

**ANALISIS KINERJA SISTEM *FLOATING PHOTOVOLTAIC THERMAL*
KAPASITAS 30 WP DENGAN DAN TANPA SIRIP *CROSS-CUT***

(Tesis)

Oleh

**OKY SANJAYA PUTRA
NPM 2225021008**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**ANALISIS KINERJA SISTEM *FLOATING PHOTOVOLTAIC THERMAL*
KAPASITAS 30 WP DENGAN DAN TANPA SIRIP *CROSS-CUT***

Oleh :

OKY SANJAYA PUTRA

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

MAGISTER TEKNIK

Pada

**Program Studi Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

ANALISIS KINERJA SISTEM *FLOATING PHOTOVOLTAIC THERMAL* KAPASITAS 30 WP DENGAN DAN TANPA SIRIP *CROSS-CUT*

Oleh: Oky Sanjaya Putra, Amrizal, Muhammad Irsyad

Kinerja modul fotovoltaik (PV) sangat dipengaruhi oleh temperatur kerja modul, di mana peningkatan temperatur menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi dan daya keluaran listrik. Pada sistem fotovoltaik terapung (*Floating Photovoltaic*, FPV), pengendalian temperatur menjadi aspek penting untuk meningkatkan unjuk kerja dan keandalan sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja termal modul serta pengaruh penurunan temperatur terhadap performa listrik pada sistem *Floating Photovoltaic Thermal* (FPV-T) berkapasitas 30 WP dengan penerapan sirip pendingin aluminium model *cross-cut*.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen skala laboratorium dengan tiga konfigurasi sistem, yaitu FPV-T tanpa sirip pendingin (*without fins*), FPV-T dengan sirip *cross-cut* tanpa perendaman (*non-immersed cross-cut fins*), dan FPV-T dengan sirip *cross-cut* terendam air sedalam 5 cm (*5 cm immersed cross-cut fins*). Pengujian dilakukan menggunakan *solar simulator* dengan intensitas radiasi yang dapat dikendalikan, sementara pengukuran temperatur permukaan modul dan daya keluaran listrik dilakukan secara periodik pada kondisi radiasi penuh (*full radiation*) sebesar 806,08 W/m² dan radiasi parsial (*half radiation*) sebesar 350,48 W/m².

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi FPV-T dengan sirip *cross-cut* terendam air sedalam 5 cm menghasilkan kinerja termal terbaik dibandingkan dua konfigurasi lainnya. Konfigurasi ini mampu menurunkan temperatur rata-rata modul sebesar 6,69 °C dan penurunan temperatur maksimum hingga 14,25 °C dibandingkan modul tanpa sirip pendingin. Penurunan temperatur tersebut berlangsung stabil pada kedua kondisi intensitas radiasi yang diuji, menunjukkan efektivitas mekanisme pendinginan berbasis konduksi dan konveksi alami air. Penurunan temperatur modul secara signifikan berkontribusi terhadap peningkatan daya keluaran listrik, dengan peningkatan maksimum mencapai 18,3%. Dengan demikian, penerapan sirip pendingin aluminium model *cross-cut* yang terendam air berpotensi meningkatkan kinerja termal, performa listrik, serta keandalan sistem *Floating Photovoltaic* secara keseluruhan. Analisis biaya investasi menunjukkan bahwa model tanpa pendingin memiliki biaya terendah sebesar Rp595.000., sedangkan model dengan sirip pendingin dan model sirip pendingin dengan air memiliki biaya lebih tinggi akibat penambahan komponen pendinginan sebesar Rp705.000. Secara keseluruhan bahwa model dengan sirip pendingin memberikan peningkatan kinerja yang sebanding dengan tambahan biaya investasi.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Floating PV-T, dan sirip pendingin cross-cut.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF A 30 WP FLOATING PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEM WITH AND WITHOUT CROSS-CUT FINS

By: Oky Sanjaya Putra, Amrizal, Muhammad Irsyad

The performance of Photovoltaic (PV) modules is strongly influenced by their operating temperature, where an increase in temperature leads to a reduction in energy conversion efficiency and electrical power output. In Floating Photovoltaic (FPV) systems, temperature control becomes a critical factor in improving system performance and reliability. This study aims to analyze the thermal performance of PV modules and its impact on electrical performance in a 30 WP Floating Photovoltaic Thermal (FPV-T) system employing aluminum cross-cut cooling fins.

The research method adopted is a laboratory-scale experimental approach with three system configurations: FPV-T without cooling fins, FPV-T with non-immersed cross-cut fins, and FPV-T with cross-cut fins immersed in water to a depth of 5 cm. The experiments were conducted using a solar simulator with controlled radiation intensity, while module surface temperature and electrical power output were measured periodically under full radiation conditions of 806.08 W/m² and partial radiation conditions of 350.48 W/m².

The results indicate that the FPV-T configuration with 5 cm immersed cross-cut fins provides the best thermal performance among the tested configurations. This configuration achieves an average module temperature reduction of 6.69 °C and a maximum temperature reduction of up to 14.25 °C compared to the module without cooling fins. The temperature reduction remains stable under both radiation conditions, demonstrating the effectiveness of cooling mechanisms based on heat conduction and natural convection in water. The reduction in module temperature significantly contributes to an increase in electrical power output, with a maximum improvement of 18.3%. Furthermore, the investment cost analysis shows that the system without cooling has the lowest cost at IDR 595,000, while the systems with cooling fins and water-immersed cooling fins incur higher costs due to the additional cooling components, reaching IDR 705,000. Overall, the application of aluminum cross-cut cooling fins provides performance enhancement that is proportional to the additional investment cost, indicating its potential to improve the thermal performance, electrical output, and reliability of Floating Photovoltaic systems.

Keywords: Solar Power Plant (PLTS), Floating PV-T, cross-cut cooling fins.

Judul Tesis : ANALISIS KINERJA SISTEM *FLOATING PHOTOVOLTAIC* THERMAL KAPASITAS 30 WP DENGAN DAN TANPA SIRIP *CROSS-CUT*

Nama Mahasiswa : *Oky Sanjaya Putra*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2325021008

Program Studi : Teknik Mesin


Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Prof. Anrizal, S. T., M. T., Ph.D
NIP. 197002021998031004



Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.
NIP. 197112142000121001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen, S.T., M.T.

NIP. 196906202000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Anggota Penguji : Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.

Penguji Utama I : Dr. Harmen, S.T., M.T.

Penguji Utama II : Dr. Amrul, S.T., M. T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian *Tesis* : 9 Januari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Tesis dengan judul “ ANALISIS KINERJA SISTEM *FLOATING PHOTOVOLTAIC THERMAL* KAPASITAS 30 WP DENGAN DAN TANPA SIRIP *CROSS-CUT* “ dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Peraturan Rektor No. 02 Tahun 2024.

Bandar Lampung, 10 Januari 2026

Yang membuat pernyataan



Oky Sanjaya Putra

NPM. 2325021008

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Tanjung Karang, pada Tanggal 01 Oktober 1991, sebagai anak pertama dari empat bersaudara, dari pasangan bapak I Ketut Suardika dan Ibu Elly Sartika. Dalam meraih jenjang Perguruan Tinggi penulisan melalui pendidikan formal, yaitu :

1. Sekolah Dasar (SDS) 01 Gula Putih Mataram, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulusan pada tahun 2004.
2. Sekolah Menengah Pertama Gula Putih Mataram, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulusan pada 2007.
3. Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Tumijajar, Tumijajar, Tulang Bawang Barat, Lampung dan lulusan pada tahun 2010.
4. Universitas Lampung , lampung dan lulusan pada tahun 2021

Pada tahun 2023 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Kemudian pada tahun 2025 penulis pernah melaksanakan Tugas Akhir *Tesis* dengan judul “ANALISIS KINERJA SISTEM *FLOATING PHOTOVOLTAIC THERMAL* KAPASITAS 30 WP DENGAN DAN TANPA SIRIP *CROSS-CUT*” pada tahun 2024-2025 dibawah bimbingan Prof. Amrizal, S. T., M. T.,Ph.D dan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T yang telah memberikan rahmat dan hidayah, serta lindungan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tesis dengan lancar dan tetap dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam tak lupa penulis sanjungkan kepada Nabi Muhammad S.A.W. yang telah membimbing umatnya menuju kehidupan yang berakhlak dan berilmu yang baik sehingga dapat menjalani kehidupan dengan baik dan benar. Tesis ini dibuat sebagai tanda hasil pengerjaan Tesis yang penulis lakukan. Diharapkan karya tulis ini dapat menjadi salah satu bentuk perkembangan dalam ilmu di bidang mekanika, terkhusus dalam bidang konversi energi. Tesis ini juga merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Semoga karya tulis ini dapat membawa manfaat bagi yang membaca dan yang mengutip serta dapat dijadikan acuan untuk studi-studi selanjutnya. Selesaiannya tesis ini tidak luput dari bantuan, bimbingan dan arahan dari semua pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Amrizal, S. T., M. T., Ph.D. sebagai Dosen Pembimbing I yang telah bersedia meluangkan waktu dan tenaga untuk membimbing penulis dalam penyusunan tesis ini.
2. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.
4. Dr. Amrul, S.T., M. T. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.
5. Terimakasih kepada Laboratorium Termodinamika yang sudah memfasilitasi penelitian tesis ini.
6. Orang tua penulis dan istri, Bapak I Ketut Suardika dan Ibu Elly Sartika serta Eka Marwati S.T. Atas segala kasih sayang, perjuangan dan

pengorbanan tulus, serta selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis dapat tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi di Teknik Mesin.

7. Saudara kandung penulis, Sucialita, Afrilia Anggraini dan Dika Danuarta yang selalu memberikan semangat, bantuan dan do'a untuk penulis.
8. Seluruh Dosen dan Staf di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
9. Teman-teman MTM 2023 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat.

Penulis menyadari bahwa isi Tesis ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan Tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 10 Januari
2026

Okky Sanjaya Putra

NPM 2325021008

MOTTO

“Penelitian bukan sekadar mencari hasil, melainkan proses memahami kebenaran melalui data dan nalar.”

“Setiap kesalahan eksperimen adalah langkah kecil menuju pemahaman yang lebih tepat.”

“Ilmu tidak menuntut kesempurnaan, tetapi kejujuran dalam proses pencarian.”

