

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA KOLEKTOR SURYA PV/T
DENGAN SIRIP TERCELUP (*IMMERSED FINS*) JARAK 70 mm
PADA PERENDAMAN 25% & 50%**

(Proyek Akhir)

Oleh

AHMAD FUAD HASYIM

NPM 2305101015



**PROGRAM STUDI DIPLOMA III TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA KOLEKTOR SURYA PV/T
DENGAN SIRIP TERCELUP (*IMMERSED FINS*) JARAK 70 mm
PADA PERENDAMAN 25% & 50%**

Oleh

**AHMAD FUAD HASYIM
NPM 2305101015**

Laporan Proyek Akhir

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
AHLI MADYA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI DIPLOMA III TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA KOLEKTOR SURYA PV/T DENGAN SIRIP TERCELUP (*IMMERSED FINS*) JARAK 70 mm PADA PERENDAMAN 25% & 50%

Oleh:

AHMAD FUAD HASYIM

Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya, semakin menjadi perhatian seiring dengan menipisnya cadangan energi fosil dan meningkatnya permasalahan lingkungan global. Namun, kenaikan temperatur kerja modul photovoltaic akibat radiasi dapat menurunkan efisiensi dan daya keluaran listrik. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa sistem photovoltaic/thermal (PV/T) dengan menggunakan sirip pendingin paralel berjarak 70 mm melalui metode perendaman air. Sirip pendingin dibuat dari pelat aluminium setebal 1 mm dengan proses pemotongan, pembendingan, dan penyambungan menggunakan rivet. Pengujian dilakukan menggunakan solar simulator dengan intensitas radiasi sekitar $\pm 804 \text{ W/m}^2$ pada variasi kedalaman perendaman sebesar 25% dan 50%.

Hasil menunjukkan bahwa pendinginan sirip perendaman menurunkan temperatur modul PV dari $\pm 86^\circ\text{C}$ tanpa sirip menjadi $\pm 63^\circ\text{C}$ pada perendaman 25% dan $\pm 60^\circ\text{C}$ pada perendaman 50%. Penurunan temperatur ini meningkatkan daya keluaran listrik dari 5,47 W menjadi 6,24 W, Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan sirip pendingin konfigurasi paralel dengan perendaman air efektif dibandingkan tanpa perendaman untuk meningkatkan perpindahan panas dan menjaga kinerja listrik sistem PV/T tetap optimal.

Hasil pengujian menunjukkan pendinginan sirip perendaman menurunkan temperatur modul PV dan meningkatkan kinerja listrik sistem PV/T.

Kata kunci: Energi terbarukan, sistem PV/T, fabrikasi, pengujian perendaman.

ABSTRACT

DESIGN AND PERFORMANCE TESTING OF A PV/T SOLAR COLLECTOR WITH 70 mm IMMERSSED FINS AT 25% & 50% IMMERSION

By:

AHMAD FUAD HASYIM

The use of renewable energy, especially solar energy, is increasingly attracting attention due to the depletion of fossil fuel reserves and the increasing global environmental problems. However, the increase in the operating temperature of photovoltaic modules due to radiation can reduce efficiency and electrical output power. This study aims to improve the performance of photovoltaic/thermal (PV/T) systems using parallel cooling fins spaced 70 mm apart through a water immersion method. The cooling fins are made from 1 mm thick aluminum plates through a cutting, bending, and riveting process. Testing was carried out using a solar simulator with a radiation intensity of approximately $\pm 804 \text{ W/m}^2$ at varying immersion depths of 25% and 50%.

The results show that immersion fin cooling reduces the temperature of the PV module from $\pm 86^\circ\text{C}$ without fins to $\pm 63^\circ\text{C}$ at 25% immersion and $\pm 60^\circ\text{C}$ at 50% immersion. This temperature reduction increases the electrical output power from 5.47 W to 6.24 W. These results indicate that the application of parallel configuration cooling fins with water immersion is effective compared to without immersion to increase heat transfer and maintain the electrical performance of the PV/T system remains optimal.

Test results show that immersion fin cooling reduces PV module temperature and improves the electrical performance of the PV/T system.

Keywords: Renewable energy, PV/T system, fabrication, immersion testing.

Judul : RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA
KOLEKTOR SURYA PV/T DENGAN SIRIP
TERCELUP (*IMMERSED FINS*) JARAK 70 mm
PADA PERENDAMAN 25% & 50%

Nama Mahasiswa : **Ahmad Fuad Hasyim**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2305101015

Jurusan / Program Studi : Teknik Mesin / DIII Teknik Mesin

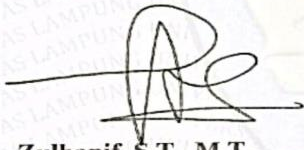
Fakultas : Teknik

Bandar Lampung, 05 Maret 2026

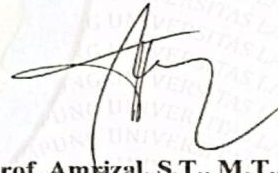
MENYETUJUI,

Ketua Program Studi

Dosen Pembimbing



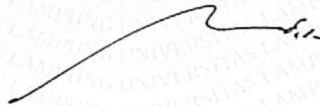
Zulhanif, S.T., M.T.
NIP. 197304022000031002



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

MENGETAHUI,

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Ahmad Suudi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Pembimbing : **Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 197002021998031004



Penguji : **Angga Darma Prabowo, S.T., M.T.**
NIP. 199605062024061001



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Proyek Akhir : 05 Maret 2026

PERNYATAAN PENULIS

Penulis Proyek akhir ini dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan surat Keputusan Rektor No.3187/H26/DT/2010.

Yang Membuat Pernyataan



AHMAD FUAD HASYIM
NPM. 2305101015

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Metro, Metro pada tanggal 13 Januari 2005 dengan orang tua bernama bapak Marjuki dan ibu Suharni. Penulis memulai pendidikan sekolah dasar di SDN 4 Metro Timur, di kota Metro lulus pada tahun 2017, sekolah menengah pertama di SMPN 2 Metro lulus tahun 2020, melanjutkan sekolah menengah atas di SMAN 1 Metro mengambil jurusan IPA lulus pada tahun 2023. Kemudian penulis diterima di Universitas Lampung pada tahun 2023 mengambil Program Studi D3 Teknik Mesin.

Penulis mengikuti berbagai macam bentuk kegiatan di kampus tercinta Universitas Lampung terutama pada Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dimana pada tahun 2025 mengemban jabatan sebagai anggota bidang bidang Akademik mahasiswa. Penulis juga melakukan kuliah kerja lapangan di PT Great Giant Pineapple pada tanggal 7 Juli – 7 Agustus 2025 dengan judul “Perawatan Preventif Mesin *Seamer* Dalam Industri Pengalengan Dibagian *Maintenance Cannery* PT. Great Giant Pineapple”. Serta penulis juga melakukan pembuatan alat sistem kolektor surya PV/T dibawah bimbingan bapak Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.

Motto

***“Jadilah seperti rumput teki yang pantang
menyerah walau sering dipandang
sebelah mata namun setiap bagian
darinya memiliki manfaat”***

***“Bukan bahagia yang menjadikan kita
bersyukur, tetapi dengan bersyukurlah
yang akan membuat hidup kita bahagia”***

PERSEMBAHAN

Karya sederhana ini adalah ungkapan bakti dan terima kasih yang tak terhingga kepada Ibu dan Bapak tercinta. Setiap halaman di dalamnya adalah simbol hormat dan kasih sayangku, yang kurasa takkan pernah cukup untuk membalas limpahan cinta dan dukungan yang telah kalian berikan. Semoga tugas akhir ini menjadi permulaan kebahagiaan bagi Ibu dan Bapak, karena aku menyadari, belum banyak hal membanggakan yang dapat kupersembahkan.

Terima kasih tak terhingga, Ibu dan Bapak, atas motivasi yang selalu membakar semangatku, atas kasih sayang yang senantiasa menyejukkan, atas doa yang tak pernah putus, dan atas bimbingan yang mengarahkanku menjadi pribadi yang lebih baik. Semoga Allah SWT melimpahkan kesehatan dan usia yang panjang kepada kalian, agar selalu dapat mendampingi setiap langkah kecilku.

Kupersembahkan pula karya ini untuk kedua orang tua serta keluarga terkasih, dan untuk semua pihak yang dengan tulus telah mendukung, mendidik, dan membimbing penulis selama ini.

SANWACANA

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Penulis menyampaikan rasa syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan perlindungan-Nya, yang memungkinkan penulis menyelesaikan tugas akhir dan laporan proyek akhir dengan sukses serta dalam kondisi sehat. Laporan proyek akhir ini disusun sebagai dokumentasi tertulis dari hasil pengerjaan tugas akhir. Diharapkan karya tulis ini dapat berkontribusi pada perkembangan ilmu pengetahuan di bidang energi baru dan terbarukan, khususnya Solar surya. Proyek akhir ini juga merupakan persyaratan untuk meraih gelar Ahli Madya Teknik di jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung. Penulis berharap karya ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat dikembangkan lebih lanjut.

