiris.

Persamaan *Transport* untuk ω (Frekuensi Spesifik Disipasi Turbulen):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \cdot \nabla \omega = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + \alpha \left(\frac{\omega}{k} \right) P_k - \beta \omega^2 \quad \dots \dots \quad 2.13$$

Dimana:

α dan β adalah konstanta empiris dalam model k- ω .

σ_ω adalah konstanta yang terkait dengan difusi spesifik dissipasi turbulen.

Berdasarkan penelitian (Rumanto, 2021), proses simulasi CFD terbagi menjadi tiga tahap, yaitu:

2.7.1 *Pre-Processing*

Tahap pre-processing merupakan tahapan awal dalam membangun dan menganalisa sebuah model CFD. Dalam tahapan *pre-processing* terdiri beberapa sub-tahapan mulai dari pembuatan geometri menggunakan *software* CAD, pembuatan domain fluida, meshing, serta menentukan parameter atau kondisi batas yang akan disimulasikan.

2.7.2 *Processing*

Tahap ini sering disebut tahapan *solution (solver execution)*. Pada tahap ini, persamaan-persamaan yang dilibatkan dalam simulasi CFD akan diselesaikan secara iteratif sampai mencapai kondisi konvergen. Tingkat akurasi dari solver ditentukan oleh kondisi batas atau asumsi yang digunakan (*boundary condition*), tingkat *meshing*, dan *numerical error* (biasanya dikarena keterbatasan *software* atau karena kekeliruan proses). Untuk menentukan nilai-nilai kondisi batas (*boundary condition*), maka perlu dilakukan penyesuaian beberapa *setup*, yaitu:

A. *Setup model*

Setup model berfungsi untuk menentukan *models* atau persamaan yang digunakan pada simulasi.

B. *Material setup*

Material setup berfungsi untuk menentukan material yang digunakan pada saat simulasi. Dalam hal ini yaitu menentukan jenis material pada panel surya dan sirip pendingin (*solid*) serta material fluida untuk domain fluidanya (*fluid*).

C. *Cellzone condition*

Cellzone condition merupakan tahap pengkondisian material pada tiap-tiap *cellzone* atau *solid bodies (solid & fluid)*.

D. *Boundary condition*

Boundary condition berfungsi untuk menentukan parameter-parameter atau kondisi batas simulasi. Dalam hal ini yaitu memasukkan nilai irradiasi/*heat flux*, kecepatan aliran fluida, dan temperatur *inlet* pada kedua domain.

E. *Solution initialization*

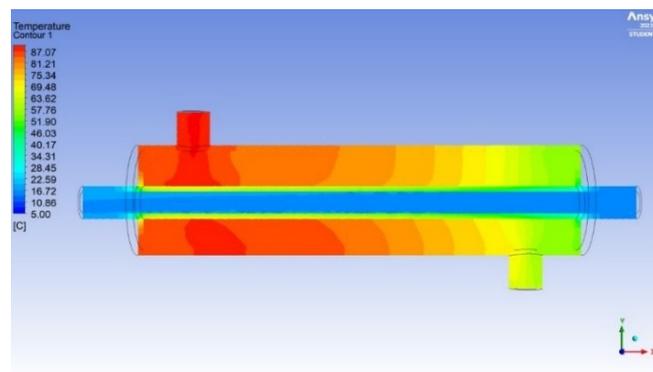
Tahap *Solution Initialization* adalah langkah awal dalam proses simulasi numerik, terutama dalam analisis dinamika fluida. Pada tahap ini, berguna untuk menetapkan nilai awal (*initial value*) untuk semua variabel aliran, seperti tekanan, kecepatan, suhu, dan properti lainnya, di seluruh domainnya.

F. *Run calculation*

Tahap *Run Calculation* merupakan proses di mana *solver* melakukan perhitungan numerik untuk menyelesaikan persamaan yang menggambarkan fenomena fisik yang sedang disimulasikan. Proses numerik pada tahap ini ditentukan oleh jumlah iterasi yang diinginkan. Nilai konvergen pada tahap ini ialah sebesar 10^{-6} .

2.7.3 *Post-Processing*

Post processing adalah tahap akhir dalam proses simulasi yang berfungsi untuk menampilkan dan menganalisis hasil yang diperoleh, baik dalam bentuk data kuantitatif maupun kualitatif. Data kuantitatif mencakup distribusi temperatur pada panel surya, sementara data kualitatif ditampilkan melalui visualisasi aliran seperti plot kontur, plot vektor, dan profil kecepatan. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, maka perlu dilakukan pengujian lagi. Keluaran dari tahap ini dapat berupa grafik warna, vektor, kontur, hingga animasi.