Okky Sanjaya Putra

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	2
KATA PENGANTAR.....	3
MOTTO	5
DAFTAR ISI.....	6
DAFTAR TABEL.....	9
DAFTAR GAMBAR.....	10
PENDAHULUAN.....	11
1.1 Latar Belakang	11
1.2 Identifikasi Masalah.....	13
1.3 Rumusan Masalah.....	13
1.4 Tujuan Penelitian	13
1.5 Batasan Masalah.....	14
1.6 Manfaat Penelitian	14
TINJAUAN PUSTAKA.....	15
2.1 Energi Surya.....	15
2.2 Photovoltaic	15
2.2.1 <i>Photovoltaic Tipe Monocrystalline</i>	16
2.2.2 <i>Photovoltaic Tipe Polycrystalline</i>	17
2.3 Sistem <i>Floating PV</i>	18
2.4 Sistem Pendingin Sirip.....	19
2.4.1 Desain dan Konfigurasi Sistem pendingin	20
2.4.2 Optimasi Sistem Pendingin	20
2.4.3 Perkembangan Teknologi Sistem pendingin.....	20
2.4.4 Sistem Pendingin <i>Cross Cut</i>	21
2.5 Perhitungan Daya dan Efisiensi pada <i>Photovoltaic</i>	22

2.6 Perpindahan Panas	23
2.6.1 Konduksi	24
2.6.2 Konveksi	26
2.6.3 Radiasi.....	27
2.7 Biaya Photovoltaic	28
2.7.1 Konsep Biaya Investasi (<i>Capital Cost</i>) pada Sistem Energi Surya	28
2.7.2 Biaya Investasi pada Sistem <i>Photovoltaic Thermal</i> (PVT).....	28
2.7.3 Biaya Investasi Sistem <i>Floating Photovoltaic</i> (<i>Floating PV</i>)	29
2.7.4 Biaya Investasi Sistem <i>Floating Photovoltaic Thermal</i> (<i>Floating PVT</i>).....	29
METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.2 Alat Dan Bahan	31
3.3 Perancangan Sistem Listrik.....	36
3.4 Diagram Alir (<i>Flow Chart</i>)	38
3.5 Prosedur Penelitian	39
3.5.1 Model 1 (Modul FPV-T <i>without fins</i>).....	40
3.5.2 Model 2 (Modul FPV-T <i>non immersed cross cut fins</i>).....	41
3.5.3 Model 3 (Modul FPV-T 5 cm <i>immersed cross cut fins</i>).....	42
3.6 Pengujian Variasi Model <i>Photovoltaic Thermal</i>	42
3.7 Pengujian Variasi Presentase Waktu Pengujian PV-T.....	43
3.8 Analisa Data	43
3.9 Pengaruh Variasi Model Pendingin pada <i>Photovoltaic Thermal</i> (PV-T) terhadap Temperatur	43
3.10 Pengaruh Variasi Model Pendingin pada <i>Photovoltaic Thermal</i> (PV-T) terhadap Besar Daya (Watt).....	43
3.10.1 Efisiensi Listrik <i>Photovoltaic Thermal</i>	44
3.10.2 Analisa Biaya	44
HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Pengaruh Variasi Model Pendingin pada <i>Photovoltaic Thermal</i> (PV-T) terhadap Temperatur	47

4.2 Pengaruh Variasi Model Pendingin pada <i>Photovoltaic Thermal</i> (PV-T) terhadap Besar Daya (<i>Watt</i>).....	51
4.3 Analisis Efisiensi Listrik.....	52
4.4 Analisis Biaya Investasi.....	55
KESIMPULAN DAN SARAN	58
5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Hasil Pengujian Temperatur Modul FPV-T pada Berbagai Konfigurasi Pendinginan.....	49
Tabel 2. Tabel Estimasi Biaya PV-T Tiap Model.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Photovoltaic tipe Monocrystalline</i> (Chen, 2015)	16
Gambar 2. <i>Photovoltaic tipe polycrystalline</i> (Musztyfaga-staszuk, 2025).....	17
Gambar 3. Model skematik fotovoltan terapung (FPV).(Mohd Syahrman Mohd Azmi dkk., 2014)	18
Gambar 4. Sistem Pendingin <i>Cross- cut</i> (C.Y. Khor, 2021).....	22
Gambar 5. Perpindahan panas konduksi (Bejan & D.Kraus, 2003).....	24
Gambar 6. Perpindahan panas radiasi (Rohsenow & Hartnett, n.d.).	28
Gambar 7. <i>polycrystalline photovoltaic</i>	32
Gambar 8. Solar Power Mater SPM-1116 SD.....	32
Gambar 9. <i>Temperature Recorder</i> Luntun BTM-420 SD	33
Gambar 10. Digital Watt Meter.....	34
Gambar 11. <i>Solar charge controller (PWM 12V/24V 30A - K-1688)</i>	35
Gambar 12. Baterai	35
Gambar 13. <i>Solar Simulator</i>	36
Gambar 14. Perancangan sistem listrik <i>Floating PV/T</i>	37
Gambar 15. Diagram alir penelitian (flow chart).....	39
Gambar 16. Variasi <i>Photovoltaic Thermal without fins</i>	41
Gambar 17. Variasi <i>Photovoltaic Thermal</i> dengan pendingin bagian bawah.....	41
Gambar 18. Variasi <i>Photovoltaic Thermal</i> dengan pendingin bagian atas.....	42
Gambar 19. Proses Pengujian.	46
Gambar 20. Grafik Perbandingan Suhu Pada Ketiga Model PV-T	47
Gambar 21. Perbandingan Temperatur FPV-T 5 cm <i>Immersed cross cut fins</i> pada Variasi Radiasi	50
Gambar 22. Pengaruh Variasi Model Pendingin Pada <i>Photovoltaic Thermal</i> (PV-T) Terhadap Besar Daya (<i>Watt</i>).	51

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemerintah Indonesia telah memperbarui arah kebijakan energi nasional melalui Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), yang menegaskan urgensi percepatan pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai langkah strategis dalam mencapai ketahanan dan kemandirian energi nasional (Margawadi, 2025). Regulasi ini menggantikan PP No. 79 Tahun 2014 dan mengarahkan bauran energi masa depan untuk semakin bergeser menuju sumber energi bersih sejalan dengan komitmen nasional terhadap pengurangan emisi. Hal ini mendorong perlunya pengembangan dan penggunaan energi alternatif dalam bentuk energi baru dan terbarukan (Zulfa dkk., 2018). Dengan adanya kebijakan tersebut, pemanfaatan energi surya menjadi salah satu prioritas yang didorong untuk memenuhi kebutuhan energi jangka panjang secara berkelanjutan.

Energi surya dipilih karena memiliki potensi yang sangat besar di Indonesia akibat letak geografis yang berada di garis khatulistiwa, memberikan intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun. Teknologi *Photovoltaic* (PV) telah menjadi metode paling luas digunakan dalam mengonversi energi matahari menjadi energi listrik karena bersifat bersih, modular, mudah diimplementasikan, dan tidak menghasilkan emisi saat beroperasi (Langer & Quist, 2021). Namun demikian, teknologi PV masih memiliki keterbatasan mendasar, yakni penurunan efisiensi akibat peningkatan suhu modul selama operasi. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa efisiensi listrik modul PV dapat menurun signifikan ketika suhu panel meningkat, karena kenaikan suhu mengurangi tegangan keluaran sel surya (Nalis dkk, 2023; Panda dkk, 2021).

Kondisi tersebut menjadikan pendinginan modul PV sebagai kebutuhan penting untuk menjaga performa sistem. Penelitian-penelitian terkait pendinginan aktif dan pasif menunjukkan bahwa pengaturan manajemen panas mampu meningkatkan output listrik dan memperpanjang umur modul PV (Sharaf dkk, 2022). Sistem

pendinginan berbasis air dan penggunaan sirip pendingin (*fins*) merupakan beberapa metode yang terbukti efektif menurunkan suhu panel secara signifikan (Kim & Kim, 2009; Seyfi S., 2021).

Dalam konteks pengembangan teknologi energi terbarukan, sistem *Floating Photovoltaic Thermal* (FPV/T) menjadi alternatif inovatif karena memanfaatkan badan air sebagai media penyerap panas alami. Sistem ini tidak hanya meningkatkan pendinginan modul PV melalui kontak termal dengan air, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan energi panas yang biasanya terbuang melalui integrasi sistem termal, sehingga menghasilkan kombinasi energi listrik dan termal secara simultan (Seyfi S., 2021). Penggunaan sistem FPV/T menjadi sangat relevan di wilayah tropis seperti Indonesia, di mana suhu lingkungan cenderung tinggi sehingga peningkatan suhu panel sangat mempengaruhi kinerja PV (Science, 2024).

Lebih lanjut, integrasi sirip pendingin model *cross-cut* dalam sistem FPV/T menawarkan keunggulan dalam peningkatan perpindahan panas. Penelitian menunjukkan bahwa desain sirip *cross-cut* mampu meningkatkan koefisien konveksi dan memperluas area perpindahan panas sehingga menurunkan suhu panel lebih efektif dibandingkan sirip datar atau desain *fins* lainnya (Kim & Kim, 2009; Seyfi, 2021). Kombinasi ini memberikan peluang signifikan untuk meningkatkan efisiensi termal dan stabilitas operasi modul PV dalam kondisi iklim panas.

Melalui penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh penerapan pendingin air dengan sirip *cross-cut* pada sistem *Floating Photovoltaic Thermal* (FPV/T) kapasitas 30 WP. Secara khusus, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja termal dan efisiensi listrik yang dapat dicapai, serta mengetahui biaya investasi model PV-T menggunakan sirip *cross cut*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi PV-T yang lebih efisien, stabil, dan ekonomis, serta mendukung pencapaian target energi nasional sesuai PP No. 40 Tahun 2025.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan kondisi operasional sistem fotovoltaik, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan utama sebagai berikut:

1. Efisiensi modul *Photovoltaic* (PV) mengalami penurunan seiring meningkatnya suhu permukaan modul, sehingga diperlukan upaya pengendalian temperatur untuk mempertahankan kinerja konversi listrik.
2. Sistem pendinginan yang efektif dibutuhkan untuk menjaga stabilitas operasi pada teknologi *Photovoltaic Thermal* (PV-T) agar panas berlebih dapat dikelola secara optimal dan tidak memengaruhi performa sistem.
3. Sistem *Floating Photovoltaic* (FPV) memiliki potensi sebagai media pendinginan alami yang dapat menurunkan suhu modul PV, namun efektivitas mekanisme ini perlu dianalisis lebih lanjut dalam konteks aplikasi PV-T.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah perbedaan kinerja termal modul fotovoltaik pada tiga konfigurasi sistem FPV-T tanpa sirip pendingin (*without fins*), FPV-T dengan sirip *cross-cut* tanpa perendaman (*non-immersed cross-cut fins*), dan FPV-T dengan sirip *cross-cut* terendam air sedalam 5 cm (*5 cm immersed cross-cut fins*) berdasarkan parameter selisih temperatur permukaan modul yang diukur selama pengujian pada kondisi iradiasi yang sama?
2. Bagaimana perbandingan efisiensi listrik yang dihasilkan dari ketiga model uji Floating PV-T tersebut?
3. Berapa besar biaya investasi yang diperlukan pada masing-masing model uji Floating PV-T?

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis perbedaan suhu kerja dari tiga model uji Floating PV-T dengan variasi sistem pendingin.

2. Mengukur dan membandingkan efisiensi listrik yang dihasilkan oleh masing-masing model uji.
3. Mengevaluasi biaya investasi pada ketiga model uji Floating PV-T serta menilai pengaruhnya terhadap aspek keekonomian sistem.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian yang dilakukan menggunakan 3 unit panel surya *Polycrystalline* dengan kapasitas 30 WP.
2. Desain sistem pendingin yang diteliti adalah model sirip *cross-cut* berbahan aluminium.
3. Analisis biaya yang dilakukan hanya mencakup biaya material dan instalasi sistem FPV/T, tanpa memperhitungkan biaya operasional jangka panjang.
4. Penelitian yang dilakukan secara *indoor* menggunakan *solar simulator* di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan data empiris terkait performa termal dan elektrik dari berbagai konfigurasi sistem *Floating* PV-T.
2. Menjadi referensi teknis bagi pengembangan sistem pendingin PV-T, terutama untuk aplikasi pada iklim tropis yang memiliki intensitas radiasi tinggi.
3. Menyediakan informasi mengenai kelayakan biaya dan potensi efisiensi, sehingga dapat digunakan sebagai dasar perencanaan investasi dan pengembangan teknologi energi surya yang lebih efisien dan ekonomis.
4. Mendukung implementasi kebijakan energi nasional, khususnya dalam upaya peningkatan kontribusi energi terbarukan sebagaimana diarahkan dalam PP No. 40 Tahun 2025.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya

Energi radiasi matahari merupakan salah satu bentuk energi alternatif yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan guna menggantikan energi yang dihasilkan oleh minyak bumi (Sucipta, 2010). Energi alternatif adalah energi yang dapat digunakan untuk menggantikan sumber energi dari bahan bakar konvensional. Salah satu energi alternatif yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi matahari atau sering disebut dengan energi surya. Energi surya merupakan energi yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan polutan. Energi surya dapat diubah menjadi energi termal dan energi listrik. Energi termal memanfaatkan radiasi matahari dengan menggunakan kolektor surya. Sedangkan energi listrik memanfaatkan sel silikon untuk menyerap cahaya matahari yang dikonversikan menjadi energi listrik (Amrizal, 2019). Potensi energi panas matahari di Indonesia sekitar $4,8 \text{ kWh/m}^2$ per hari atau setara dengan 112 ribu GWp. Namun, saat ini energi matahari yang sudah dimanfaatkan hanya sekitar 49 MWp. Ini berarti, potensi energi matahari yang sudah dimanfaatkan masih jauh dari angka 1%.