Selesaiannya tugas akhir ini tidak luput dari bantuan, bimbingan dan arahan dari semua pihak, oleh karena itu penyusun sangat mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Persembahan ini penulis tujukan kepada kedua orang tua tercinta, ayahanda Marjuki dan ibunda Suharni serta seluruh keluarga penulis atas segala doa, bimbingan, dukungan dan motivasi yang senantiasa diberikan kepada penulis selama menempuh proses perjalanan pendidikan.
2. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., ASEAN Eng. Selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Ahmad Suudi, S.T., M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Zulhanif, S.T., M.T. Selaku Kepala Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

6. Bapak Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. Selaku Dosen Pembimbing yang telah bersedia mendidik dan meluangkan waktu untuk membimbing penulis dalam penyusunan laporan proyek akhir ini.
7. Tim Laboratorium Termodinamika, yaitu Muhammad Bilal, Imam Prasetyo, Muhammad Fauzan, serta rekan proyek akhir Aldo Anggara, dan Bapak Sugiman selaku teknisi laboratorium, yang telah memberikan bantuan, kepada penulis selama pelaksanaan proyek akhir.
8. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak pengetahuan kepada penulis.
9. Seluruh staf dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
10. Teman – teman Angkatan 2023 yang selalu mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat. semoga kebersamaan kita tetap terjaga.
11. Semua pihak yang telah membantu penulis namun tidak bisa disebutkan namanya satu persatu, penulis ucapkan terima kasih semoga Allah Yang Maha Pengasih dan penyayang membalas segala kebaikan kalian.

Penulis mengakui bahwa laporan proyek akhir ini masih memiliki banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan proyek akhir ini. Semoga proyek akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca, aamiin.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung.....

Penulis

Ahmad Fuad Hasyim
NPM. 2305101015

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GRAFIK	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Sel Surya.....	4
2.2 Jenis – Jenis Panel Surya.....	5
2.3 Prinsip Kerja Panel Surya.....	7
2.4 Pengaruh Pendinginan Terhadap Panel Surya.....	8
2.5 Karakteristik Panel Surya (<i>Solar Cell</i>).....	9
2.6 Sirip Pendingin (<i>Heatsink Fin</i>).....	10
2.7 Pelat Alumunium.....	12
2.8 Pemotongan (<i>Cutting</i>).....	13
2.9 Proses Bending (Pembengkokan Pelat).....	14
2.10 Sambungan Mekanis (<i>Rivet Joint</i>).....	15
2.11 Perpindahan Panas (<i>Heat Transfer</i>).....	16
BAB III METODOLOGI	19
3.1 Alat dan Bahan.....	19
3.2 Diagram Alur Proyek Akhir.....	31
3.3 Prosedur Manufaktur Sirip Pendingin.....	32
3.4 Pengujian dan Pengambilan Data.....	35

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Alat Pendukung Pengujian	40
4.2 Pembuatan Sirip Konfigurasi Paralel	41
4.3 Kondisi Aktual Pengujian.....	47
4.4 Hasil Pengujian Sistem PV/T	52
4.5 Pembahasan Grafik.....	53
BAB V PENUTUP	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sel Surya.....	4
Gambar 2.2 Penel Surya Jenis <i>Polycrystalline</i>	6
Gambar 2.3 Penel Surya Jenis <i>Monocrystalline</i>	6
Gambar 2.4 <i>Thin Film Solar Cell</i>	7
Gambar 2.5 Ilustrasi Prinsip Kerja Panel Surya.....	8
Gambar 2.6 Jenis – Jenis <i>Hetasink Fin</i>	11
Gambar 2.7 Pelat Alumunium.....	12
Gambar 2.8 Mesin Potong <i>Plate</i>	13
Gambar 2.9 Alat Bending Portabel.....	14
Gambar 2.10 Sambungan Rivet.....	15
Gambar 3.1 Mesin Gerinda Potong.....	19
Gambar 3.2 Mesin Bor Tangan.....	20
Gambar 3.3 Alat Bending Manual.....	20
Gambar 3.4 Tang Rivet.....	21
Gambar 3.5 Tang Jepit.....	22
Gambar 3.6 Meteran Lipat.....	22
Gambar 3.7 Modul Surya 20Wp <i>Polycrystalline</i>	23
Gambar 3.8 Pelat Alumunium 1 mm.....	24
Gambar 3.9 Paku Rivet 3,2 mm.....	24
Gambar 3.10 <i>Thermal Adhesive</i> GD900-1.....	25
Gambar 3.12 <i>Data Logger</i> BTM-4208SD.....	26
Gambar 3.13 <i>Solar Power Meter</i> SPM-1116SD.....	27
Gambar 3.14 <i>Solar Charge Controller</i> MPPT 70A.....	27
Gambar 3.15 <i>Digital Watt Meter</i>	28
Gambar 3.16 <i>Thermocouple</i> Tipe – K.....	29
Gambar 3.17 <i>Lead – Acid Battery</i>	29
Gambar 3.18 Kontainer Box 75 Liter.....	30
Gambar 3.19 Diagram Alir Proyek Akhir.....	31
Gambar 3.20 Sketsa Visual Sirip.....	33

Gambar 3.21 Sketsa Pemodelan Sistem PV/T	34
Gambar 3.22 Proses Persiapan Air	35
Gambar 3.23 Pemasangan <i>Thermocouple</i>	36
Gambar 3.24 Pemasangan Sistem Kelistrikan.....	36
Gambar 3.25 Mengatur Intensitas Solar Simulator	37
Gambar 3.26 Pemantauan Temperatur Pengujian	37
Gambar 3.27 Proses Pengambilan Data Temperatur	38
Gambar 3.28 Pengukuran Intensitas Radiasi.....	38
Gambar 3.29 Pengukuran Keluaran Listrik.....	39
Gambar 3.30 Kondisi Saat Pengujian.....	39
Gambar 4.1 Skema Model Alat Pengujian Sistem PV/T.....	40
Gambar 4.2 Proses Pengukuran Spesifikasi Sirip	41
Gambar 4.3 Proses Penandaan (<i>Marking</i>).....	41
Gambar 4.4 Pemotongan Pelat Alumunium	42
Gambar 4.5 Merapikan Hasil dari Pemotongan	42
Gambar 4.6 Proses Bending Manual (Profil L).....	43
Gambar 4.7 Proses Pengeboran Rangka.....	44
Gambar 4.8 Pembersihan Permukaan Modul	44
Gambar 4.9 Proses Aplikasi <i>Thermal Adhesive</i>	45
Gambar 4.10 Penyambungan Mekanis Permanen.....	45
Gambar 4.11 Hasil Pembuatan Sirip 35 mm pada Sistem PV/T	46
Gambar 4.12 Kondisi Sistem PV/T Saat Pengujian Berlangsung	47
Gambar 4.13 Sumber Radiasi Pengujian Sistem PV/T	47
Gambar 4.14 Bak Air dan Media Pendingin	48
Gambar 4.15 Kondisi Perendaman Sirip Pendingin.....	49
Gambar 4.16 Kondisi <i>Thermocouple</i> di Permukaan Panel	49
Gambar 4.17 Kondisi Perekaman Temperatur Panel.....	50
Gambar 4.18 Kondisi Pengambilan Daya Keluaran.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Metode Perendaman	52
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tanpa Perendaman (Media Pemanding)	52

DAFTAR GRAFIK

Gambar 4.19 Grafik Respon Pada Berbagai Kondisi Pengujian	53
Gambar 4.20 Grafik Daya Keluaran Sistem PV/T	55
Gambar 4.21 Grafik Intensitas Radiasi Solar Simulator	56

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi terbarukan khususnya energi matahari semakin penting di tengah keterbatasan energi fosil dan meningkatnya isu lingkungan global. Salah satu teknologi yang mendukung pemanfaatan energi matahari adalah panel surya (solar panel). Panel surya merupakan alat yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Energi matahari yang melimpah dan tersedia sepanjang hari menjadikan teknologi panel surya sangat potensial untuk dikembangkan, terutama di daerah tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas penyinaran matahari tinggi sepanjang tahun. Namun demikian, kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional, khususnya temperatur kerja modul, sehingga diperlukan upaya peningkatan performa melalui penerapan sistem pendinginan yang efektif.

Salah satu jenis sistem pemanfaatan energi matahari adalah sistem tenaga surya *photovoltaic (PV system)*. Sistem ini terdiri dari panel surya, inverter, dan sistem penyimpanan energi (baterai) yang mampu menghasilkan dan menyimpan energi listrik untuk berbagai kebutuhan, baik skala rumah tangga maupun industri. Keunggulan sistem tenaga surya terletak pada tidak dihasilkannya emisi gas rumah kaca, bebas polusi suara, dan penggunaan energi yang terbarukan. Untuk mengoptimalkan kinerja panel surya, diperlukan penelitian lebih lanjut guna menentukan efisiensi konversi energi terbaik, dengan mempertimbangkan berbagai kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu permukaan panel, sudut kemiringan, serta kemungkinan pengaruh debu atau kotoran pada permukaan panel yang dapat menurunkan performa sistem.

Dalam proyek akhir ini penulis membuat sirip konfigurasi paralel dengan jarak 70 mm pada sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T) dengan konfigurasi sistem yang mampu mengukur parameter listrik berupa tegangan, arus, daya, dan efisiensi panel terhadap variasi intensitas cahaya. Alat uji ini dirancang secara terintegrasi agar dapat digunakan di Laboratorium Teknik Mesin (Laboratorium Termodinamika) Universitas Lampung sebagai media praktikum dan sarana penelitian. Diharapkan keberadaan alat ini dapat membantu mahasiswa dalam memahami prinsip kerja sistem tenaga surya, khususnya proses konversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik, serta pengaruh kondisi operasional terhadap kinerja panel surya, sekaligus meningkatkan pemahaman praktis melalui kegiatan pengujian secara langsung.