Gambar 2.4 Contoh kontur hasil simulasi

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

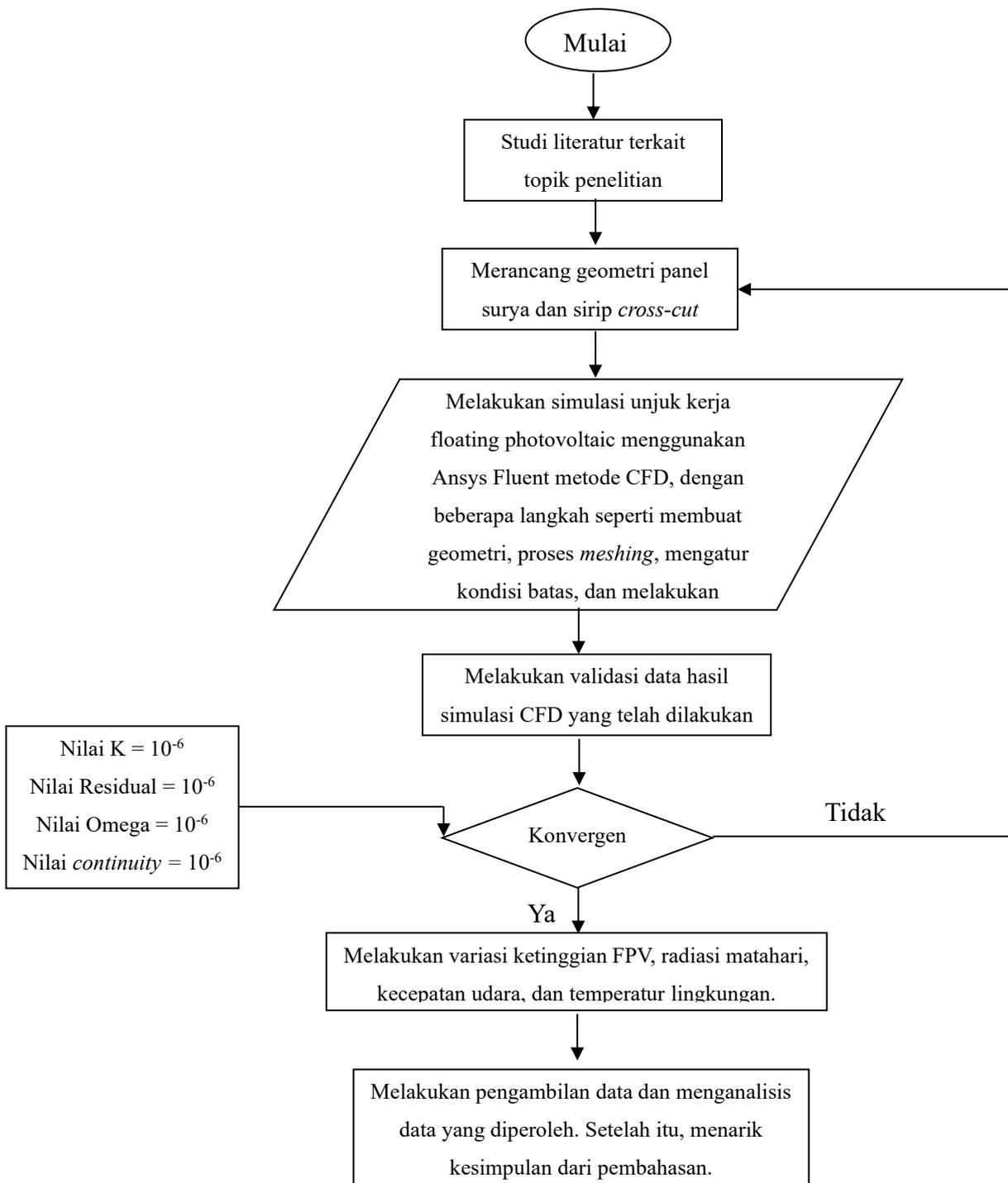
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

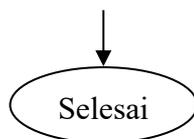
Tempat pelaksanaan penelitian ini adalah Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung. Waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Agustus 2024 sampai dengan Januari 2025 dengan rincian kegiatan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian

No.	Kegiatan	Agu	Sep	Okt	Nov	Des	Jan
1	Studi literatur terkait dengan topik penelitian						
2	Merancang geometri sirip						
3	Mensimulasikan unjuk kerja FPV dengan variasi ketinggian FPV dan variasi temperatur lingkungan terhadap temperatur permukaan <i>photovoltaic</i>						
4	Melakukan evaluasi hasil simulasi unjuk kerja <i>floating photovoltaic</i>						
5	Pembuatan laporan akhir unjuk kerja <i>floating photovoltaic</i>						

3.2 Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* metode penelitian

3.3 Parameter

Penelitian

Bentuk geometri panel surya dan sirip untuk penelitian ini dibuat dengan menggunakan *software* desain 3D yaitu Solidworks dan disimulasikan dengan menggunakan *software* CFD yaitu Ansys Fluent.