2.2 Photovoltaic

Photovoltaic adalah rangkaian sel surya yang disusun secara seri atau paralel untuk meningkatkan tegangan atau arus yang dihasilkan agar sesuai untuk kebutuhan sistem daya beban. Untuk memperoleh output energi listrik yang optimal, permukaan modul surya harus selalu menghadap matahari. Energi listrik yang dihasilkan oleh *Photovoltaic* berbentuk arus searah (DC) yang kemudian akan diubah menjadi arus bolak-balik (AC) (Safitri, 2020). Adapun cara kerja *Photovoltaic*, yaitu penyerapan cahaya oleh material semikonduktor, penciptaan serta pemisahan muatan positif dan negatif yang bebas ke wilayah lain dari sel surya untuk menghasilkan tegangan dalam sel surya, pengalihan muatan terpisah tersebut ke terminal listrik dalam bentuk aliran energi listrik. Secara garis besar *Photovoltaic* dibagi menjadi 2 tipe, yaitu *monocrystalline* dan *polycrystalline*.

2.2.1 *Photovoltaic Tipe Monocrystalline*

Photovoltaic tipe monocrystalline terbuat dari batangan kristal silikon murni yang diiris tipis-tipis atau terbuat dari bentuk silikon yang sangat murni, membuatnya menjadi bahan paling efisien untuk konversi sinar matahari menjadi energi (Chen, 2015). Panel surya *monocrystalline* memiliki warna hitam khas (terbuat dari silikon murni) dan berbentuk bundar atau segi delapan (segi empat dengan sudut-sudut yang terpotong). Adapun keunggulan dan kelemahan dan cara pembuatan sel surya *monocrystalline* yaitu:

2.2.1.1 Keunggulan sel surya *Monocrystalline*

- Monocrystalline* memiliki tingkat efisiensi tertinggi pada 15-20%.
- Monocrystalline* membutuhkan lebih sedikit ruang dibandingkan dengan jenis lain karena efisiensi yang tinggi.
- Jenis sel surya *monocrystalline* dikenal paling awet, dan kebanyakan pabrikan yang menjual akan memberikan garansi 25 tahun.
- Monocrystalline* performanya lebih baik dari *polycrystalline* pada saat cuaca mendung, membuat sel jenis ini ideal untuk daerah yang sering dilanda hujan.

2.2.1.2 Kelemahan sel surya *Monocrystalline*

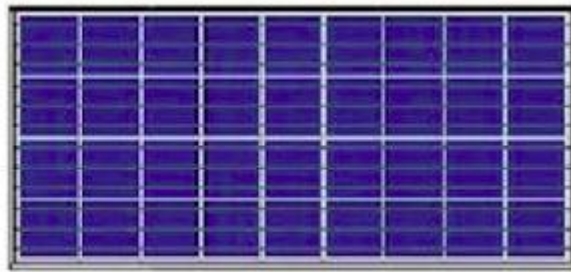
- Monocrystalline* merupakan sel surya paling mahal di pasar, jadi tidak masuk dalam anggaran semua orang.
- Tingkat kinerja cenderung menurun saat peningkatan suhu ekstrem. Namun, itu adalah kerugian kecil bila dibandingkan dengan jenis sel surya lainnya.
- Terdapat banyak limbah ketika sel silikon dipotong selama pembuatan



Gambar 1. *Photovoltaic tipe Monocrystalline* (Chen, 2015)

2.2.2 Photovoltaic Tipe Polycrystalline

Jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur / dicairkan kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikonnya tidak sempurna pada sel surya *monocrystalline*, karenanya sel surya yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 13% - 16%(Musztyfaga-staszuk, 2025).



Gambar 2. Photovoltaic tipe polycrystalline (Musztyfaga-staszuk, 2025)

Tidak seperti panel surya berbasis *monocrystalline*, panel surya *polycrystalline* tidak membutuhkan proses Czochralski. Silikon mentah dilebur dan dituangkan ke dalam cetakan persegi, yang didinginkan dan dipotong menjadi wafer persegi. Adapun keunggulan dan kelemahan dan cara pembuatan sel surya *monocrystalline* yaitu:

2.2.1.1 Keunggulan Polycrystalline

- a. Proses yang digunakan untuk membuat silikon *polycrystalline* lebih sederhana dan lebih murah.
- b. Jumlah limbah silikon yang dihasilkan pada panel surya *polycrystalline* juga lebih sedikit dibandingkan dengan *monocrystalline*.

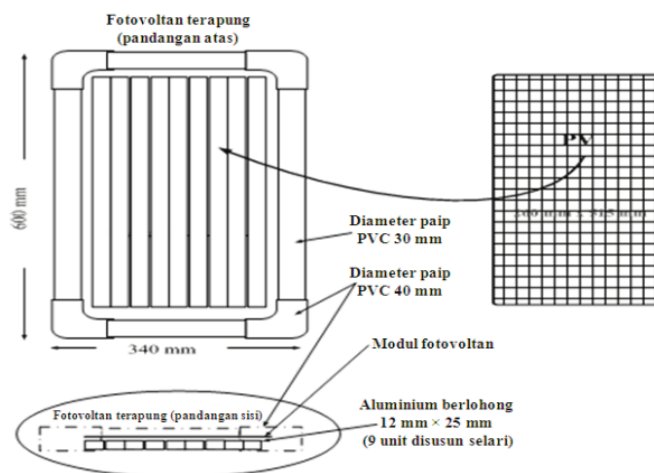
2.2.1.2 Kekurangan Polycrystalline

- a. Efisiensi panel surya berbasis *polycrystalline* biasanya 13-16%. Karena kemurnian silikon yang lebih rendah, panel surya *polycrystalline* tidak seefisien panel surya *monocrystalline*.
- b. Panel surya *polycrystalline* cenderung memiliki toleransi panas sedikit lebih rendah daripada panel surya *monocrystalline*.

Secara teknis ini berarti bahwa *polycrystalline* performanya sedikit lebih buruk daripada panel surya *monocrystalline* pada suhu tinggi. Panas dapat mempengaruhi kinerja panel surya dan memperpendek masa hidupnya.

2.3 Sistem *Floating PV*

Fotovoltaik terapung (FPV - *Floating Photovoltaic*) telah muncul sebagai solusi inovatif dalam meningkatkan efisiensi sistem fotovoltaik. Pada sistem ini, modul fotovoltaik dipasang di atas permukaan air, sehingga panas yang dihasilkan di bagian belakang modul dapat diserap oleh air. Penelitian menunjukkan bahwa metode ini mampu menurunkan suhu operasi modul dan meningkatkan efisiensi konversi energi. Selain itu, FPV memiliki keunggulan dalam mengurangi penggunaan lahan, yang merupakan salah satu keterbatasan utama pada instalasi fotovoltaik konvensional (CPV - *Conventional Photovoltaic*). Sistem FPV ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga membantu memanfaatkan ruang perairan yang tidak digunakan, seperti waduk dan danau (Mohd Syahrman Mohd Azmi dkk., 2014).



Gambar 3. Model skematik fotovoltaik terapung (FPV). (Mohd Syahrman Mohd Azmi dkk., 2014)

Perkembangan teknologi FPV selanjutnya mengarah pada sistem *Floating Photovoltaic Thermal* (FPVT), yaitu sistem hibrida yang mengombinasikan pembangkitan energi listrik dan pemanfaatan energi panas secara simultan. Dalam sistem FPVT, panas berlebih yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik dialirkan ke

media fluida, umumnya air, yang bersirkulasi pada bagian belakang modul. Mekanisme ini tidak hanya berfungsi sebagai sistem pendingin aktif untuk menjaga temperatur kerja modul tetap rendah, tetapi juga memungkinkan pemanfaatan energi termal yang dihasilkan untuk kebutuhan tertentu (Manssouri dkk., 2021).

Secara teoritis, peningkatan suhu modul fotovoltaik menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan efisiensi listrik akibat perubahan karakteristik material semikonduktor. Oleh karena itu, penerapan sistem FPVT mampu mempertahankan performa listrik modul dengan cara menekan kenaikan suhu operasi. Keunggulan sistem terapung semakin diperkuat oleh sifat termal air yang memiliki kapasitas panas tinggi, sehingga proses penyerapan panas berlangsung lebih stabil dan efektif dibandingkan sistem berbasis darat.

Lebih lanjut, sistem FPVT menawarkan peningkatan efisiensi energi total (*overall energy efficiency*), karena energi radiasi matahari dimanfaatkan secara optimal dalam bentuk energi listrik dan energi panas. Dengan karakteristik tersebut, FPVT dipandang sebagai teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan dibandingkan sistem FPV konvensional maupun sistem PVT konvensional di darat. Selain aspek energi, penerapan FPVT pada perairan juga berpotensi memberikan manfaat tambahan berupa pengurangan laju evaporasi air serta peningkatan stabilitas termal lingkungan perairan.

2.4 Sistem Pendingin Sirip

Sistem pendingin model sirip merupakan salah satu perangkat penting dalam pengelolaan panas untuk berbagai aplikasi, terutama di bidang elektronik dan sistem pendinginan. Sebagai komponen yang berfungsi untuk mengalirkan panas dari suatu perangkat menuju fluida (biasanya udara atau cairan), sistem pendingin memiliki peran penting dalam menjaga suhu optimal pada perangkat, serta menghindari overheating yang dapat menyebabkan kerusakan komponen.

2.4.1 Desain dan Konfigurasi Sistem pendingin

Penelitian mengenai desain sistem pendingin terus berkembang untuk meningkatkan performa termal. Beberapa konfigurasi umum sistem pendingin antara lain adalah sistem pendingin sirip pelat, sistem pendingin sirip pin, dan sistem pendingin berbilah, yang masing-masing memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri dalam pengelolaan perpindahan panas. (Adrian, 2013) menekankan pentingnya desain sirip pada sistem pendingin yang dapat memengaruhi distribusi aliran udara dan perpindahan panas. Desain yang lebih kompleks, seperti sirip melengkung atau sirip mikro (Nur dkk., 2024), juga telah terbukti meningkatkan efisiensi pengelolaan panas (Hussain & Harrison, 2015).