Mengingat proses praktikum memiliki peran penting dalam dunia pendidikan teknik karena menghubungkan teori dan praktik, kegiatan ini diharapkan dapat meningkatkan keterampilan dan pengalaman mahasiswa dalam bidang energi terbarukan. Pengalaman tersebut tidak hanya berguna selama masa perkuliahan, tetapi juga dapat diterapkan setelah lulus ketika terlibat dalam dunia kerja maupun kegiatan masyarakat. Mengingat potensi besar energi matahari di Indonesia, pemanfaatan teknologi panel surya dapat menjadi solusi energi berkelanjutan di berbagai wilayah, termasuk daerah pedesaan yang belum sepenuhnya terjangkau oleh jaringan listrik konvensional.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari pelaksanaan proyek akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat dan menghubungkan sirip konfigurasi paralel pada sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T) dengan jarak antar sirip 70 mm.
2. Mengetahui pengaruh perbedaan perendaman 25% dan 50% terhadap kinerja sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T) dengan jarak antar sirip sebesar 70 mm.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian adalah:

1. Pengujian menggunakan solar simulator di laboratorium termodinamika dengan intensitas radiasi terkontrol, sehingga tidak mencakup pengaruh kondisi cuaca nyata.
2. Kajian difokuskan pada dampak kenaikan temperatur modul PV terhadap penurunan performa listrik, tanpa membahas aspek ekonomi maupun umur pakai.
3. Evaluasi kinerja hanya berdasarkan temperatur modul dan daya keluaran, tanpa analisis efisiensi termal atau koefisien perpindahan panas secara rinci.

1.4 Sistematika Penulisan

Berikut adalah susunan bab dalam laporan proyek akhir ini, sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini berisikan latar belakang, tujuan, dan batasan masalah dan sistematika penulisan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang teori, pengklasifikasian panel surya, parameter panel surya.

3. BAB III METODOLOGI

Bab ini berisi waktu, tempat, dan tahapan pelaksanaan proyek akhir.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan gambar dan pembahasan yang didapatkan selama proses pembuatan.

5. BAB V PENUTUP

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan literatur – literatur yang dijadikan sebagai referensi dalam proses penulisan laporan ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Sel surya atau sel fotovoltaik (*photovoltaic cell*) merupakan perangkat semikonduktor yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Efek fotovoltaik terjadi ketika foton dari cahaya matahari diserap oleh material semikonduktor. Energi foton tersebut menyebabkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Perpindahan elektron ini menghasilkan beda potensial listrik. Beda potensial tersebut menimbulkan aliran arus listrik searah (DC). Sel surya bekerja tanpa melibatkan bagian mekanik yang bergerak. Proses konversi energi ini tidak memerlukan bahan bakar. Selain itu, sel surya tidak menghasilkan emisi gas buang. Oleh karena itu, sel surya dikategorikan sebagai teknologi energi bersih dan ramah lingkungan. Prinsip kerja sel surya didasarkan pada sifat listrik bahan semikonduktor. Fenomena efek fotovoltaik pertama kali ditemukan oleh Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839. Penemuan tersebut menjadi dasar pengembangan teknologi sel surya modern selain itu, kemajuan material semikonduktor dan teknik fabrikasi modern terus meningkatkan efisiensi dan daya tahan sel surya (Rahman dkk, 2019).



Gambar 2.1 Sel Surya (Pratomo 2023)

Secara umum, sel surya terbuat dari bahan silikon (Si) karena memiliki kestabilan kimia dan efisiensi konversi energi yang tinggi. Struktur sel surya terdiri dari dua lapisan semikonduktor, yaitu tipe-p dan tipe-n, yang membentuk sambungan p-n (*p-n junction*). Ketika cahaya matahari jatuh pada permukaan sel, elektron pada lapisan semikonduktor tereksitasi dan bergerak melalui sambungan tersebut, menghasilkan arus listrik searah (DC). Arus ini kemudian dapat digunakan secara langsung atau diubah menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter.

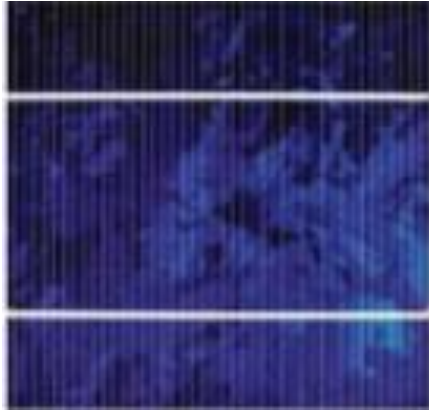
Beberapa sel surya digabungkan menjadi satu modul atau panel surya untuk menghasilkan daya listrik yang lebih besar. Satu panel biasanya terdiri dari puluhan hingga ratusan sel surya yang dihubungkan secara seri maupun paralel agar tegangan dan arus yang dihasilkan sesuai kebutuhan. Panel surya kemudian diintegrasikan dengan sistem pendukung seperti inverter, baterai penyimpanan energi, dan kontroler daya untuk membentuk sistem pembangkit listrik tenaga surya.

2.2 Jenis – Jenis Panel Surya

Adapun beberapa jenis-jenis dari panel surya itu sendiri yaitu:

2.2.1 Polikristal Silikon (*Polycrystalline Silicon*)

Panel polikristalin terbuat dari silikon yang dilelehkan dan dicetak sehingga membentuk banyak butiran kristal dengan struktur yang tidak seragam. Kondisi ini menyebabkan efisiensinya relatif lebih rendah dibandingkan panel monokristalin, yaitu berkisar antara 15–19%, dengan tampilan warna biru keunguan yang khas. Keunggulan utama panel polikristalin terletak pada biaya produksi yang lebih ekonomis dan proses manufaktur yang lebih sederhana. Oleh karena itu, panel ini banyak diaplikasikan pada sistem tenaga surya berskala besar maupun instalasi rumah tangga yang memiliki luas area pemasangan yang memadai dan tidak terlalu menuntut efisiensi tinggi (Zulhakim, 2025).



Gambar 2.2 Panel Surya Jenis *Polycrystalline* (Zakirullah, 2024)

2.2.2 Monokristal Silikon (*Monocrystalline Silicon*)

Panel monokristalin dibuat dari satu kristal silikon murni dengan struktur atom yang seragam, sehingga mampu menghasilkan efisiensi tinggi berkisar antara 18–24%. Panel ini umumnya berwarna hitam dan memiliki kinerja yang baik meskipun pada kondisi intensitas cahaya yang relatif rendah. Keunggulan utamanya terletak pada efisiensi konversi energi dan umur pakai yang panjang, namun biaya produksinya relatif lebih mahal karena proses manufaktur yang lebih kompleks. Oleh karena itu, panel monokristalin banyak digunakan pada rumah tinggal atau bangunan dengan keterbatasan area pemasangan yang membutuhkan keluaran daya optimal (Sugianto, 2025)



Gambar 2.3 Panel Surya Jenis *Monocrystalline* (Suwarti, 2018)

2.2.3 *Thin Film Solar Cell*

Panel surya *thin film* merupakan generasi ketiga dari teknologi fotovoltaik yang dibuat dengan cara melapisi bahan semikonduktor dalam bentuk lapisan tipis di atas substrat seperti kaca, logam, atau plastik. Panel jenis ini memiliki bentuk yang ringan, fleksibel, dan tampilan yang seragam sehingga cocok digunakan untuk desain arsitektur modern atau aplikasi portabel. Meskipun memiliki efisiensi lebih rendah (sekitar 10–14%) dibandingkan mono dan poli, panel *thin film* menunjukkan performa yang stabil pada suhu tinggi dan intensitas cahaya rendah. Kekurangannya adalah masa pakai yang lebih pendek dan tingkat degradasi material yang lebih tinggi (Yogestio dkk., 2020).

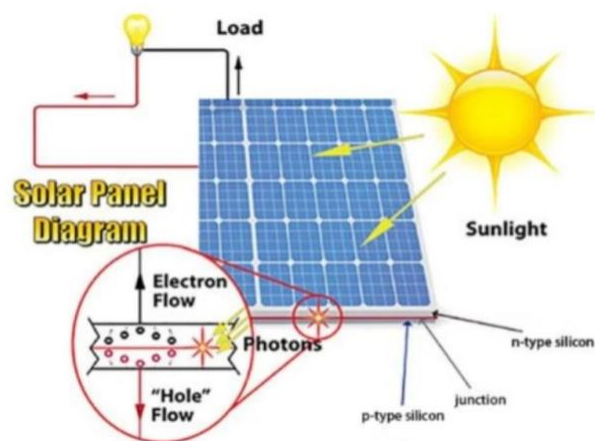


Gambar 2.4 *Thin Film Solar Cell* (Harahap, 2020)

2.3 Prinsip Kerja Panel Surya

Prinsip kerja solar panel didasarkan pada pemanfaatan energi radiasi matahari yang dikonversi menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Menurut Arifin dkk. (2023), panel surya tersusun dari sel surya berbahan semikonduktor silikon yang memiliki dua lapisan utama, yaitu lapisan tipe-p (positif) dan tipe-n (negatif). Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, foton dari sinar matahari akan melepaskan elektron dari atom silikon. Pergerakan elektron ini menghasilkan arus listrik searah

(*Direct Current/DC*). Arus listrik yang dihasilkan kemudian dikumpulkan oleh rangkaian konduktor dan dialirkan ke sistem kelistrikan. Agar dapat digunakan untuk peralatan listrik rumah tangga atau industri, arus DC tersebut selanjutnya diubah menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*) menggunakan inverter. Proses ini memungkinkan energi matahari dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik yang bersih, terbarukan, dan ramah lingkungan, sehingga berperan penting dalam mendukung pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.