3.3.1 Geometri panel surya dan sirip *cross-cut*

Dimensi panel surya dibuat dengan dimensi 650 mm x 350 mm dan tebal 0.5 mm dengan kemiringan panel surya dari titik tengah yaitu sebesar 5,45°. Geometri panel surya dibuat dengan *software* Solidworks 2023. Selanjutnya, geometri panel surya ini akan digabungkan/*assembly* dengan geometri dari sirip.

Desain PV yang dibuat dengan kemiringan tersebut bertujuan memberikan *maintenance* alami pada PV. Ketika dibuat miring, air tidak akan tergenang di bagian permukaan PV. Hal ini turut membantu mencegah terjadinya pertumbuhan lumut yang dapat mengganggu kinerja PV. Dengan kemiringan yang sesuai, panel dapat menangkap sinar matahari secara tegak lurus, sehingga meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan.

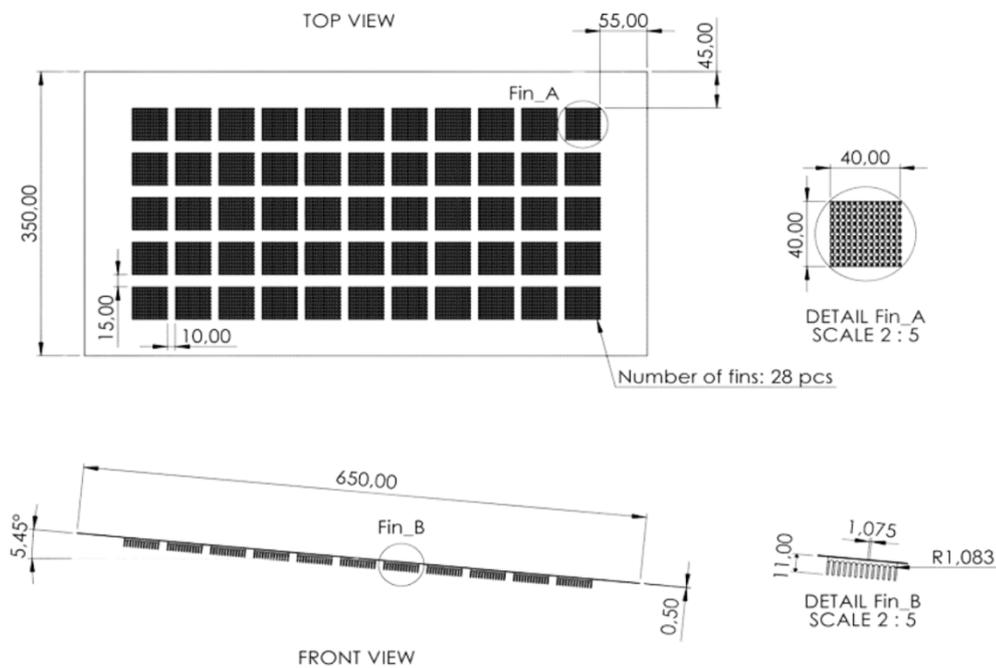
Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Ramanan *et al*, 2024), sifat termo-fisik simulasi *floating photovoltaic* adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Sifat termo-fisik material

Material	Massa jenis (kg/m ³)	Kapasitas panas spesifik (J/kg.K)	Konduktivitas termal (W/m.K)	Viskositas (kg/m.s)
Udara	1,225	1006,43	0,0242	1,79 x 10 ⁻⁵

Air	998,2	4182	0,6	$1,01 \times 10^{-3}$
Solar cell	2330	677	148	-
Aluminium	2719	871	202.4	-
Tembaga	8978	381	387,5	-

Dimensi sirip dibuat dengan ukuran 40 mm x 40 mm dengan ketebalan sirip yaitu 11 mm. Adapun material yang digunakan pada sirip yaitu aluminium. Sirip *cross-cut* ini kemudian dipasangkan pada bagian bawah panel surya dengan gambar teknik yang dapat dilihat pada gambar 3.2