2.4.2 Optimasi Sistem Pendingin

Optimasi sistem pendingin untuk mencapai performa termal yang lebih baik dilakukan dengan pendekatan numerik dan eksperimen. Studi oleh (Sahin & Demir, 2008) memodelkan optimasi desain sirip sistem pendingin dengan pendekatan CFD (*Computational Fluid Dynamics*), yang memungkinkan perancangan bentuk geometri sistem pendingin yang lebih optimal untuk berbagai kondisi aliran fluida. Pentingnya korelasi antara faktor-faktor desain, seperti panjang sirip, lebar, tinggi, dan ketebalan, juga dibahas oleh (Kim & Kim, 2009). Mereka menunjukkan bahwa optimasi desain dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas hingga 30%, terutama pada aplikasi dengan batasan daya pemompaan konstan.

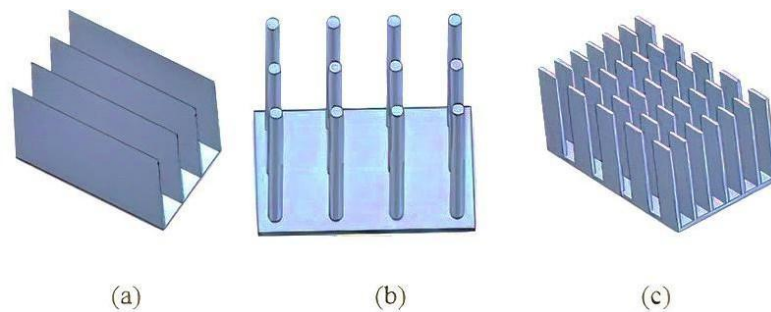
2.4.3 Perkembangan Teknologi Sistem pendingin

Perkembangan teknologi terkini membawa inovasi baru pada sistem sistem pendingin, termasuk penggunaan *microchannel* sistem pendingin yang digunakan pada perangkat elektronik berdaya tinggi seperti prosesor dan LED (Lee & Garimella, 2008). *Microchannel* sistem pendingin menawarkan peningkatan signifikan dalam efisiensi perpindahan panas dengan memanfaatkan luas permukaan yang besar dalam volume kecil. Selain itu, inovasi lain seperti Aplikasi sistem pendingin dalam *Floating Photovoltaic Thermal system* (F-PVT), misalnya, memanfaatkan pendinginan aktif melalui aliran air atau cairan lain untuk meningkatkan kinerja termal dari panel surya (Rukman dkk., 2022).

2.4.4 Sistem Pendingin *Cross Cut*

Penelitian tentang kinerja sistem pendingin dalam kondisi aliran fluida terus berkembang seiring dengan kebutuhan peningkatan efisiensi dalam pengelolaan panas pada berbagai aplikasi teknologi. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas adalah dengan melakukan modifikasi pada desain sistem pendingin. Beberapa penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya potongan melintang sebagai salah satu parameter desain yang memengaruhi performa termal sistem pendingin dalam aliran paralel. (Seyfi S., 2021) mengungkapkan hasil eksperimennya bahwa berbagai parameter desain seperti panjang, posisi, dan jumlah potongan melintang dapat mempengaruhi kinerja sistem pendingin secara signifikan. Studi ini juga menunjukkan bahwa panjang potongan melintang adalah faktor paling dominan dalam mempengaruhi performa termal. Penurunan tekanan dan ketahanan termal sistem pendingin termal dalam kisaran tertentu menunjukkan bahwa penyesuaian parameter ini dapat berkontribusi pada peningkatan efisiensi pendinginan.

Selain itu, dengan mengembangkan korelasi antara faktor pemasangan dan bilangan Nusselt, beberapa penelitian lain, seperti yang dilakukan oleh (Kim & Kim, 2009), telah membuktikan bahwa penggunaan korelasi tersebut dapat mempermudah proses perbandingan kinerja berbagai jenis sistem pendingin. Melalui pemodelan numerik dan eksperimental, sistem pendingin potongan melintang dapat dibandingkan dengan jenis sistem pendingin lainnya, seperti sistem pendingin sirip pelat dan sistem pendingin sirip persegi.



Gambar 4. Sistem Pendingin *Cross-cut* (C.Y. Khor, 2021)

Studi ini mendukung temuan sebelumnya bahwa optimasi desain sistem pendingin berdasarkan parameter geometris, seperti panjang potongan melintang, dapat memberikan peningkatan signifikan dalam efisiensi termal. Pada kondisi daya pemompaan konstan, hasil peta kontur yang dihasilkan menunjukkan bahwa sistem pendingin potongan melintang yang dioptimalkan memiliki kinerja termal yang lebih unggul dibandingkan desain tradisional lainnya.

2.5 Perhitungan Daya dan Efisiensi pada *Photovoltaic*

Untuk mengetahui besarnya daya yang dihasilkan panel surya, maka terlebih dahulu harus mengetahui daya yang diterima (daya input). Daya input adalah perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area PV, dapat dirumuskan dengan Persamaan 2.1.

$$P_{in} = I_r \cdot A \quad (2.1)$$

dimana :

P_{in} : daya input akibat *irradiance* matahari (Watt)

I_r : intensitas radiasi matahari (Watt/m²)

A : luas permukaan *Photovoltaic* (m²)

Untuk mengetahui besarnya daya yang dihasilkan solar cell (P_{out}) yaitu tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) dikali dengan arus hubung singkat (I_{sc}) dan *Fill Factor* yang dihasilkan oleh *Photovoltaic*, dapat dirumuskan pada Persamaan 2.2

$$P_{out} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (2.2)$$

dimana :

P_{out} : Daya yang dihasilkan oleh *solar cell* (Watt)

V_{oc} : Tegangan rangkaian terbuka pada *solar cell* (Volt)

I_{sc} : Arus hubung singkat pada *solar cell* (Ampere)

FF : *Fill Factor*

Untuk mendapatkan nilai *Fill Factor* dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 2.3.

$$FF = \frac{V_{oc} - 1n(V_{oc} + 0.72)}{V + 1} \quad (2.3)$$

Efisiensi listrik yang didapatkan dari panel surya merupakan perbandingan daya yang dibangkitkan oleh panel surya dengan energi input yang diperoleh dari irradiance cahaya matahari. Efisiensi yang digunakan adalah efisiensi saat pengambilan data. Untuk menghitung efisiensi listrik yang dihasilkan panel surya dapat dirumuskan dengan Persamaan 2.4.

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} \times 100\% \quad (2.4)$$

sehingga persamaan 2.4 menjadi seperti Persamaan 2.5

$$\eta_{el} = \frac{V \times I}{A \times G} \times 100\% \quad (2.5)$$

dimana :

η_{el} : efisiensi listrik (%)

V : tegangan listrik PV (V)

I : arus listrik PV (V)

A : luas PV (m²)

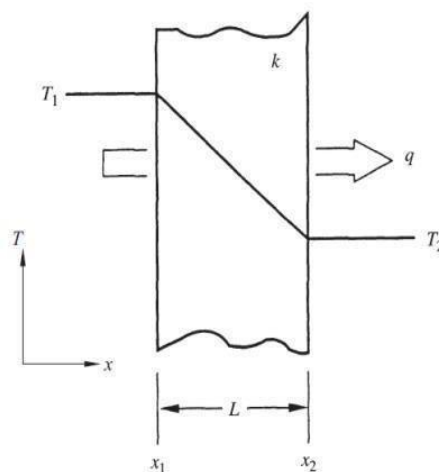
G : intensitas radiasi matahari (Watt/m²)

2.6 Perpindahan Panas

Heat transfer (perpindahan panas) adalah suatu ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur diantara benda atau material. Ilmu termodinamika telah mengajarkan bahwa panas adalah energi yang berpindah. Sedangkan dalam ilmu perpindahan panas tidak hanya menjelaskan perpindahan panas dari suatu benda ke benda lain tetapi juga mengajarkan laju perpindahan panas pada kondisi yang berbeda-beda. Perpindahan panas dapat dibedakan menjadi tiga bergantung dengan proses perpindahannya, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.6.1 Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah proses perpindahan energi berupa panas yang terjadi dari daerah bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah dalam satu medium atau antara medium-medium. Perpindahan panas dapat juga diartikan sebagai pengangkutan kalor melalui suatu jenis zat dan terjadi di dalam bahan material. Arah aliran energi panas adalah dari titik yang bersuhu tinggi ke titik yang bersuhu rendah (Bejan & D.Kraus, 2003). Perpindahan panas konduksi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perpindahan panas konduksi (Bejan & D.Kraus, 2003)

Perpindahan panas dengan cara konduksi yang diusulkan Fourier menyatakan bahwa hasil laju perpindahan panas dengan cara konduksi sama dengan konduksi termal dikalikan dengan luas penampang dimana panas mengalir dengan cara konduksi dan gradien pada suhu penampang. Untuk persamaan perpindahan panas konduksi satu dimensi dapat dirumuskan dengan Persamaan 2.6

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{L} \quad (2.6)$$

dimana:

q : laju perpindahan panas konduksi (Watt)

k : koefisien konduktivitas termal (W/m.°C)

A : luas penampang (m²)

dT : perbedaan Temperatur di T_1 dan T_2 (K)

L : tebal area (m)

Perpindahan panas pada sistem sirip (*fin*) terjadi melalui kombinasi konduksi di dalam bahan sirip dan konveksi dari permukaan sirip ke fluida sekitar. Pada sirip jenis crosscut, yakni sirip dengan potongan melintang yang terdistribusi sepanjang panjang sirip, fenomena konduksi tetap menjadi mekanisme utama dalam distribusi panas dari dasar sirip ke ujung. Potongan melintang ini meningkatkan luas permukaan total dan memperpendek jalur aliran panas secara lokal, sehingga mempercepat konduksi lateral serta mendistribusikan panas lebih merata. Secara matematis, laju perpindahan panas akibat konduksi dan konveksi pada sirip dapat didekati dengan rumus di halaman selanjutnya.

$$Q = \sqrt{hPkA_c} \cdot (T_b - T_\infty) \cdot \tanh(mL) \quad (2.7)$$

dengan:

Q = laju perpindahan panas (W),

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

P = keliling penampang sirip (m),

k = konduktivitas termal bahan sirip ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$),

A_c = luas penampang sirip (m^2),

T_b = suhu dasar sirip (K),

T_∞ = suhu lingkungan sekitar (K),

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}},$$

L = panjang sirip (m).

Pada sirip *cross-cut*, koefisien perpindahan panas efektif (h_{eff}) dan luas permukaan efektif (A_{eff}) mengalami peningkatan karena aliran turbulen yang diinduksi oleh celah melintang. Hal ini menyebabkan rumus perpindahan panas disesuaikan menjadi:

$$Q_{crosscut} \approx \eta \cdot h_{eff} \cdot A_{eff} \cdot (T_b - T_\infty) \quad (2.8)$$

dimana :

$Q_{crosscut}$ = laju perpindahan panas pada sirip crosscut (W),

η = efisiensi sirip (tanpa satuan)

h_{eff} = koefisien perpindahan panas konveksi efektif ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),

A_{eff} = luas permukaan efektif sirip crosscut (m^2),

T_b = suhu dasar sirip (K)

T_{∞} = suhu lingkungan sekitar (K).

Studi oleh (Kim & Kim, 2009) menunjukkan bahwa penggunaan sirip dengan desain *crosscut* secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi termal sistem pendingin dengan mengurangi resistansi termal hingga 26% dibandingkan sirip konvensional. Potongan melintang tersebut tidak hanya memperpendek lintasan panas secara konduktif, tetapi juga meningkatkan interaksi permukaan terhadap fluida, yang berkontribusi terhadap konveksi yang lebih tinggi.