Gambar 2.5 Ilustrai Prinsip Kerja Panel Surya (Arifin, 2023)

2.4 Pengaruh Pendinginan Terhadap Panel Surya

Menurut (Cahyono dkk, 2021), Penggunaan panel surya di Indonesia menunjukkan potensi yang tinggi sebagai sumber energi terbarukan karena letak geografis yang menerima radiasi matahari cukup besar. Namun, kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh temperatur permukaan panel itu sendiri karena material semikonduktor yang digunakan sangat sensitif terhadap perubahan suhu, sehingga peningkatan temperatur operasional dapat menurunkan tegangan keluaran dan efisiensi daya listrik yang dihasilkan. Dalam penelitian oleh (Cahyono dkk, 2021), diterangkan bahwa penerapan sistem pendinginan dengan menggunakan sirip pada panel surya dapat menurunkan suhu permukaan panel melalui peningkatan laju disipasi panas, yang pada akhirnya meningkatkan performa panel surya dibandingkan kondisi tanpa pendinginan. Proses pendinginan ini bekerja

dengan memaksimalkan aliran panas dari permukaan panel ke lingkungan melalui konveksi dan konduksi, sehingga mengurangi dampak negatif dari *overheating* panel akibat radiasi matahari langsung. Dengan menurunkan temperatur operasional, tegangan dan daya keluaran panel cenderung meningkat serta efisiensi konversi energi menjadi lebih optimal, yang menunjukkan pentingnya strategi pendinginan dalam desain sistem fotovoltaik untuk meningkatkan produktivitas energi di daerah dengan intensitas matahari tinggi seperti di Indonesia.

2.5 Karakteristik Panel Surya (*Solar Cell*)

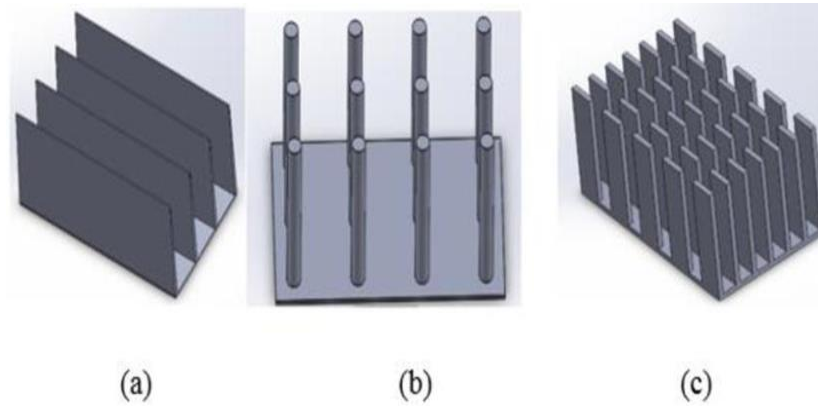
Karakteristik listrik dari suatu modul fotovoltaik ditentukan oleh hubungan antara arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan saat menerima radiasi cahaya matahari. Secara umum, hubungan I–V ini sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dan temperatur sel surya. Saat intensitas radiasi meningkat, arus yang dihasilkan juga mengalami peningkatan secara proporsional karena lebih banyak foton yang tersedia untuk menghasilkan pasangan elektron-lubang. Namun, sebaliknya, peningkatan temperatur akan menimbulkan efek penurunan tegangan keluaran meskipun arus sedikit meningkat, sehingga pada akhirnya daya keluaran total cenderung menurun ketika sel surya bekerja pada suhu tinggi (Saputra, 2021).

Dalam pengukuran karakteristik sel surya, kondisi standar yang sering dipakai adalah suhu 25°C dan intensitas radiasi 1000 W/m². Di iklim tropis seperti Indonesia, permukaan panel yang terkena sinar matahari langsung seringkali mencapai suhu 45°C atau lebih, yang kemudian mempengaruhi performa listriknya. Variasi intensitas cahaya dan temperatur ini berpengaruh terhadap arus, tegangan, dan daya keluaran, sehingga perlu dianalisis lebih lanjut dalam pembahasan hasil penelitian berikutnya. Bahan utama yang digunakan dalam sel surya tetaplah silikon sebuah semikonduktor yang bersifat isolator pada suhu rendah namun berubah menjadi konduktor saat mendapatkan energi dengan lapisan doping tipe-n (*fosfor*) dan tipe-p (*boron*) yang membentuk junction p-n untuk menghasilkan listrik (Rahman & Wijaya, 2022).

2.6 Sirip Pendingin (*Heatsink Fin*)

Heatsink atau *absorber* merupakan komponen yang berfungsi untuk menyerap sekaligus melepaskan panas dari suatu permukaan ke lingkungan sekitarnya, terutama melalui media udara. Proses pelepasan panas ini dilakukan dengan memperluas luas permukaan menggunakan sirip (*fins*) atau tonjolan tertentu sehingga laju perpindahan panas secara konveksi dapat meningkat. *Heatsink* banyak digunakan pada sistem elektronik, panel surya, dan peralatan termal lain yang memerlukan pengendalian suhu agar tetap bekerja pada kondisi optimal. Material yang umum digunakan sebagai *heatsink* adalah aluminium karena memiliki konduktivitas termal yang relatif tinggi, ringan, serta mudah dibentuk. Nilai konduktivitas termal aluminium berada pada kisaran 200–210 W/m·°C sehingga mampu menghantarkan panas dengan baik dari permukaan panas menuju sirip-sirip pendingin (Saputra & Nugroho, 2020).

Selain material, desain geometris *heatsink* sangat berpengaruh terhadap kinerja termalnya. Selain itu, konfigurasi sirip juga memengaruhi distribusi temperatur pada permukaan *heatsink*. Konfigurasi sirip paralel, seperti yang digunakan pada penelitian ini, memungkinkan aliran udara bergerak secara linier di antara celah sirip sehingga perpindahan panas secara konveksi dapat berlangsung lebih merata. Konfigurasi ini relatif mudah diproduksi dan cocok diterapkan pada sistem pendinginan berbasis aliran udara paksa maupun alami, sehingga banyak digunakan pada aplikasi panel surya tipe *photovoltaic/thermal* (PV/T). Sirip pada *heatsink* berperan penting dalam meningkatkan efektivitas perpindahan panas. Penambahan jumlah sirip akan memperbesar luas permukaan kontak antara *heatsink* dan udara sekitar, sehingga panas dapat dilepaskan lebih cepat. Selain itu, bentuk dan susunan sirip dapat memengaruhi pola aliran udara. Aliran udara yang terganggu oleh sirip akan cenderung berubah dari laminar menjadi turbulen, yang berdampak pada meningkatnya koefisien perpindahan panas konveksi (Hidayat dkk., 2019).



Gambar 2.6 Jenis – Jenis *Heatsink Fin* (Khor dkk, 2021)

Rectangular heatsink menggunakan sirip pelat lurus sejajar untuk memperluas area perpindahan panas dan banyak dipakai karena desainnya sederhana serta mudah diproduksi. *Circular fins heatsink* memiliki sirip melingkar konsentris yang memungkinkan distribusi panas lebih merata, sehingga cocok untuk konveksi alami. *Cross-cut plate fins heatsink* adalah sirip pelat yang dipotong melintang untuk meningkatkan turbulensi udara dan efektivitas perpindahan panas, khususnya pada aliran paksa.

Pada aplikasi sistem fotovoltaik, penggunaan *heatsink* sebagai absorber panas dapat menurunkan temperatur kerja modul surya. Penurunan temperatur ini akan meningkatkan efisiensi listrik panel surya serta memungkinkan pemanfaatan energi panas yang terbuang. Dengan penambahan *heatsink* pada bagian belakang modul fotovoltaik, sistem tersebut dapat dikembangkan menjadi sistem *Photovoltaic-Thermal (PV/T)* yang menghasilkan energi listrik dan energi panas secara bersamaan (Prasetyo dkk., 2021). Selain itu, penggunaan *heatsink* memperluas luas permukaan perpindahan panas sehingga pelepasan panas dari modul ke lingkungan menjadi lebih efektif melalui konduksi dan konveksi. Hal ini menjaga kestabilan temperatur sel surya pada kondisi radiasi tinggi, meningkatkan efisiensi listrik, serta memperpanjang umur pakai modul dengan menurunkan laju degradasi material.

2.7 Pelat Alumunium

Menurut (Surdia & Saito, 2013), Aluminium merupakan logam ringan yang memiliki ketahanan korosi tinggi serta kemampuan menghantarkan panas dan listrik secara efektif. Logam ini juga memiliki sifat mekanik yang cukup baik, mudah dibentuk dan dilas, sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknik, mulai dari konstruksi, otomotif, hingga komponen elektronik. Selain itu, aluminium memiliki massa jenis rendah, tahan terhadap oksidasi, harga relatif ekonomis, serta konduktivitas termal dan elektrik yang tinggi, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan efisiensi energi dan bobot ringan.



Gambar 2.7 Pelat Alumunium (Nugroho, 2016)

Pelat aluminium juga dikenal memiliki tingkat keuletan dan kemampuan bentuk (*formability*) yang baik, sehingga mudah diproses melalui berbagai metode manufaktur seperti pemotongan, pembungkukan (*bending*), pengeboran, dan pengefraisan. Dalam praktiknya, pelat aluminium banyak digunakan pada industri otomotif, dirgantara, konstruksi ringan, peralatan rumah tangga, serta sebagai bahan pembuatan casing dan rangka mesin. Selain keunggulan dari segi bobot dan ketahanan korosi, pelat aluminium juga bersifat mudah didaur ulang, sehingga mendukung efisiensi energi dan aspek keberlanjutan lingkungan. Dengan karakteristik tersebut, pelat aluminium menjadi material yang sangat aplikatif dan ekonomis dalam berbagai bidang industri.