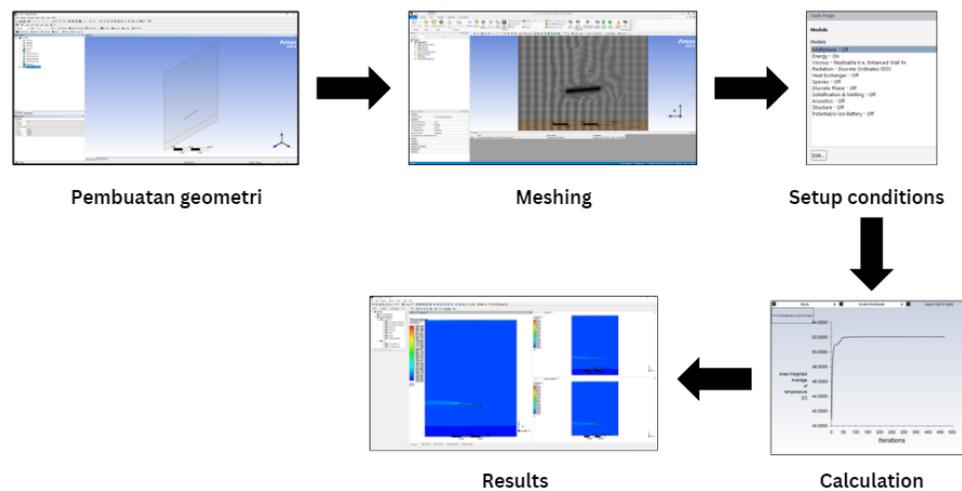
Gambar 3.2 Gambar teknik geometri panel surya dengan sirip *cross-cut* (mm)

Desain yang dipilih pada geometri panel surya dengan sirip *cross-cut* adalah sirip dengan susunan *inline*. Susunan *inline* dipilih karena berbentuk simetris, di mana dengan geometri simetris dapat membantu menyederhanakan dan mengurangi ukuran model. Mengurangi ukuran model dapat menguntungkan karena jumlah elemen *mesh* dan waktu komputasi yang dapat dihemat saat memecahkan persamaan untuk

model simulasi sehingga menjadikannya sebagai metode yang efisien untuk memecahkan model simulasi yang besar.

3.4 Metode Komputasi

Simulasi dilakukan dengan bantuan *software* Ansys Fluent. Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan pembuatan geometri, di mana nantinya akan dilakukan perakitan (*assembly*) antar komponen. Perakitan atau *assembly* yang dilakukan adalah pemasangan *heatsink* di bagian bawah panel surya, serta membuat domain fluida yaitu *water domain* dan *air domain*.



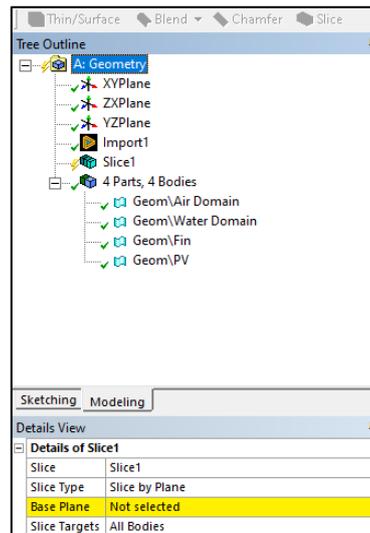
Gambar 3.3 Tahapan simulasi

3.4.1 *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* yang dilakukan pada penelitian ini ialah pembuatan geometri dengan *software* desain 3D. Setelah pembuatan geometri, langkah selanjutnya ialah merakit (*assembly*) komponen *heatsink* ke geometri panel surya. Geometri sirip akan dipasangkan pada bagian bawah geometri panel surya. Penyusunan geometri panel surya

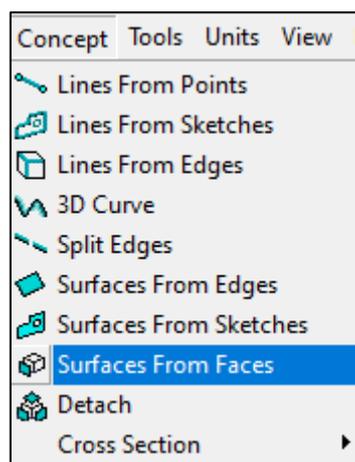
dengan sirip *cross-cut* dijelaskan pada gambar 3.2. Proses ini dilakukan menggunakan *software* Solidworks 2023.

Setelah desain geometri selesai, langkah selanjutnya ialah membuat geometri 2D dengan bantuan *software* *Design Modeler* pada *Ansys Workbench*. Pembuatan geometri 2D dilakukan dengan cara men-*slice* geometri. Menu *slice* tersedia di dalam *design modeler*.



Gambar 3.4 Metode potong dengan bidang datar

Setelah itu, memilih menu “*Surface from face*” pada menu *concept*. *Surface from face* berfungsi untuk membuat geometri menjadi 2D.



Gambar 3.5 Pembuatan *surface* berdasarkan hasil pemotongan geometri

Selanjutnya, melakukan proses *meshing*. Jenis *mesh* pada geometri yang dipilih yaitu *quadrilateral dominant* (2D). *Mesh* jenis ini digunakan karena sifatnya yang lebih fleksibel mengisi cela-cela yang sulit diisi oleh tipe *mesh* lainnya. Jumlah elemen *mesh* disesuaikan dengan kondisi simulasi. Di mana, jika terlalu banyak, hanya akan membebani proses komputasi.