2.6.2 Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan sebuah benda padat dengan fluida (cairan/gas) yang mengalir dan menyentuh permukaan. Perpindahan panas konveksi hanya terjadi pada permukaan material. Perpindahan panas konveksi dibagi menjadi dua yaitu konveksi paksa (*forced convection*) dan konveksi alami (*natural*). Konveksi paksa adalah panas konveksi yang berlangsung dengan bantuan peralatan mekanis, misalnya adalah udara yang dihisap di atas plat. Konveksi alami adalah perpindahan panas secara konveksi yang terjadi karena densitas fluida berubah akibat adanya pemanasan. (Rokhadi, 2018).

Parameter yang mempengaruhi perpindahan panas konveksi adalah panjang sistem (L), konduktivitas termal fluida (k), kecepatan fluida (V), kerapatan (ρ), viskositas (μ), panas jenis (C_p), dan faktor lain yang berhubungan dengan cara pemanasan. Laju perpindahan panas konveksi dengan suatu fluida dapat dirumuskan dengan persamaan 2.9.

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

dimana:

q : laju perpindahan panas (Watt)

h : koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2.K$)

A : luas penampang (m^2)

ΔT : perbedaan suhu antara permukaan dan fluida (K)

2.6.3 Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah penyaluran energi berupa gelombang elektromagnetik (photon) yang terjadi dari suatu zat ke zat lain. Perpindahan panas radiasi merambat tanpa melalui perantara. Perpindahan panas radiasi dapat digambarkan pada Gambar 6. Persamaan dasar untuk perpindahan panas radiasi dapat dirumuskan dengan Persamaan 2.10.

$$Q = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.10)$$

dimana:

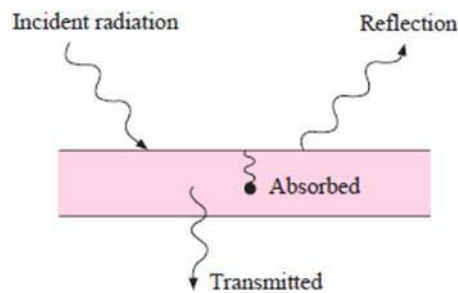
- Q : panas yang dipancarkan (Watt)
- A : luas penampang permukaan (m^2)
- T : temperatur permukaan benda ($^{\circ}C$)
- σ : konstanta Steven Boltzman ($W/m^2.K^4$)
- ε : emisivitas permukaan benda (0 s.d. 1)

Nilai emisivitas (ε) untuk benda hitam sempurna adalah 1 dan besar nilai konstanta Steven Boltzman (σ) adalah $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$. Photon yang diradiasikan setelah mencapai permukaan lain dapat diserap, direfleksikan, dan diteruskan melalui permukaan benda tersebut. Terdapat tiga sifat permukaan yang dapat menerima photon diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Absorptivitas (α) adalah radiasi yang masuk kemudian diserap.
2. Reflektivitas (ρ) adalah radiasi yang masuk kemudian direfleksikan.
3. Transmittivitas (T) adalah radiasi yang masuk kemudian diteruskan.

Dari ketiga sifat tersebut didapatkan persamaan, seperti pada Persamaan 2.11.

$$\alpha + \rho + r = 1 \quad (2.11)$$



Gambar 6. Perpindahan panas radiasi (Rohsenow & Hartnett, n.d.).

2.7 Biaya Photovoltaic

2.7.1 Konsep Biaya Investasi (*Capital Cost*) pada Sistem Energi Surya

Biaya investasi (*capital cost*) merupakan seluruh biaya yang dikeluarkan di awal untuk membangun suatu sistem energi surya, baik PV konvensional, PVT, maupun *Floating PV*. Biaya ini tidak berubah terhadap durasi operasi dan menjadi parameter utama untuk menentukan keekonomian proyek, seperti *Levelized Cost of Energy (LCOE)*, *payback period*, maupun *cost efficiency*. Menurut (C.Y. Khor, 2021), biaya investasi pada sistem PV umumnya terdiri atas biaya modul surya, struktur pendukung, material instalasi, serta biaya konstruksi.

Dalam konteks penelitian skala kecil seperti sistem *Floating Photovoltaic Thermal (Floating PVT)* kapasitas 30 WP, komponen biaya investasi lebih difokuskan pada material utama yang menyusun sistem, yaitu panel surya, kolektor termal, sirip pendingin, dan sistem pelampung.

2.7.2 Biaya Investasi pada Sistem *Photovoltaic Thermal (PVT)*

Pada sistem PVT, modul PV diintegrasikan dengan kolektor panas untuk memanen energi listrik dan energi panas secara bersamaan. Hal ini menambahkan komponen biaya baru yang tidak terdapat pada PV biasa, seperti:

- pelat absorber,
- saluran fluida,
- isolasi termal,
- sirip pendingin (*fin*),

- rumah kolektor.

Menurut (Chow, 2010) sistem PVT memiliki biaya investasi 10–25% lebih tinggi dibanding PV konvensional, namun hal ini dapat dikompensasi oleh peningkatan total output energi (listrik + panas).

2.7.3 Biaya Investasi Sistem *Floating Photovoltaic (Floating PV)*

Floating PV menempatkan panel di atas permukaan air, sehingga memerlukan beberapa komponen investasi tambahan, yaitu:

1. Pelampung (*float*) biasanya dari HDPE karena tahan korosi dan stabil secara termal.
2. Rangka pendukung untuk memasang panel di atas pelampung.
3. *Mooring* dan *anchoring system* untuk menjaga kestabilan struktur terapung.

Menurut laporan (Ramasamy et al., 2021), sistem FPV menunjukkan *installed-cost premium* sekitar 25% dibandingkan *ground-mounted PV*, terutama akibat biaya tambahan *floats* dan sistem *mooring/anchoring*.

2.7.4 Biaya Investasi Sistem *Floating Photovoltaic Thermal (Floating PVT)*

Floating PVT menggabungkan teknologi PVT dan *Floating PV*, sehingga biaya investasinya merupakan kombinasi dari biaya komponen PV, kolektor termal, sirip pendingin, dan pelampung. Pada penelitian kapasitas kecil seperti 30 WP, biaya investasi yang diperhitungkan umumnya meliputi:

1. Biaya Modul PV

Modul PV menjadi komponen utama dan memiliki proporsi biaya terbesar.

2. Biaya Kolektor Termal dan Sirip *Cross-cut*

Kolektor termal terdiri dari pelat absorber, pipa fluida, dan isolasi.

Pada penelitian ini digunakan sirip pendingin *cross-cut fin* yang berfungsi meningkatkan perpindahan panas melalui turbulensi aliran udara atau fluida.

Sirip *cross-cut* memiliki biaya pembuatan lebih tinggi dibanding sirip plat datar biasa karena proses pemotongan dan machining yang lebih kompleks.

3. Biaya Pelampung (*Floating Structure*)

Pelampung dihitung berdasarkan luas modul karena materialnya mengikuti area panel. Umumnya dinyatakan dalam satuan Rp/m², sehingga masuk ke kategori

area-dependent cost (C_a).

4. Biaya Pengerjaan dan Perakitan

Biaya pengerjaan dan perakitan meliputi pemasangan pipa fluida, pembuatan sirip *cross-cut*, pemasangan modul ke pelampung, instalasi sistem kolektor belakang panel. Biaya ini termasuk ke dalam investasi awal karena tidak berulang.

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Termodinamika Mesin Universitas Lampung, yang dipilih karena memiliki fasilitas dan peralatan yang sesuai untuk mendukung kegiatan pengujian dan pengambilan data penelitian. Lingkungan laboratorium yang terkontrol memungkinkan proses eksperimen dilakukan secara optimal dan menghasilkan data yang akurat.

Penelitian dan pengambilan data dilakukan pada bulan November 2024 hingga Desember 2025, mencakup tahapan persiapan, pelaksanaan eksperimen, serta pengolahan dan analisis data. Rentang waktu tersebut diperlukan agar seluruh proses penelitian dapat berjalan secara sistematis dan hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

3.2 Alat Dan Bahan

Adapun spesifikasi alat dan bahan utama dalam rancangan ini :

1. Panel Surya Polycrystalline

Modul *polycrystalline photovoltaic* (PV) berdaya 30 Wp digunakan dalam penelitian ini sebagai perangkat konversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Modul ini tersusun dari sel surya berbahan silikon polikristalin yang memiliki struktur kristal majemuk, sehingga memengaruhi karakteristik listrik dan termalnya. Pada kondisi uji standar (*Standard Test Conditions/STC*), yaitu intensitas radiasi 1000 W/m^2 , temperatur sel 25°C , dan spektrum AM 1.5, modul memiliki $V_{oc} \pm 21,5 \text{ V}$, $I_{sc} \pm 1,8 \text{ A}$, $V_{mp} \pm 18,0 \text{ V}$, dan $I_{mp} \pm 1,67 \text{ A}$, dengan efisiensi konversi sekitar 14–16%.

Secara fisik, modul memiliki dimensi sekitar $670 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, luas permukaan efektif $\pm 0,23 \text{ m}^2$, dan massa 2,5–3,0 kg. Modul dilengkapi rangka aluminium dan kaca tempered sebagai pelindung sel surya. Pemilihan modul ini didasarkan pada kesesuaian skala penelitian serta kemudahan integrasi dengan sistem pengujian dan pendinginan, sehingga mendukung analisis kinerja listrik dan termal modul fotovoltaik.



Gambar 7. *polycrystalline photovoltaic*

2. Solar Power Meter SPM-1116 SD

Solar Power Meter SPM-1116 SD digunakan dalam penelitian ini sebagai instrumen untuk mengukur intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan modul fotovoltaik (PV). Alat ini memberikan hasil pengukuran dalam satuan watt per meter persegi (W/m^2), yang merepresentasikan besarnya energi radiasi matahari yang jatuh pada area modul. Data intensitas radiasi tersebut digunakan sebagai parameter utama dalam analisis kinerja dan efisiensi sistem fotovoltaik.

SPM-1116 SD dilengkapi dengan kemampuan penyimpanan data hingga 16 GB, sehingga memungkinkan pencatatan data pengukuran secara kontinu selama periode pengujian. Instrumen ini memiliki rentang respon spektral 400–1100 nm, yang mencakup wilayah spektrum radiasi matahari yang relevan terhadap karakteristik serapan sel surya silikon. Tingkat akurasi pengukuran alat ini berada pada kisaran $\pm 5\%$, sehingga cukup andal untuk keperluan pengukuran radiasi matahari pada pengujian lapangan sistem fotovoltaik



Gambar 8. Solar Power Meter SPM-1116 SD

3. *Temperature Recorder*

Temperature recorder digunakan dalam penelitian ini sebagai instrumen untuk merekam perubahan temperatur yang terjadi pada sistem Photovoltaic-Thermal (PV/T) selama proses pengujian. Alat yang digunakan adalah Lutron BTM-420 SD, yang berfungsi untuk mencatat data temperatur pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan pada sistem PV/T, sehingga memungkinkan analisis distribusi dan dinamika temperatur secara temporal.

BTM-420 SD memiliki kemampuan perekaman hingga 12 kanal data temperatur, sehingga memungkinkan pemantauan temperatur secara simultan pada beberapa bagian sistem, seperti permukaan modul fotovoltaik dan media termal. Data temperatur yang terekam digunakan sebagai parameter penting dalam evaluasi kinerja termal serta pengaruh temperatur terhadap performa listrik sistem PV/T.