2.8 Pemotongan (*Cutting*)

Proses pemotongan logam merupakan salah satu proses manufaktur yang bertujuan untuk membentuk produk dari bahan logam dengan cara menghilangkan sebagian material menggunakan alat potong. Proses ini menjadi aktivitas yang paling dominan dalam industri manufaktur karena mampu menghasilkan komponen mesin dengan bentuk yang rumit serta tingkat ketelitian dimensi dan geometri yang tinggi. Secara prinsip, pemotongan logam dapat didefinisikan sebagai interaksi antara alat potong dan benda kerja yang menyebabkan terlepasnya material dalam bentuk geram yang dihasilkan akibat adanya gaya potong yang bekerja selama proses pemesinan berlangsung

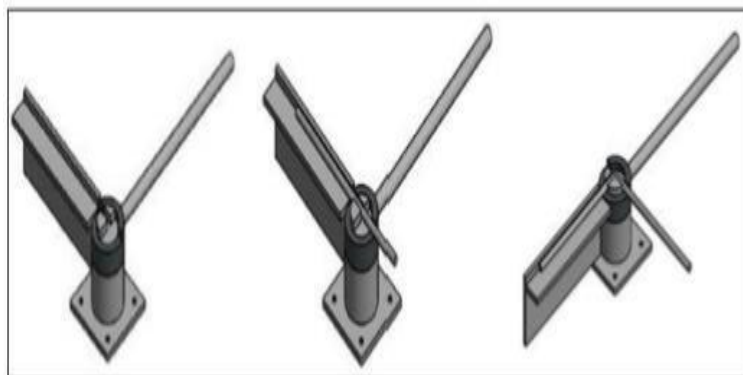


Gambar 2.8 Mesin Potong *Plate* (Sakti, 2010)

Proses pemotongan logam dapat dilakukan melalui berbagai metode, antara lain pembubutan, pengefraisan, pengeboran, dan penggerindaan, yang pemilihannya disesuaikan dengan bentuk serta fungsi komponen yang dihasilkan. Pembubutan umumnya digunakan untuk membentuk komponen berbentuk silindris, pengefraisan berfungsi untuk menghasilkan permukaan datar, alur, atau profil tertentu, pengeboran digunakan untuk pembuatan lubang, sedangkan penggerindaan diaplikasikan sebagai proses akhir (*finishing*) guna memperoleh kualitas permukaan dan ketelitian dimensi yang lebih tinggi (Kalpakjian & Schmid, 2014).

2.9 Proses Bending (Pembengkokan Pelat)

Proses bending merupakan salah satu metode pembentukan logam yang banyak diterapkan pada material berbentuk pelat maupun batang, baik yang berasal dari logam ferro maupun non-ferro, dengan cara memberikan gaya tekan hingga material mengalami pembengkokan. Pada proses ini terjadi regangan dan pemendekan pada serat material di sekitar sumbu netral sepanjang daerah tekukan, sehingga terbentuk garis bending yang relatif lurus dan terkontrol. Perkembangan penerapan proses bending sangat pesat, terutama pada industri manufaktur, bengkel las, dan pabrikasi permesinan, mulai dari skala rumah tangga hingga industri besar. Hal ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan teknologi mekanisasi di berbagai sektor, khususnya dalam bidang pertanian dan pengolahan hasil pangan, seperti teknologi pascapanen dan peralatan mekanis penunjang produktivitas masyarakat (Widodo, 2019).



Gambar 2.8 Alat Bending Portabel (Purwanto dkk, 2025)

Secara umum, proses bending memiliki beberapa keunggulan, antara lain waktu pengerjaan yang relatif singkat, minimnya limbah material karena tidak melibatkan proses pemotongan, serta kemampuan menghasilkan produk dengan kekuatan struktural yang baik karena serat material tetap utuh. Meskipun demikian, proses bending juga memiliki keterbatasan, seperti risiko terjadinya retak pada material yang memiliki sifat getas serta batasan terhadap radius tekuk minimum yang dapat diterapkan.

2.10 Sambungan Mekanis (*Rivet Joint*)

Penyambungan mekanis menggunakan paku keling (*rivet joint*) merupakan metode penyambungan permanen yang dilakukan dengan cara mengikat dua atau lebih pelat menggunakan batang logam silinder yang disebut rivet. *Rivet* dimasukkan ke dalam lubang yang telah dibuat pada pelat-pelat yang akan disambung, kemudian salah satu ujungnya ditekan atau dipukul hingga membentuk kepala baru, sehingga *rivet* mengunci pelat secara kuat dan tidak dapat dilepas tanpa merusak sambungan. Metode *rivet joint* ini banyak diterapkan pada struktur yang memerlukan kekuatan sambungan yang stabil dan tahan terhadap suatu getaran.



Gambar 2.9 Sambungan *Rivet* (Koesgi, 2021)

Keunggulan utama dari sambungan rivet adalah kemampuannya untuk digunakan pada material yang sulit atau tidak memungkinkan untuk dilas, seperti pelat aluminium tipis atau kombinasi material berbeda, serta relatif tahan terhadap kelelahan (*fatigue*) dan tidak menimbulkan perubahan sifat material akibat panas seperti pada pengelasan. Namun, sambungan rivet juga memiliki keterbatasan, antara lain memerlukan pembuatan lubang yang dapat mengurangi luas penampang efektif pelat serta memerlukan waktu dan tenaga lebih dibandingkan sambungan las. Kemudahan inspeksi, serta kemampuannya dalam menahan beban dinamis dan getaran dalam jangka waktu yang cukup panjang (Saputra, 2021).

2.11 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Perpindahan panas merupakan proses berpindahnya energi panas yang disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur. Perpindahan panas dapat berlangsung melalui tiga mekanisme utama, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Fenomena perpindahan panas ini dapat dimodelkan secara matematis dalam bentuk persamaan diferensial parsial, sehingga diperlukan metode penyelesaian tertentu untuk mengetahui karakteristik serta laju perpindahan panas yang terjadi. Berbagai penelitian mengenai perpindahan panas telah banyak dikembangkan dengan menggunakan metode numerik, di antaranya metode beda hingga, metode volume hingga, dan metode elemen hingga, yang umumnya diselesaikan dengan bantuan komputasi komputer Menurut (Rachmawati, 2015). Seperti yang telah disebutkan terdapat 3 jenis perpindahan panas yaitu:

2.11.1 Konduksi

Konduksi adalah mekanisme perpindahan panas yang terjadi melalui suatu material dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah tanpa perpindahan massa. Proses ini disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur di dalam material, dan secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan perpindahan panas konduksi sebagai berikut:

$$Q = - \frac{k A \Delta T}{x} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

- Q : Laju perpindahan panas (Watt)
- k : Konduktivitas panas (W/m.°C)
- A : Luasan perpindahan panas arah normal Q (m²)
- ΔT : Beda temperatur (°C)
- x : Ketebalan bahan (m)

2.11.2 Konveksi

Konveksi adalah mekanisme perpindahan panas yang terjadi melalui suatu fluida dan disertai dengan perpindahan partikel-partikel fluida. Perpindahan panas konveksi umumnya terjadi akibat perbedaan massa jenis fluida yang disebabkan oleh perbedaan temperatur.

Laju perpindahan panas konveksi dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- Q : Laju perpindahan panas (Watt)
- H : Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
- A : Luasan perpindahan panas arah normal Q (m^2)
- T_w : Temperatur permukaan benda ($^\circ C$)
- T_∞ : Temperatur fluida ($^\circ C$)

Perpindahan panas konveksi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

1. Konveksi alami (*Natural Convection*)
Perpindahan panas konveksi alami (*Natural Convection*) yang terjadi akibat perbedaan densitas fluida karena perbedaan temperatur, sehingga fluida panas bergerak naik dan fluida dingin bergerak turun membentuk aliran alami tanpa bantuan alat mekanis.

2. Konveksi paksa (*Forced Convection*)
Perpindahan panas konveksi paksa (*Forced Convection*) yang dibantu oleh peralatan mekanis, seperti kipas atau pompa, misalnya aliran udara yang ditiupkan di atas permukaan plat untuk meningkatkan perpindahan panas.

2.11.3 Radiasi

Radiasi merupakan mekanisme perpindahan panas yang terjadi melalui pancaran energi elektromagnetik dari suatu permukaan ke lingkungan sekitarnya tanpa memerlukan medium perantara. Proses ini dapat berlangsung di ruang hampa dan dipengaruhi oleh temperatur permukaan serta sifat emisivitas material, di mana semakin tinggi temperatur suatu permukaan, semakin besar energi radiasi yang dipancarkan.

Persamaan dasar perpindahan panas radiasi dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = \varepsilon AT^4 \sigma \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

Q : Panas yang dipancarkan (Watt)

ε : Emisivitas *thermal* benda (0 s.d. 1)

A : Luas perpindahan panas (m²)

T : Temperatur permukaan benda (°C)

σ : Konstanta Stefan-Boltzmann (W/m².K⁴)

Pada benda hitam ideal, nilai emisivitas (ε) sama dengan 1, yang menunjukkan kemampuan maksimum dalam memancarkan energi radiasi. Besaran σ bernilai $5,67 \times 10^{-8}$ W/m².K⁴, yang dikenal sebagai konstanta Stefan–Boltzmann dan digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan perpindahan panas melalui mekanisme radiasi.

BAB III METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan

A. Alat bantu yang digunakan untuk pembuatan sirip pendingin konfigurasi paralel pada panel surya ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin Gerinda Potong



Gambar 3.1 Mesin Gerinda Potong

Gerinda tangan merupakan peralatan listrik portabel yang digunakan pada proses fabrikasi, terutama untuk kegiatan pemotongan dan *finishing* material logam. Pada penelitian ini, alat tersebut digunakan untuk memotong pelat aluminium serta merapikan bagian tepi hasil pemotongan pada pembuatan sirip pendingin dan rangka sistem PV/T agar ukuran dan kualitas permukaan sesuai dengan rancangan. Gerinda yang digunakan termasuk tipe angle grinder dengan sumber listrik AC, tegangan kerja sekitar 220 V, daya berkisar 600–750 W, diameter cakram ± 4 inci, dan kecepatan putar sekitar 10.000–11.000 rpm.