3.4.2 Processing

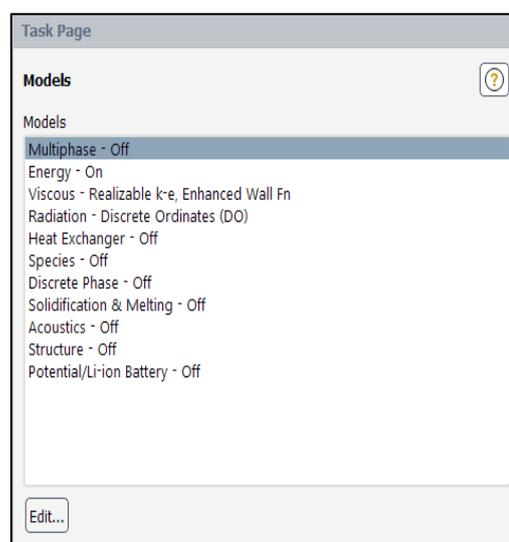
Setelah tahap *pre-processing* selesai, selanjutnya adalah proses *processing* yaitu melakukan *setup condition*. Pada tahap ini, dilakukan pemilihan model simulasi, jenis material, *cell condition*, dan *boundary condition*. Berikut ini merupakan tahapan dalam proses setup:

A. General

Tipe simulasi yang digunakan ialah *pressure-based* dengan *velocity formulation* yaitu *Absolute*. Kemudian, waktu yang diperlukan saat simulasi adalah ketika iterasi mencapai kondisi *steady*.

B. Models

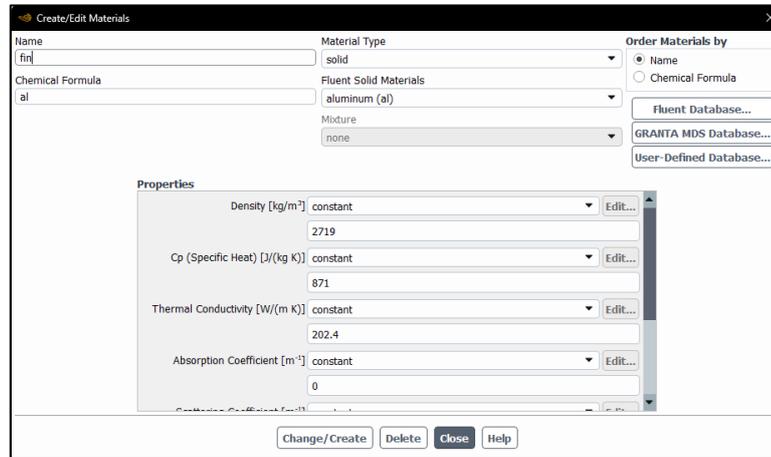
Pada setup models, yang akan dilakukan adalah mengaktifkan persamaan energi dan memilih model penyelesaian simulasi. Adapun model penyelesaian simulasi yang digunakan adalah k-epsilon.



Gambar 3.6 *Setup models* simulasi

C. Material setup

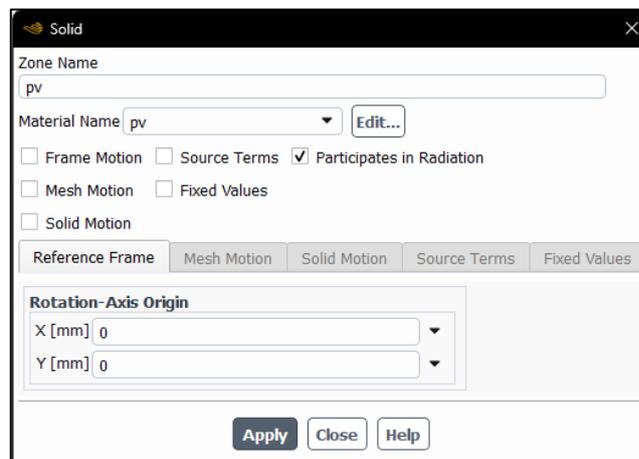
Pada setup ini, memilih jenis material yang digunakan, yaitu: udara, air, PV, serta material sirip pendingin yaitu aluminium dan tembaga.