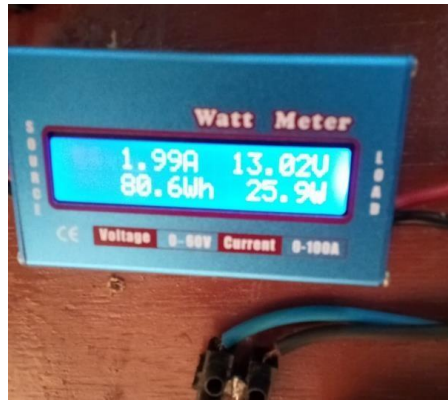
Gambar 9. *Temperature Recorder* Lutron BTM-420 SD

4. Digital Watt Meter

Digital watt meter digunakan dalam penelitian ini sebagai instrumen untuk mengukur parameter daya listrik yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik. Alat ini mampu mengukur besaran tegangan, arus, dan daya listrik secara real time, sehingga mendukung evaluasi kinerja listrik modul fotovoltaik selama pengujian berlangsung. Digital watt meter yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan kerja 230 VAC dengan frekuensi 50 Hz, serta mampu menangani arus maksimum hingga 13 A.

Data hasil pengukuran dari alat ini digunakan sebagai dasar dalam analisis daya keluaran dan efisiensi sistem fotovoltaik. Penggunaan digital watt meter

memungkinkan proses pencatatan data yang lebih akurat dan stabil, sehingga meminimalkan kesalahan pengukuran dan meningkatkan keandalan hasil analisis kinerja listrik sistem.



Gambar 10. Digital Watt Meter

5. *Solar charge controller (PWM 12V/24V 30A - K-1688)*

Solar charge controller (SCC) digunakan dalam penelitian ini sebagai perangkat pengatur dan pengendali aliran daya antara modul fotovoltaik, baterai, dan beban. SCC berfungsi untuk menjaga proses pengisian baterai agar berlangsung secara aman dan optimal dengan mencegah kondisi *overcharging* dan *overdischarging*, sehingga dapat memperpanjang umur pakai baterai serta menjaga kestabilan sistem kelistrikan.

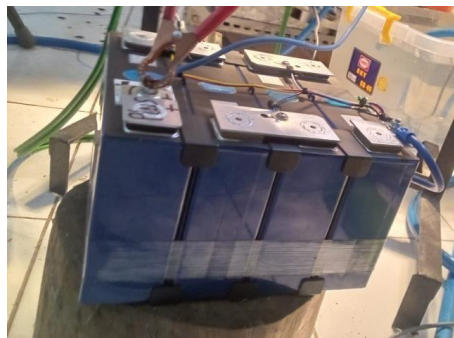
SCC yang digunakan merupakan tipe *Pulse Width Modulation* (PWM) dengan dukungan sistem tegangan 12 V dan 24 V serta kemampuan arus maksimum hingga 30 A. Penggunaan tipe PWM dipilih karena kesederhanaan rangkaian, keandalan operasi, dan kesesuaian dengan skala daya sistem fotovoltaik yang digunakan dalam penelitian. Perangkat ini juga berperan dalam menstabilkan tegangan keluaran dari modul fotovoltaik sebelum dialirkan ke baterai dan beban, sehingga mendukung pengoperasian sistem fotovoltaik secara efisien dan aman selama proses pengujian.



Gambar 11. *Solar charge controller (PWM 12V/24V 30A - K-1688)*

6. Baterai

Baterai digunakan dalam penelitian ini sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik. Baterai yang digunakan memiliki kapasitas 100 Ah dengan tegangan nominal 12 V, yang berfungsi untuk menampung dan menyediakan energi listrik selama periode pengujian sistem panel surya berlangsung.



Gambar 12. Baterai

7. Solar Simulator

Solar simulator digunakan dalam penelitian ini sebagai perangkat untuk mereplikasi radiasi matahari buatan selama proses pengujian, sehingga tidak bergantung pada kondisi radiasi matahari alami. Keberadaan alat ini memungkinkan pelaksanaan pengujian secara terkontrol dan berulang dalam lingkungan laboratorium, sehingga konsistensi data hasil pengujian dapat terjaga. Solar simulator yang digunakan dilengkapi dengan 12 unit lampu halogen, masing-masing berdaya 300 W dan beroperasi pada tegangan 220 V.

Penggunaan lampu halogen tersebut memungkinkan pembangkitan spektrum cahaya yang mendekati spektrum radiasi matahari, sehingga hasil pengujian yang diperoleh menjadi lebih representatif dan andal. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.12, konfigurasi dan penempatan lampu halogen dirancang untuk menghasilkan distribusi radiasi yang relatif merata pada area pengujian. Dengan karakteristik tersebut, solar simulator ini efektif digunakan untuk mengevaluasi kinerja perangkat yang memanfaatkan energi surya secara akurat dalam kondisi laboratorium.



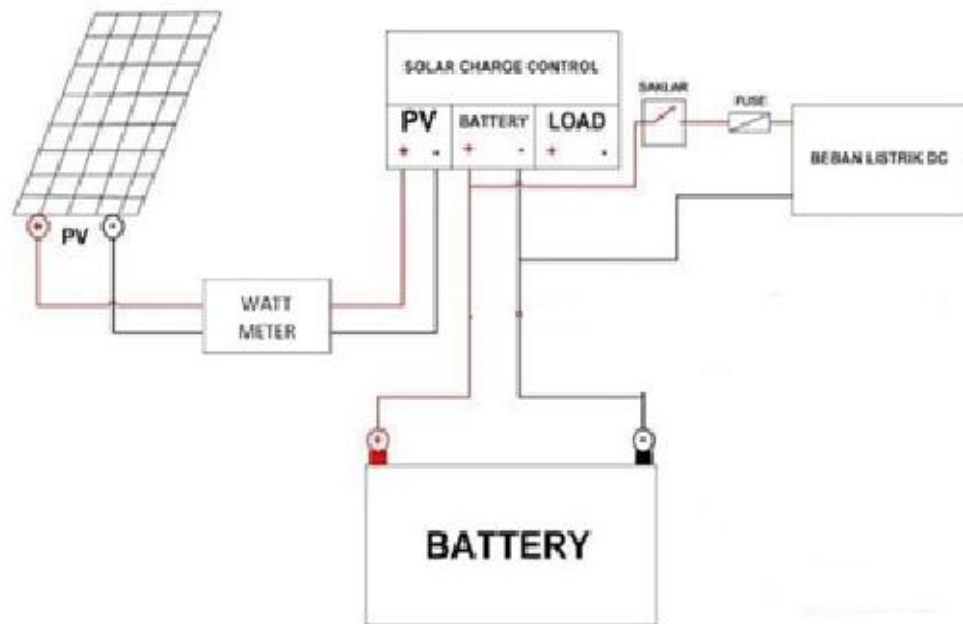
Gambar 13. *Solar Simulator*

3.3 Perancangan Sistem Listrik

Dalam pemanfaatan energi surya menjadi energi listrik, dibutuhkan beberapa alat pendukung selain panel surya. Gambar berikut menunjukkan rancangan sistem kelistrikan yang dilengkapi dengan beberapa alat ukur seperti watt meter guna mendukung pengambilan data selama proses pengujian.

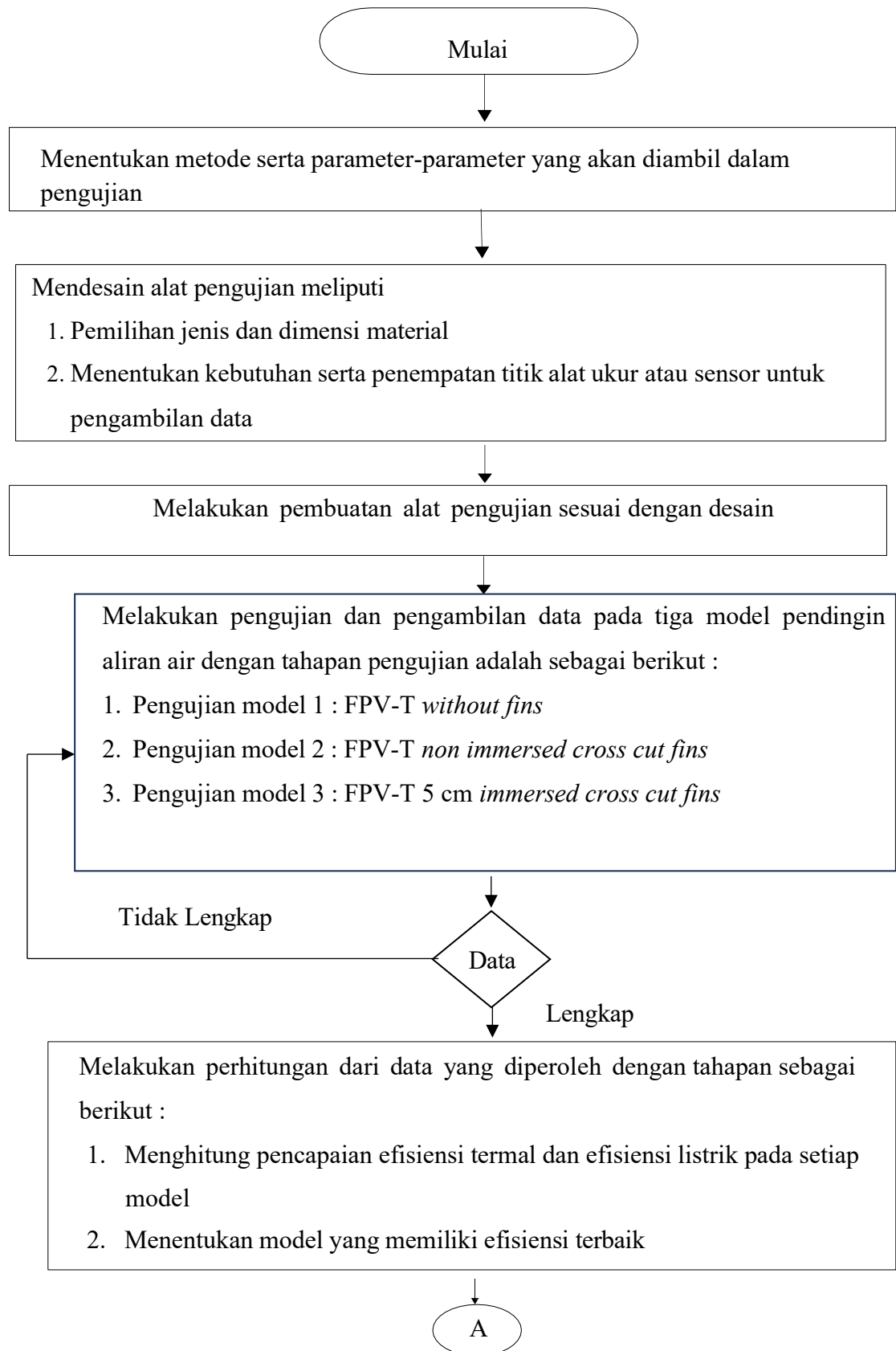
Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan efisiensi penyerapan energi matahari dan konversinya menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan. Rancangan ini mencakup panel surya, watt meter, solar charge controller, baterai, inverter, dan beban listrik baik DC maupun AC. Setiap komponen memainkan peran penting dalam memastikan sistem bekerja dengan optimal dan stabil. Perancangan sistem listrik *Floating PV/T* dapat dilihat pada Gambar 14.