2. Mesin Bor Tangan



Gambar 3.2 Mesin Bor Tangan

Mesin bor tangan digunakan sebagai peralatan listrik portabel dalam tahap fabrikasi untuk mendukung proses pengeboran serta pemasangan baut pada komponen sistem PV/T. Jenis bor yang digunakan adalah *cordless drill* dengan sumber tenaga baterai *lithium-ion* berkapasitas sekitar 4,0 Ah, dilengkapi pengaturan kecepatan dan torsi, serta mampu digunakan pada material logam maupun non-logam.

3. Alat Bending Manual



Gambar 3.3 Alat Bending Manual

Alat bending manual adalah perangkat mekanis yang digunakan pada tahap fabrikasi untuk membentuk atau menekuk pelat logam sesuai sudut dan geometri yang direncanakan. Dalam penelitian ini, alat tersebut dimanfaatkan untuk menekuk pelat aluminium menjadi dudukan serta bagian sirip pendingin pada sistem PV/T agar sesuai dengan ukuran dan desain yang telah ditetapkan. Proses pembentukan dilakukan secara manual dengan memanfaatkan gaya mekanis, sehingga sudut tekukan yang dihasilkan cukup presisi, seragam, dan tetap menjaga integritas material.

4. Tang Rivet



Gambar 3.4 Tang Rivet

Tang rivet merek Tekiro peralatan tangan mekanis yang digunakan pada tahap fabrikasi untuk menyatukan komponen logam dengan menggunakan paku rivet sebagai pengikat permanen. Dalam penelitian ini, alat tersebut dimanfaatkan untuk menghubungkan pelat aluminium pada pembuatan sirip pendingin dan rangka sistem PV/T melalui proses deformasi plastis batang rivet akibat gaya tarik dari alat. Proses penyambungan ini membentuk kepala rivet kedua yang berfungsi mengunci sambungan, sehingga menghasilkan ikatan mekanis yang kokoh, stabil, dan mampu menahan beban mekanik tanpa memerlukan proses pengelasan.

5. Tang Jepit



Gambar 3.5 Tang Jepit

Tang jepit merupakan alat tangan mekanis yang digunakan pada tahap fabrikasi untuk mengamankan dan mempertahankan posisi komponen agar tetap stabil selama proses perakitan sistem PV/T. Pada penelitian ini, tang jepit berfungsi menahan pelat aluminium serta sirip pendingin supaya tidak bergeser ketika dilakukan pengeboran, perakitan, dan penyambungan menggunakan paku rivet. Dengan adanya tang jepit, ketelitian posisi komponen dapat terjaga dan risiko kecelakaan kerja selama proses fabrikasi.

6. Meteran Lipat



Gambar 3.6 Meteran Lipat

Meteran lipat digunakan dalam proses pembuatan sirip pendingin untuk mengukur panjang, lebar, serta jarak antar sirip sesuai dengan rancangan yang telah ditentukan. Pengukuran dilakukan sebelum pemotongan pelat aluminium guna memastikan ukuran sirip seragam dan sesuai spesifikasi. Selain itu, alat ini membantu memastikan posisi pemasangan sirip pada *absorber* sistem PV/T dilakukan secara akurat dan rapi. Ketepatan pengukuran berperan penting dalam menghasilkan konfigurasi sirip yang optimal untuk meningkatkan perpindahan panas dan mendukung proses pendinginan modul fotovoltaik.

B. Bahan – bahan yang digunakan untuk pembuatan sirip pendingin konfigurasi paralel pada panel surya ini adalah sebagai berikut:

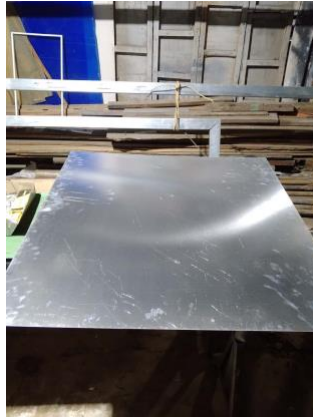
1. Modul Surya 20Wp *Polycrystalline*



Gambar 3.7 Modul Surya 20Wp *Polycrystalline*

Modul surya yang digunakan penelitian ini merupakan panel surya tipe *polycrystalline* daya maksimum sebesar 20 W. Panel tersebut memiliki tegangan kerja pada kondisi daya maksimum (V_{mp}) sebesar 18 V dan arus maksimum (I_{mp}) sekitar 1,14 A. Selain itu, tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) modul mencapai 21,6 V dengan arus hubung singkat (I_{sc}) kurang lebih 1,29 A. Dari segi fisik, modul surya ini berdimensi 45 cm \times 35 cm dengan ketebalan sekitar 1,6 cm.

2. Pelat Alumunium 1 mm



Gambar 3.8 Pelat Alumunium 1 mm

Pelat aluminium dengan ketebalan 1 mm digunakan sebagai bahan utama pembuatan sirip pendingin dan rangka sistem PV/T. Material aluminium dipilih karena memiliki konduktivitas termal tinggi (± 232 W/m·K), bobot ringan, serta ketahanan yang baik terhadap korosi. Ketebalan 1 mm dipilih untuk menjaga keseimbangan antara efektivitas perpindahan panas, kekuatan struktur, dan kemudahan proses fabrikasi seperti pemotongan, pembengkokan, pengeboran, dan penyambungan menggunakan paku rivet.

3. Paku Rivet 3,2 mm



Gambar 3.9 Paku Rivet 3,2 mm

Paku rivet yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter 3,2 mm dan digunakan untuk menyambungkan pelat aluminium dengan ketebalan 1 mm. Pemilihan ukuran rivet tersebut disesuaikan dengan ketebalan material serta kemampuan penguncian rivet, sehingga dapat membentuk sambungan permanen melalui proses deformasi plastis batang rivet dengan kekuatan mekanik yang memadai dan risiko deformasi lokal pada pelat aluminium yang minimal. Selain itu, paku rivet dipilih karena metode pemasangannya relatif sederhana, tidak memerlukan proses pemanasan, dan mampu menjaga kestabilan sambungan selama tahap pengujian.

4. *Thermal Adhesive* GD900-1



Gambar 3.10 *Thermal Adhesive* GD900-1

Thermal adhesive yang digunakan pada penelitian ini adalah GD9001 yang berfungsi sebagai perekat sekaligus penghantar panas antara modul surya, sirip pendingin, dan pelat aluminium. Material ini memiliki konduktivitas termal sekitar $6,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ sehingga mampu meningkatkan perpindahan panas dan mengurangi hambatan termal pada area kontak selama pengujian. Penggunaan *thermal adhesive* membuat sambungan antar komponen lebih rapat dan stabil, sehingga panas dari modul PV dapat disalurkan secara lebih efektif ke sirip pendingin untuk mendukung proses pendinginan sistem PV/T.

C. Berikut adalah alat – alat yang digunakan dalam pengujian proyek akhir ini adalah sebagai berikut.

1. *Data Logger* BTM-4208SD



Gambar 3.12 *Data Logger* BTM-4208SD

Data logger BTM-4208SD digunakan untuk merekam data temperatur secara kontinu selama pengujian. Alat ini mendukung input *thermocouple* tipe K sehingga memungkinkan pengukuran temperatur pada beberapa titik, seperti modul PV, sirip pendingin, dan lingkungan. *Data logger* memiliki rentang pengukuran $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan resolusi $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ serta dilengkapi penyimpanan SD card untuk pencatatan data otomatis. Perangkat ini digunakan sebagai dasar analisis kinerja termal sistem PV/T.

Data logger ini memiliki rentang pengukuran sekitar $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan resolusi $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga mampu memberikan hasil pengukuran yang cukup akurat untuk analisis kinerja termal. Alat ini juga dilengkapi dengan penyimpanan data menggunakan SD card yang memungkinkan perekaman otomatis pada interval waktu tertentu tanpa pencatatan manual, sehingga memudahkan pengambilan data temperatur yang stabil dan berkelanjutan selama pengujian berlangsung.

2. *Solar Power Meter SPM-1116SD*



Gambar 3.13 *Solar Power Meter SPM-1116SD*

Solar Power Meter SPM-1116SD digunakan untuk mengukur intensitas radiasi matahari (*irradiance*) yang diterima permukaan modul surya selama pengujian. Alat ini memiliki rentang pengukuran 0–2000 W/m² dengan resolusi 0,1 W/m² dan akurasi sekitar ±5%, serta dilengkapi fitur *data logging* berbasis SD card untuk merekam data radiasi secara kontinu sebagai parameter analisis kinerja sistem PV/T.

3. *Solar Charge Controller MPPT 70A*



Gambar 3.14 *Solar Charge Controller MPPT 70A*

Solar Charge Controller Perfect Suitor MPPT 70A digunakan untuk mengatur proses pengisian energi listrik dari modul surya ke baterai sekaligus melindungi sistem dari kondisi pengisian berlebih dan pengosongan berlebih. Perangkat ini bekerja dengan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengoptimalkan daya keluaran modul surya. *Solar charge controller* ini memiliki tegangan kerja 12/24 V DC dengan arus pengisian maksimum hingga 70 A, serta dilengkapi sistem proteksi dan indikator kondisi pengisian guna menjaga kestabilan dan keamanan operasi sistem selama pengujian.

4. *Digital Watt Meter*



Gambar 3.15 *Digital Watt Meter*

Digital Watt Meter digunakan sebagai alat ukur untuk memantau parameter listrik berupa tegangan, arus, dan daya keluaran modul surya selama pengujian. Alat ini dipasang pada rangkaian beban sehingga performa listrik sistem dapat diamati secara langsung. *Digital watt meter* yang digunakan memiliki rentang pengukuran tegangan sekitar 0–60 V DC dan arus hingga 100 A, serta menampilkan nilai daya secara *real time* untuk memudahkan pengambilan dan analisis data kinerja sistem PV/T selama pengujian.