Gambar 3.7 *Material setup* simulasi

D. Cell zone conditions

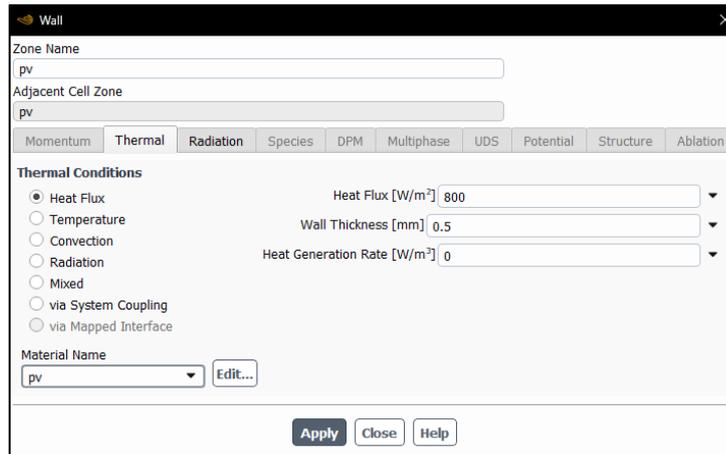
Pada setup ini, menentukan jenis material yang digunakan pada geometri seperti yang dijelaskan dalam tabel 3.1 tentang sifat termofisik untuk panel surya, sirip, dan masing-masing domainnya.



Gambar 3.8 *Cellzone setup* simulasi

E. Boundary condition

Boundary condition berfungsi untuk menentukan parameter-parameter atau kondisi batas simulasi. Dalam hal ini yaitu memasukkan nilai irradiansi/*heat flux*, kecepatan aliran fluida, dan temperatur *inlet* pada kedua domain.



Gambar 3.9 *Boundary condition setup* simulasi

E. *Run calculation*

Setelah menyelesaikan semua *setup*, selanjutnya yaitu melakukan *running calculation*. Proses *running* ini adalah proses perhitungan matematis yang dilakukan oleh computer berdasarkan jumlah iterasi yang diberikan. *Output* yang dihasilkan berupa grafik yang berfungsi untuk mengamati bahwa proses simulasi yang dilakukan sudah konvergen atau belum.

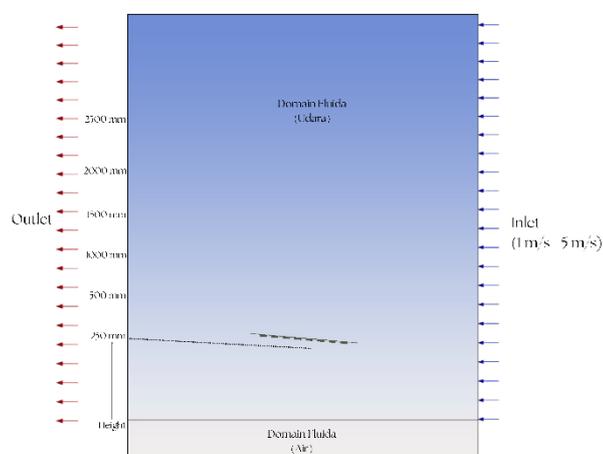
3.4.2. *Post-Processing*

Berdasarkan kondisi batas yang telah ditentukan, hasil dari simulasi FPV dengan penggunaan sirip *cross-cut* nantinya dapat dinyatakan dalam bentuk data yang kemudian diolah secara tabulasi, serta kontur temperatur dan kontur kecepatan.

3.5 **Kondisi Batas Simulasi *Floating Photovoltaic***

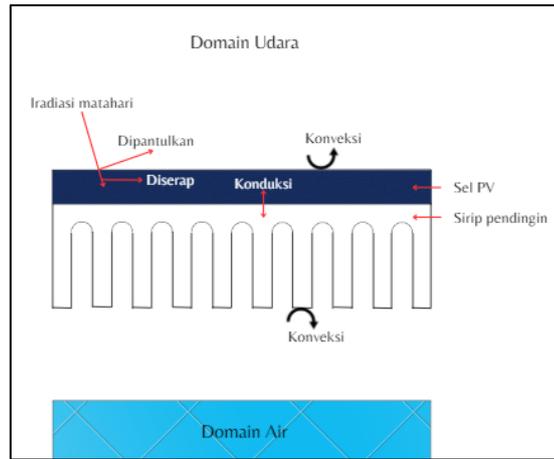
Kondisi batas dalam simulasi diperlukan untuk menghindari penyimpangan parameter yang dimasukkan maupun pelebaran pokok masalah agar penelitian tersebut lebih terarah dan memudahkan dalam pembahasan sehingga tujuan penelitian akan tercapai. Simulasi unjuk kerja yang akan dilakukan pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan ketinggian *floating photovoltaic* terhadap permukaan air yaitu 250 mm, 500 mm, 1000 mm, dan

1500 mm. Kemudian, memvariasikan kecepatan aliran udara sebesar 1 m/s sampai dengan 5 m/s, dengan variasi nilai irradiansi sebesar 600 W/m², 800 W/m², 1000 W/m², dan 1200 W/m². Selain itu, memvariasikan temperatur lingkungan pada *floating photovoltaic* dengan jarak 500 mm, yaitu temperatur udara-temperatur air (30 °C - 30 °C), temperatur udara-temperatur air (30 °C - 25 °C), temperatur udara-temperatur air (25 °C - 20 °C), dan temperatur udara-temperatur air (20 °C - 20 °C), serta melakukan simulasi variasi material sirip pendingin. Dari simulasi tersebut, kemudian dilakukan pengambilan data temperatur permukaan PV pada masing-masing percobaan.