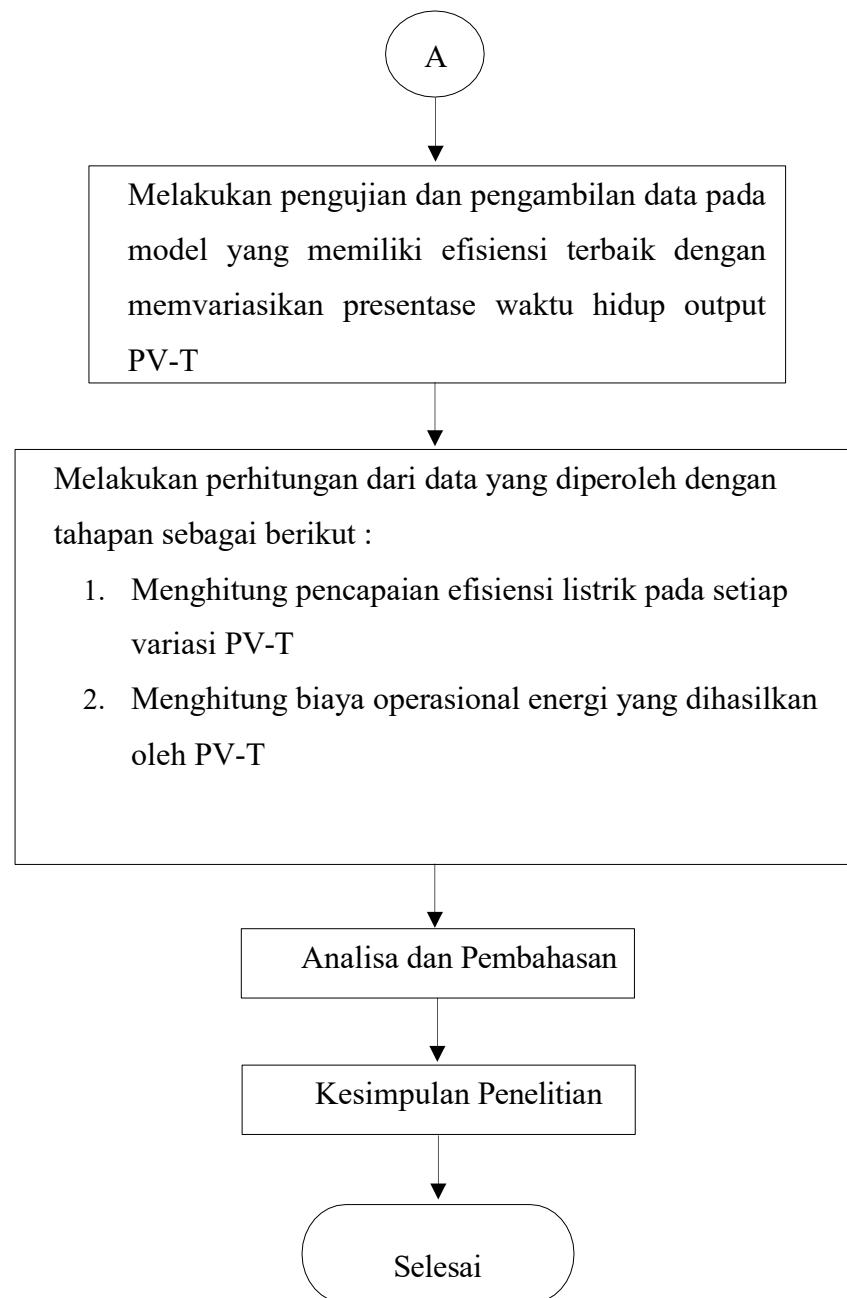
BLOK DIAGRAM PLTS



Gambar 14. Perancangan sistem listrik *Floating PV/T*.

3.4 Diagram Alir (*Flow Chart*)





Gambar 15. Diagram alir penelitian (flow chart)

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini diawali dengan pengujian sistem *Photovoltaic Thermal* (PVT) menggunakan tiga variasi model pendinginan. Seluruh pengujian dilakukan secara indoor dengan memanfaatkan *solar simulator* guna memastikan kondisi iradiasi yang terkendali dan seragam pada setiap model. Setiap pengujian dilaksanakan selama 30 menit dengan waktu pengambilan data yang sama untuk

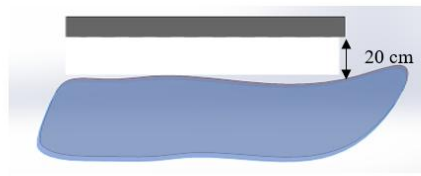
masing-masing variasi model pendingin. Variasi tingkat iradiasi yang digunakan terdiri atas radiasi penuh (*full radiation*) dan setengah radiasi (*half radiation*). Selama proses pengujian, parameter-parameter lain yang berpotensi memengaruhi kinerja sistem fotovoltaik, seperti kondisi lingkungan dan konfigurasi pengujian, dijaga tetap konstan untuk menjamin keseragaman perlakuan. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh masing-masing model pendinginan terhadap efisiensi sistem PVT yang dihasilkan.

3.5.1 Model 1 (Modul FPV-T *without fins*)

Pada variasi ini pengujian dilakukan pada sistem *Photovoltaic* tanpa pendingin dengan tujuan untuk mengetahui daya dan efisiensi maksimal yang dapat dihasilkan dari sistem tanpa pendingin fluida air yang kemudian akan dibandingkan dengan variasi pendingin lainnya.

Gambar 16 memperlihatkan konfigurasi modul *Photovoltaic without fins* pendingin pada sistem *Floating Photovoltaic*. Modul dipasang dengan jarak vertikal sekitar 20 cm dari permukaan air, sehingga tidak terjadi kontak langsung antara modul dan media air. Konfigurasi ini digunakan sebagai kondisi pembanding (*baseline*) dalam penelitian untuk mengevaluasi pengaruh penerapan sirip pendingin model *cross-cut* terhadap temperatur modul dan kinerja listrik sistem.

Pendinginan pada konfigurasi ini hanya mengandalkan konveksi alami udara dan efek pendinginan pasif dari permukaan air di bawah modul. Data temperatur dan parameter listrik yang diperoleh dari konfigurasi *without fins* selanjutnya dibandingkan dengan konfigurasi menggunakan sirip *cross-cut* untuk mengetahui peningkatan kinerja sistem akibat penerapan sistem pendinginan pasif.



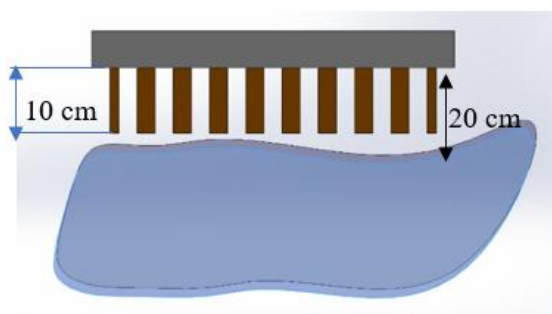
Gambar 16. Variasi *Photovoltaic Thermal without fins*

3.5.2 Model 2 (Modul FPV-T *non immersed cross cut fins*)

Untuk pengujian pada model kedua dilakukan pada sistem PV-T dengan tanpa pendingin air fluida air yang mengalir melewati sistem pendingin tepat dibawah permukaan PV-T.

Gambar 17 menunjukkan skema penempatan sirip pendingin model *cross-cut* pada bagian bawah modul *Photovoltaic* yang diapungkan di atas permukaan air. Sirip pendingin dipasang dengan jarak vertikal sekitar 10 cm dari permukaan bawah modul, sedangkan ujung sirip berada sekitar 10 cm di atas permukaan air. Konfigurasi ini dirancang untuk memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi alami dari modul menuju lingkungan sekitar tanpa kontak langsung antara sirip dan air.

Keberadaan permukaan air di bawah sirip pendingin berperan sebagai heat sink alami, sehingga membantu mempercepat pelepasan panas dari modul melalui aliran udara lembap di atas permukaan air. Jarak pemasangan tersebut dipilih untuk menghindari perendaman sirip, menjaga keamanan sistem listrik, serta tetap memaksimalkan efektivitas pendinginan pasif pada sistem *Floating Photovoltaic*.

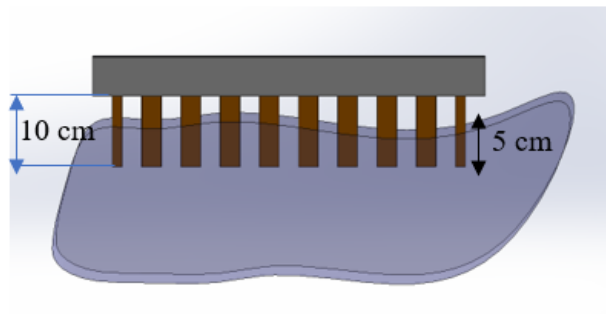


Gambar 17. Variasi *Photovoltaic Thermal* dengan pendingin bagian bawah

3.5.3 Model 3 (Modul FPV-T 5 cm *immersed cross cut fins*)

Untuk pengujian pada model ketiga dilakukan pada sistem PV-T dengan pendingin air yang mengalir melewati sistem pendingin dengan kedalaman 50 % dari tinggi sistem pendingin dan diletakkan tepat dibawah permukaan PV-T.

Gambar 18 menunjukkan konfigurasi modul *Photovoltaic* dengan sirip pendingin model *cross-cut* yang diposisikan mendekati permukaan air. Sirip pendingin dipasang dengan jarak sekitar 10 cm dari bagian bawah modul, sementara ujung sirip terendam sekitar 5 cm dalam air, sehingga terjadi kontak langsung antara sirip dan air. Konfigurasi ini dirancang untuk memaksimalkan perpindahan panas secara konveksi alami dengan memanfaatkan air sebagai media pendinginan.



Gambar 18. Variasi *Photovoltaic Thermal* dengan pendingin bagian atas.

3.6 Pengujian Variasi Model *Photovoltaic Thermal*

Pada pengujian variasi model *Photovoltaic Thermal* (PVT) parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi waktu pengukuran, iradiasi matahari (W/m^2), suhu permukaan modul PVT *without fins*, suhu permukaan modul PVT dengan sirip, serta suhu permukaan modul PVT dengan sirip dan pendingin air. Data tersebut digunakan untuk menganalisis perbandingan kinerja termal pada masing-masing variasi model PVT.

3.7 Pengujian Variasi Presentase Waktu Pengujian PV-T

Pada pengujian efisiensi listrik variasi model *Photovoltaic Thermal* (PVT) parameter yang diamati meliputi waktu pengukuran, iradiasi matahari (W/m^2), tegangan keluaran (V) dan arus keluaran (I) pada masing-masing variasi model PVT. Nilai daya listrik dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus, sedangkan efisiensi listrik dianalisis sebagai perbandingan antara daya listrik keluaran modul dengan energi radiasi matahari yang diterima permukaan modul.

3.8 Analisa Data

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi model pendinginan pada sistem *Photovoltaic Thermal* (PV-T) terhadap parameter termal dan listrik. Variasi model pendinginan yang dianalisis meliputi konfigurasi *without fins* dan dengan sirip pendingin model *cross-cut*. Data yang dianalisis meliputi temperatur modul, tegangan, arus, dan daya keluaran sistem PV-T yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental.