6. *Thermocouple* Tipe – K



Gambar 3.16 *Thermocouple* Tipe – K

Thermocouple tipe K digunakan sebagai sensor temperatur untuk mengukur suhu pada beberapa titik pengujian, seperti permukaan modul PV, sirip pendingin, dan kondisi lingkungan. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip *efek Seebeck*, yaitu timbulnya tegangan akibat perbedaan temperatur pada dua logam yang berbeda. *Thermocouple* tipe K memiliki rentang pengukuran sekitar $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$, respons yang cepat, serta ketahanan yang baik terhadap temperatur tinggi, sehingga sesuai digunakan dalam pengujian kinerja termal sistem PV/T.

7. *Lead – Acid Battery*



Gambar 3.17 *Lead – Acid Battery*

Baterai yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *Valve Regulated Lead-Acid* (VRLA) dengan tipe LC-V127R2NA yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik hasil konversi modul surya sebelum dialirkan ke beban. Baterai ini memiliki tegangan nominal 12 V dengan kapasitas 7,2 Ah (20 HR). Secara fisik, baterai berdimensi 151 × 65 × 95 mm (panjang × lebar × tinggi) dengan berat sekitar 2,4 kg, sehingga sesuai untuk digunakan pada sistem PLTS skala laboratorium guna menjaga kestabilan suplai daya selama proses pengujian.

8. Kontainer Box 75 Liter

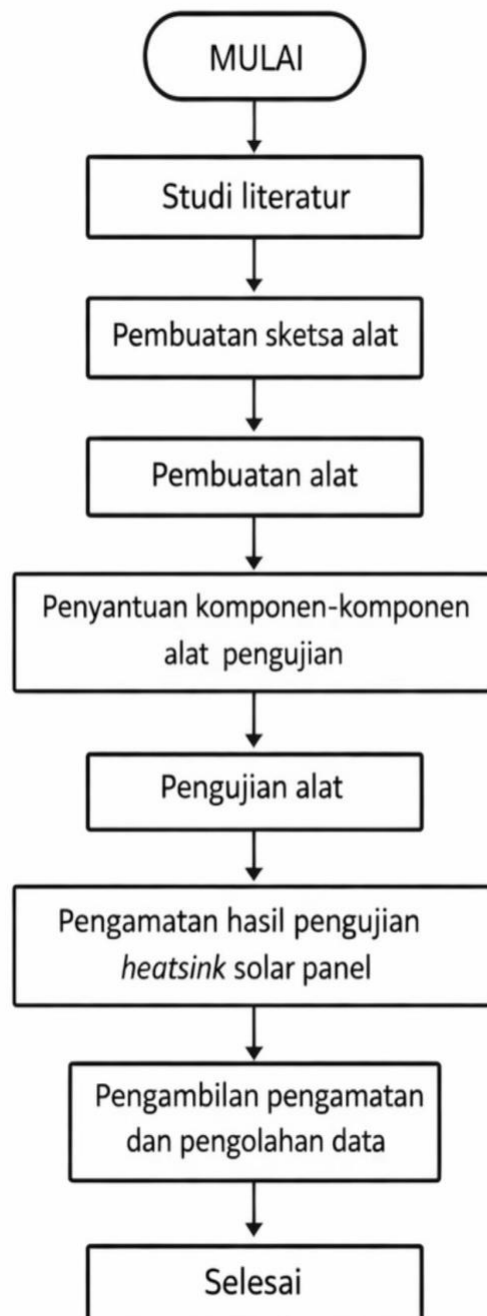


Gambar 3.18 Kontainer Box 75 Liter

Kontainer box digunakan sebagai wadah penampung media air pada proses pengujian perendaman sirip dalam sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T). Wadah ini berfungsi menampung air sebagai fluida pendingin yang bersentuhan langsung dengan sirip pendingin, sehingga perpindahan panas dari modul PV ke media pendingin dapat berlangsung secara optimal. Kontainer box yang digunakan memiliki kapasitas sekitar 75 liter, sehingga mampu menjaga kestabilan volume air dan memudahkan pengaturan variasi kedalaman perendaman sirip selama pengujian, serta membantu menjaga kondisi pengujian tetap terkontrol dan aman.

3.2 Diagram Alur Proyek Akhir

Tahapan dalam pembuatan proyek akhir sebagai berikut:



Gambar 3.19 Diagram Alur Proyek akhir

3.3 Prosedur Manufaktur Sirip Pendingin

Adapun prosedur pembuatan sirip pendingin dengan konfigurasi paralel adalah sebagai berikut.

1. Tahap Persiapan

Tahap awal mencakup kegiatan penelusuran literatur serta persiapan seluruh material dan peralatan yang dibutuhkan dalam proses pembuatan dan pengujian sirip pendingin berkonfigurasi paralel.

2. Tahap Pembuatan Sketsa

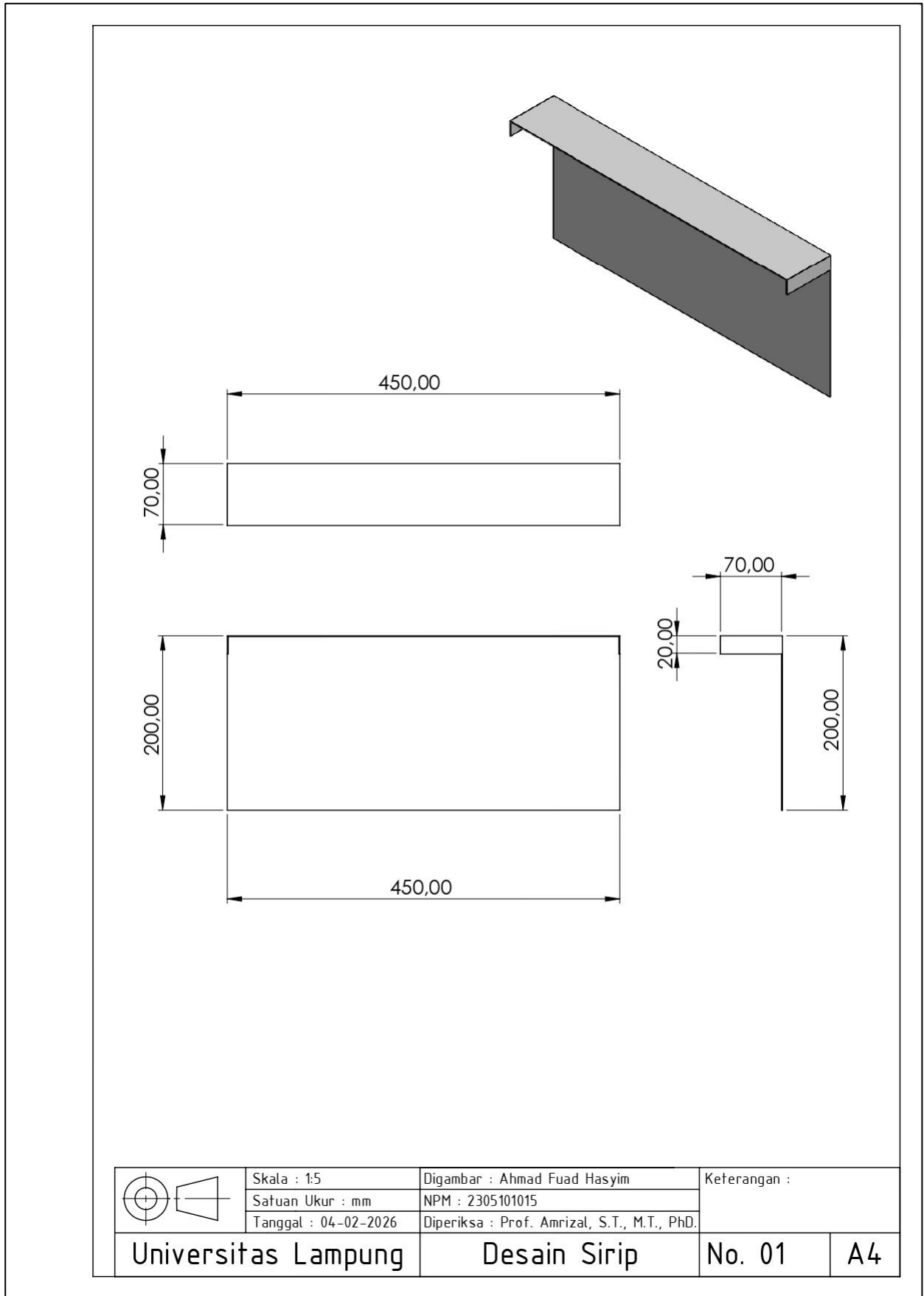
Pada tahap ini dilakukan perancangan visual sirip pendingin berkonfigurasi paralel menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* dengan dimensi panjang 450 mm, tinggi 200 mm, ketebalan 1,00 mm. Selanjutnya dibuat lekukan pemasangan setinggi 20,00 mm untuk keperluan perakitan serta ditentukan jarak antar sirip 70 mm sesuai dengan spesifikasi desain.