Gambar 3.10 Kondisi batas simulasi

Model perpindahan panas pada simulasi melibatkan perpindahan panas konduksi, koveksi, dan radiasi. Irradiansi matahari yang datang mengenai permukaan panel surya, di mana Sebagian energi diserap (*absorption*) dan sebagian lainnya dipantulkan (*reflection*). Energi yang diserap menyebabkan peningkatan suhu pada panel, sehingga panas tersebut dipindahkan melalui konduksi ke sirip pendingin yang terpasang di bawahnya. Panas kemudian dilepaskan ke udara melalui konveksi dan juga disalurkan ke air untuk meningkatkan efisiensi pendinginan. Sirip pendingin berfungsi sebagai media yang membantu pelepasan panas lebih efektif, sehingga suhu panel dapat dikurangi. Dengan kombinasi pendinginan udara dan air, simulasi ini bertujuan untuk menjaga kinerja optimal panel surya. Model perpindahan panas simulasi kemudian diilustrasikan pada gambar 3.11



Gambar 3.11 Model perpindahan panas simulasi

BAB V PENDAHULUAN

5.1 Simpulan

Simulasi *Ansys fluent* yang dilakukan menghasilkan beberapa data yang digunakan untuk menganalisis performa variasi ketinggian *floating photovoltaic*, radiasi matahari, kecepatan udara, dan temperatur lingkungan terhadap penurunan temperatur permukaan PV, serta variasi material sirip. Berikut ini simpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian:

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan radiasi matahari sebesar 200 W/m^2 menaikkan temperatur permukaan PV sebesar $4,4^\circ\text{C}$. Temperatur lingkungan juga berpengaruh, di mana selisih $1,026^\circ\text{C}$ antara temperatur air dan udara menurunkan temperatur PV sebesar 1°C . Kecepatan udara yang lebih tinggi meningkatkan perpindahan panas dan menurunkan temperatur PV hingga $2,77^\circ\text{C}$. Sementara itu, kenaikan ketinggian FPV hanya menurunkan temperatur PV sekitar $0,5^\circ\text{C}$, dengan pendinginan optimal pada 1500 mm.
2. Perbandingan penurunan temperatur permukaan PV antara sirip aluminium dan sirip tembaga menunjukkan perbedaan hingga $3,17^\circ\text{C}$ dibandingkan dengan sirip aluminium. Rata-rata pengurangan temperatur permukaan PV dengan sirip aluminium yaitu $1,566^\circ\text{C}$ dan rata-rata pengurangan temperatur permukaan PV dengan sirip tembaga yaitu $4,744^\circ\text{C}$.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dilakukan untuk terus mengembangkan penelitian *floating photovoltaic* adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukannya pengujian secara eksperimental untuk turut memverifikasi hasil simulasi sesuai dengan kenyataan atau kondisi riil.
2. Perlu dilakukannya variasi sudut kemiringan *photovoltaic* berdasarkan *latitude* yang ada agar dapat dijadikan referensi internasional.
3. Perlu dilakukannya variasi arah angin agar mengetahui dampak arah angin terhadap penurunan temperatur rata-rata PV

DAFTAR PUSTAKA

- Ansys Fluent Theory Guide*. (2021). Ansys Inc.
- Arifin, Z., Suyitno, S., Tjahjana, D. D. D. P., Juwana, W. E., Putra, M. R. A., & Prabowo, A. R. (2020). The Effect of Heat Sink Properties on Solar Cell Cooling Systems. *Applied Sciences*, *10*(21), 7919. <https://doi.org/10.3390/app10217919>
- Ataman, A., & Arslanoğlu, N. (2024). Investigation of the cooling effect of wind on rooftop PV power plants. *Case Studies in Thermal Engineering*, *63*, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105295>
- Cahyono, G. R., Ansyah, P. R., & Awaly, N. Q. (2021). Pendinginan panel surya menggunakan kotak pendingin dan sirip pendingin. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, *13*(1). <https://doi.org/10.28989/angkasa.v13i1.947>
- Choi, S. M., Park, C.-D., Cho, S.-H., & Lim, B.-J. (2023). Effects of various inlet angle of wind and wave loads on floating photovoltaic system considering stress distributions. *Journal of Cleaner Production*, *387*, 135876. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135876>
- Feng, S., Shi, M., Yan, H., Sun, S., Li, F., & Lu, T. J. (2018). Natural convection in a cross-fin heat sink. *Applied Thermal Engineering*, *132*, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.049>
- Herlambang, Y. D., Prasetyo, B., Wahyono, W., Apriandi, N., Marliyati, M., & Sutanto, B. (2023). Unjukkerja Panel Surya Tipe Terapung untuk Pembangkit Listrik. *Jurnal Rekayasa Mesin*, *18*(3), 435. <https://doi.org/10.32497/jrm.v18i3.5069>
- Ibrahim, T., Abou Akrouh, M., Hachem, F., Ramadan, M., Ramadan, H. S., & Khaled, M. (2024). Cooling Techniques for Enhanced Efficiency of Photovoltaic Panels—Comparative Analysis with Environmental and Economic Insights. *Energies*, *17*(3), 713. <https://doi.org/10.3390/en17030713>
- Kim, S., Ko, H. S., & Shin, D. H. (2023). Fluid flow and heat transfer characteristics of corona wind in cross-cut finned channel. *International Journal of Thermal Sciences*, *184*, 107962. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107962>
- Kjeldstad, T., Lindholm, D., Marstein, E., & Selj, J. (2021). Cooling of floating photovoltaics and the importance of water temperature. *Solar Energy*, *218*, 544–551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.022>