3.9 Pengaruh Variasi Model Pendingin pada *Photovoltaic Thermal* (PV-T) terhadap Temperatur

Analisis temperatur dilakukan dengan membandingkan nilai temperatur permukaan modul PV-T pada setiap variasi model pendinginan terhadap waktu pengujian. Data temperatur dicatat secara periodik menggunakan sensor suhu yang dipasang pada permukaan belakang modul. Selanjutnya, data temperatur dianalisis untuk mengetahui perbedaan temperatur rata-rata dan temperatur maksimum antara konfigurasi *without fins* dan dengan sirip pendingin *cross-cut*. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem pendinginan pasif dalam menurunkan temperatur kerja modul PV-T.

3.10 Pengaruh Variasi Model Pendingin pada *Photovoltaic Thermal* (PV-T) terhadap Besar Daya (Watt)

Analisis daya dilakukan dengan menghitung daya keluaran sistem PV-T berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan $P = V \times I$. Daya keluaran dihitung untuk setiap variasi model pendinginan dan dianalisis terhadap waktu pengujian. Perbandingan daya antara konfigurasi *without*

fins dan dengan sirip *cross-cut* digunakan untuk mengevaluasi pengaruh sistem pendinginan pasif terhadap peningkatan kinerja listrik sistem PV-T secara keseluruhan.

3.10.1 Efisiensi Listrik *Photovoltaic Thermal*

Pada analisa efisiensi listrik dari panel surya merupakan perbandingan daya yang dibangkitkan oleh panel surya dengan energi input yang diperoleh dari irradiance cahaya matahari. Untuk menghitung efisiensi listrik yang dihasilkan panel surya selama proses pengujian dapat dirumuskan dengan Persamaan 3.1.

$$\eta_{el} = \frac{V \times I}{A \times G} \times 100\% \quad (3.1)$$

3.10.2 Analisa Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengevaluasi kebutuhan investasi pada sistem *Floating Photovoltaic* yang digunakan dalam penelitian. Analisis ini difokuskan pada biaya investasi awal (initial cost) yang mencakup seluruh komponen utama sistem, tanpa memperhitungkan biaya operasional dan perawatan. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran perbandingan biaya antara konfigurasi *without fins* pendingin dan dengan sirip pendingin model *cross-cut*.

Komponen biaya yang dianalisis meliputi modul *Photovoltaic*, rangka apung berbahan pipa PVC, sambungan dan aksesoris mekanik, sirip pendingin *cross-cut*, serta komponen pendukung lainnya yang digunakan dalam perakitan sistem. Data biaya diperoleh berdasarkan harga pasar lokal pada periode penelitian dan dinyatakan dalam satuan mata uang Rupiah.

Biaya total sistem dihitung dengan menjumlahkan seluruh biaya komponen pada masing-masing konfigurasi. Selanjutnya, dilakukan analisis perbandingan biaya antara sistem *without fins* dan sistem dengan sirip *cross-cut* untuk mengetahui tambahan biaya investasi yang diperlukan akibat penerapan sistem pendinginan pasif. Hasil analisis biaya ini digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi

kelayakan penerapan sirip pendingin *cross-cut* ditinjau dari aspek ekonomi terhadap peningkatan kinerja sistem *Floating Photovoltaic*.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis kinerja sistem *Floating Photovoltaic Thermal* (FPV-T) kapasitas 30 WP dengan variasi sistem pendingin *without fins*, FPV-T *non immersed cross cut fins*, serta FPV-T 5 cm *immersed cross cut fins*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan sistem pendingin berpengaruh signifikan terhadap suhu kerja modul fotovoltaik.

Model FPV-T dengan sirip pendingin *cross-cut* yang direndam air menunjukkan kinerja termal terbaik dengan suhu operasi terendah sebesar 43,62 °C, dibandingkan model dengan sirip tanpa air dan model tanpa pendingin. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi sirip *cross-cut* dan media air mampu meningkatkan laju perpindahan panas secara efektif, sehingga menekan kenaikan suhu panel selama pengujian.

2. Daya listrik tertinggi diperoleh pada model FPV-T 5 cm *immersed cross cut fins*.

Model ini mampu menghasilkan daya pada kisaran 8,39 W, lebih tinggi dibandingkan model *non immersed cross cut fins* dan model *without fins* yang hanya berada pada kisaran 7,09 – 7,89 W. Hasil ini menegaskan bahwa pengendalian panas melalui sistem pendingin yang efektif dapat meningkatkan output daya mendekati kapasitas nominal modul 30 WP.

3. Dari sisi biaya investasi, terdapat trade-off antara biaya dan peningkatan kinerja sistem.

Model tanpa pendingin memiliki biaya investasi terendah sebesar Rp595.000, sedangkan model dengan sirip pendingin dan model dengan sirip serta pendingin air membutuhkan biaya lebih tinggi, yaitu Rp705.000, akibat penambahan komponen pendinginan. Namun demikian, peningkatan kinerja termal dan listrik yang diperoleh pada model dengan sirip *cross-cut* dinilai sebanding dengan tambahan biaya investasi tersebut.

4. Secara keseluruhan, sistem FPV-T dengan sirip pendingin *cross-cut* dan perendaman air merupakan konfigurasi paling optimal.

Model ini memberikan kombinasi terbaik antara penurunan suhu, peningkatan daya dan tegangan listrik, serta kelayakan biaya investasi, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai solusi sistem fotovoltaiik yang lebih efisien dan stabil, khususnya untuk aplikasi di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis kelayakan ekonomi jangka panjang, seperti perhitungan payback period, biaya operasi dan pemeliharaan, serta umur pakai sistem PV-T.
2. Pengujian dapat dikembangkan dengan variasi desain sirip pendingin, seperti bentuk, jumlah, dan material sirip, untuk memperoleh konfigurasi pendinginan yang lebih optimal.
3. Sistem perendaman air dapat dikaji lebih lanjut dengan mempertimbangkan kedalaman perendaman dan dinamika aliran air, khususnya untuk aplikasi di perairan terbuka.
4. Pengujian pada skala yang lebih besar dan durasi waktu yang lebih panjang diperlukan untuk mengevaluasi stabilitas kinerja sistem PV-T terhadap perubahan cuaca dan kondisi lingkungan.
5. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk mengintegrasikan sistem PV-T dengan pemanfaatan energi termal, sehingga efisiensi total sistem dapat ditingkatkan secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, B. (2013). *Convection Heat Transfer*.
- Amrizal, A. (2019). Pengaruh Variasi Temperatur Fluida Masuk Terhadap Unjuk Kerja Kolektor Surya Hybrid Pv/T. <http://repository.lppm.unila.ac.id/21894/>
- Bejan, A., & D.Kraus, A. (2003). Heat Transfer Handbook. In *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- C.Y. Khor. (2021). *Influence of inlet velocity and heat flux on the thermal characteristic of various heat sink designs using CFD analysis Influence of inlet velocity and heat flux on the thermal characteristic of various heat sink designs using CFD analysis*.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012013>
- Chen, J. (2015). *Recent Developments on Silicon Based Solar Cell Technologies and their Industrial Applications*.
- Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87(2), 365–379.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>
- Hameed, H., Sahal, A., Shakeel, M., & Shamy, A. (2022). *Energy Comparison Based Design Review of 100 MWp QASPP and Crest*. 41(4), 50–61.
- Hussain, S., & Harrison, S. J. (2015). Experimental and numerical investigations of passive air cooling of a residential flat-plate solar collector under stagnation conditions. *Solar Energy*, 122, 1023–1036.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.029>
- Kim, T. Y., & Kim, S. J. (2009). Fluid flow and heat transfer characteristics of cross-cut heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(23–24), 5358–5370.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.07.008>
- Langer, J., & Quist, J. (2021). *Review of Renewable Energy Potentials in Indonesia and Their Contribution to a 100 % Renewable Electricity System*.
- Lee, P., & Garimella, S. V. (2008). *Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays*. 51, 789–806.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.019>
- Manssouri, O. El, Hajji, B., Tina, G. M., Gagliano, A., & Aneli, S. (2021). *Electrical and Thermal Performances of Bi-Fluid PV / Thermal Collectors*.
- Margawadi, K. A., Widodo, S., & Suedy, A. (2025). *Co-firing simulations with*

blending of low range coal and medium range coal on the performance of 615 MW capacity steam power plant and Indonesia carbon trading review.

Mohd Syahrman Mohd Azmi, Othman, M. Y. H., Mohd Hafidz Hj. Ruslan, & Zafri Azran Abdul Majid. (2014). Analisis prestasi fotovoltan terapung dan fotovoltan konvensional. *EDUCATUM Journal of Science, Mathematics and Technology*, 1(1), 15–21.

Muszyfaga-staszuk, M. M. (2025). *Structural and Electrical Analysis of Crystalline Silicon Solar Cells: The Role of Busbar Geometry in First-Generation PV Technology*. 1–15.

Nalis, dkk. (2023). Unjuk Kerja Termal Kolektor Surya PV/T Bersirip Menggunakan Metode Computing Fluid Dynamic. *Infotekmesin*, 14(2), 244–249.

<https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v14i2.1878>

Nur, M., Mat, H., Mohd-ghazali, N., Shamsuddin, H. S., & Estellé, P. P. (2024). *Optimization of Microchannel Heat Sink for Thermal Performance and Pressure Drop using Central Composite Design of Experiment*. 11(02), 1426–1434.

Panda, dkk. (2021). Investigating the similarities and differences between front and back surface cooling for PV panels. *Materials Today: Proceedings*, 74(September), 358–363.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.424>

Ramasamy, V., Margolis, R., Ramasamy, V., & Margolis, R. (2021). *Installations on Artificial Water Bodies Floating Photovoltaic System Cost Benchmark*

ROKHADI, A. W. (2018). *Pengujian Karakteristik Perpindahan Panas Dan Penurunan Tekanan Dari Sirip - Sirip Pin Ellips Susunan Selang-Seling Dalam Saluran Segiempat*.

Rukman, N. S. B., Fudholi, A., Nuriana, W., Pikra, G., Sudibyo, H., Subekti, R. A., Susatyo, A., Utomo, Y. S., Riyanto, E., Radiansah, Y., Kuncoro, A. H., & Abimanyu, H. (2022). Thermal Efficiencies of Photovoltaic Thermal (PVT) with Bi-Fluid Cooling System. *International Journal of Heat and Technology*, 40(2), 423–428.

<https://doi.org/10.18280/ijht.400209>

Safitri, N., Lhokseumawe, P. N., Rihayat, T., & Lhokseumawe, P. N. (2020). *Buku Teknologi Photovoltaic*. Penulis NO. ISBN 978-623-91323-0-9.

Sahin, B., & Demir, A. (2008). *Performance analysis of a heat exchanger having perforated square fins*. 28, 621–632.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.003>

Science, E. (2024). *The performance of floating Photovoltaic system over a small*

pond in Jakarta . The performance of floating Photovoltaic system over a small pond in Jakarta .

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1344/1/012010>

Seyfi S., (2021). Experimental and numerical analysis of the splay impact on the performance of splayed cross-cut fin heat sink. *International Journal of Therma Sciences*, 170(January).

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107101>

Sharaf, M., Yousef, M. S., & Huzayyin, A. S. (2022). Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 26131–26159.

<https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>

Sucipta, M., Suardamana, I. M., & Astawa, K. (2010). Analisis Performa Kolektor Surya Pelat Bersirip Dengan Variasi Luasan Permukaan Sirip. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(2), 88–92.

Zulfa, Z., Amrizal, A., & Amrul, A. (2018). Unjuk Kerja Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Paralel. *Mechanical*, 8(2), 46.

<https://doi.org/10.23960/mech.v8.i2.201707>