- Krstic, M., Pantic, L., Djordjevic, S., Radonjic, I., Begovic, V., Radovanovic, B., & Mancic, M. (2024). Passive cooling of photovoltaic panel by aluminum heat sinks and numerical simulation. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102330. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102330>
- Kusumaningtyas, A. B., Nadhiroh, N., Sukatno, G. S., Siadari, H. P. R., & Dewantara, M. C. (2024). Analisis Daya Luaran Protipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung. *Seminar Nasional Teknik Elektro*, 10, 215–221.
- Lindholm, D., Selj, J., Kjeldstad, T., Fjær, H., & Nysted, V. (2022). CFD modelling to derive U-values for floating PV technologies with large water footprint. *Solar Energy*, 238, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.028>
- Liu, Z., Ma, C., Yang, Y., Li, X., Gou, H., & Folkard, A. M. (2024). Water temperatur and energy balance of floating photovoltaic construction water area—field study and modelling. *Journal of Environmental Management*, 365, 121494. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121494>
- Lubna, Sudarti, & Yushardi. (2021). POTENSI ENERGI SURYA FOTOVOLTAIK SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF. *Pelita : Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah*, 21(1), 76–79. <https://doi.org/10.33592/pelita.v21i1.1269>
- Maulana, A., Rachmanto, R. A., Hadi, S., & Arifin, Z. (2021). Photovoltaic Performance with Heat Sink from Copper and Aluminum Material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1096/1/012051>
- Nisar, H., Kashif Janjua, A., Hafeez, H., shakir, S., Shahzad, N., & Waqas, A. (2022). Thermal and electrical performance of solar floating PV system compared to on-ground PV system-an experimental investigation. *Solar Energy*, 241, 231–247. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.062>
- Rachmi, A., Prakoso, B., Hanny, B., Devi, S., & Winne. (2020). *Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS atap di Indonesia*. Indonesia Clean Energy Development (ICED).
- Ramanan, C. J., Lim, K. H., & Kurnia, J. C. (2025). Thermal behavior of floating photovoltaics: A comparison of performance at varying heights and benchmarking against land-based photovoltaics. *Applied Energy*, 388, 125642. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125642>
- Ramanan, C. J., Lim, K. H., Kurnia, J. C., Roy, S., Bora, B. J., & Medhi, B. J. (2024). Design study on the parameters influencing the performance of floating solar PV. *Renewable Energy*, 223, 120064. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120064>
- Rumanto, I., Sunaryo, S., & Irfan, A. (2021). ANALISIS COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) PENYEBARAN PANAS PADA DAPUR PELEBURAN ALUMUNIUM. *Device*, 11(1), 34–39. <https://doi.org/10.32699/device.v11i1.1785>
- Sekretariat Jenderal Dewarn Energi Nasional. (2023). *Laporan Analisis Neraca Energi Nasional*.

- Sjahrudin, C., & Bizzy, I. (2020). Pengaruh Peningkatan Efisiensi Pemasangan Heatsink pada Panel Photovoltaic Tipe Polycrystalline. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 20(2), 1–4. <https://doi.org/10.36706/jrm.v20i2.62>
- Sutanto, B., Iacovides, H., Nasser, A., Cioncolini, A., Afgan, I., Indartono, Y. S., Prasetyo, T., & Wijayanta, A. T. (2024). Design and analysis of passively cooled floating photovoltaic systems. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121801. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121801>
- Tina, G. M., & Bontempo Scavo, F. (2022). Energy performance analysis of tracking floating photovoltaic systems. *Heliyon*, 8(8), e10088. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10088>