3. Tahap Perancangan (Desain) Sistem PV/T

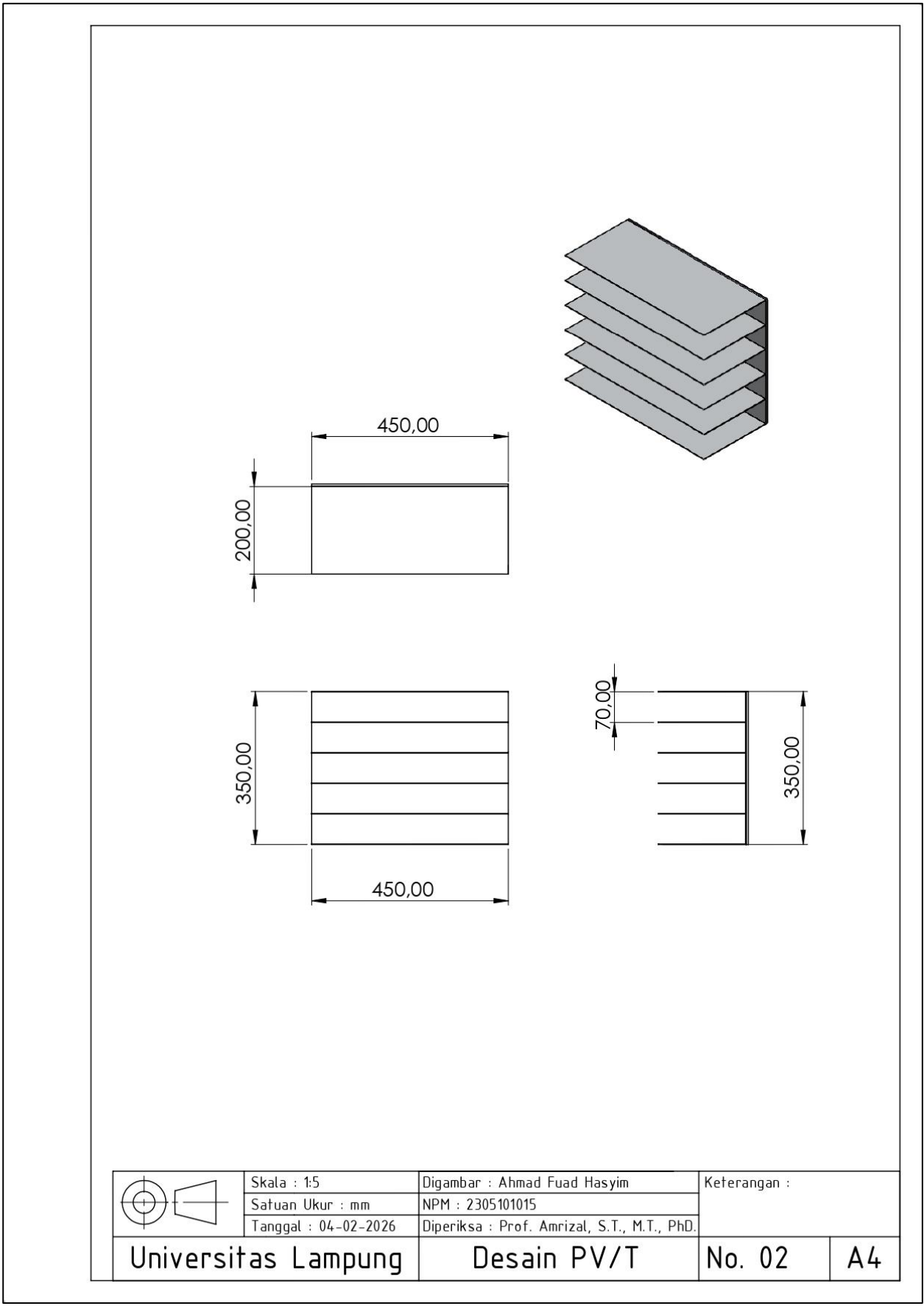
Perancangan sistem PV/T dilakukan menggunakan *SolidWorks* dengan ukuran modul 450 mm × 350 mm dan sirip pendingin paralel berjarak 70 mm di bagian bawah modul. Model 3D hasil perancangan digunakan sebagai acuan fabrikasi, analisis, dan pembuatan gambar kerja serta memastikan kemudahan perakitan dan kestabilan struktur

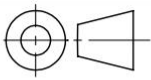
4. Tahap Pembuatan Sirip

Tahap pembuatan sirip pendingin diawali dengan persiapan material dan peralatan sesuai spesifikasi desain, kemudian pelat dipotong menggunakan mesin gerinda, dilanjutkan pembentukan siku L dengan bending manual dan pembuatan dudukan, selanjutnya penyusunan serta penyambungan sirip pada pelat dasar sesuai konfigurasi paralel, dan diakhiri dengan finishing serta pemeriksaan akhir sebelum perakitan dan pengujian



Gambar 3.23 Sketsa Visual Sirip



	Skala : 1:5	Digambar : Ahmad Fuad Hasyim	Keterangan :	
	Satuan Ukur : mm	NPM : 2305101015		
	Tanggal : 04-02-2026	Diperiksa : Prof. Amrizal, S.T., M.T., PhD.		
Universitas Lampung	Desain PV/T	No. 02	A4	

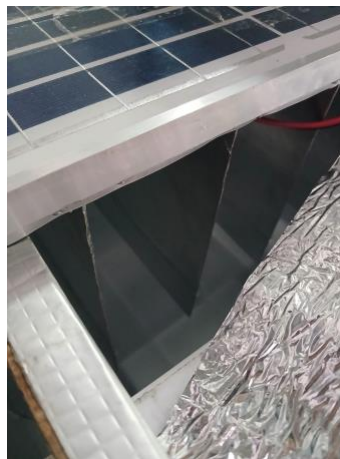
Gambar 3.24 Sketsa Pemodelan Sistem PV/T

3.4 Pengujian dan Pengambilan Data

Berikut adalah tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pengujian sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T) di Laboratorium Termodinamika, yaitu:

A. Tahap Persiapan dan Instalasi Sistem Uji

1. Modul PV/T dipasang pada rangka pengujian, kemudian sirip pendingin konfigurasi paralel dengan jarak antar sirip 70 mm dipasang sejajar dan dikencangkan pada bagian bawah modul.
2. Media pendingin disiapkan dengan mengisi air ke dalam kontainer box perendaman hingga mencapai ketinggian yang ditentukan sesuai variasi kedalaman perendaman, yaitu 25% dan 50%. Kontainer box diletakkan tepat di bawah sirip pendingin sehingga kontak termal antara sirip dan air dapat berlangsung secara optimal selama proses pengujian.



Gambar 3.22 Proses Persiapan Air

3. *Thermocouple* tipe K dipasang pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan, meliputi permukaan modul PV, kondisi lingkungan, dan temperatur air pendingin. Seluruh sensor kemudian dihubungkan ke *data logger* untuk merekam perubahan temperatur secara kontinu selama pengujian.



Gambar 3.23 Pemasangan *Thermocouple*

4. Pada sistem kelistrikan, modul PV/T dihubungkan ke rangkaian beban melalui *solar charge controller* yang berfungsi menjaga kestabilan tegangan dan arus keluaran serta melindungi sistem dari kondisi pengisian berlebih selama pengujian.



Gambar 3.24 Pemasangan Sistem Kelistrikan

5. Selanjutnya, digital *watt meter* dipasang pada jalur keluaran modul, dengan konfigurasi seri untuk pengukuran arus (A) dan paralel pada terminal keluaran untuk pengukuran tegangan (V). Nilai daya listrik (W) ditampilkan secara otomatis berdasarkan hasil pengukuran arus dan tegangan, sehingga kinerja keluaran listrik sistem PV/T dapat dipantau secara kontinu selama pengujian.

B. Tahap Pelaksanaan Pengujian Eksperimental

1. Solar simulator dinyalakan sebagai sumber radiasi buatan dan diarahkan tegak lurus ke permukaan modul PV/T. Selama pengujian, intensitas radiasi dijaga tetap konstan agar kondisi pemanasan yang dihasilkan seragam dan terkontrol.



Gambar 3.25 Mengatur Intensitas Solar Simulator

2. Sistem kemudian dijalankan hingga mencapai kondisi tunak (*steady state*), ditandai dengan temperatur permukaan modul PV yang relatif stabil terhadap waktu, sehingga data yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis kinerja termal dan listrik sistem PV/T.



Gambar 3.26 Pemantauan Temperatur Pengujian

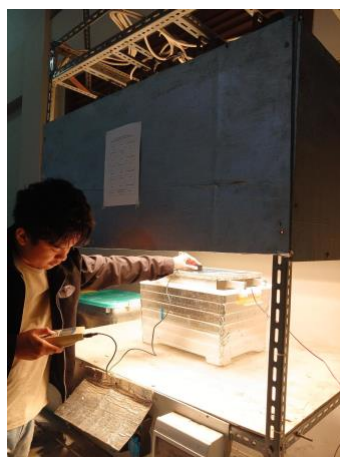
C. Tahap Pengambilan dan Perekaman Data

1. Pengukuran temperatur pada modul PV, lingkungan, dan air pendingin direkam menggunakan *data logger* yang dilengkapi *memory card* (SD card). Perekaman data dilakukan secara otomatis sejak solar simulator diaktifkan dengan interval waktu 5 detik untuk keperluan analisis kinerja termal.



Gambar 3.27 Proses Pengambilan Data Temperatur

2. Intensitas radiasi solar simulator diukur menggunakan *solar power meter* pada lima titik area pancaran, yaitu tengah, kiri, kanan, depan, dan belakang. Nilai intensitas yang digunakan merupakan rata-rata dari kelima titik pengukuran tersebut.



Gambar 3.28 Pengukuran Intensitas Radiasi

3. Parameter keluaran listrik sistem PV/T berupa tegangan (V), arus (A), dan daya (W) diukur menggunakan digital *watt meter* pada rangkaian beban. Pengukuran dilakukan secara *real time* selama pengujian untuk mengetahui performa keluaran listrik modul PV/T pada setiap variasi kedalaman perendaman, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis kinerja listrik sistem.



Gambar 3.29 Pengukuran Keluaran Listrik

4. Seluruh data hasil pengujian dicatat secara sistematis untuk setiap variasi kedalaman perendaman, serta pada kondisi tanpa perendaman dan tanpa sirip sebagai pembandingan. Data tersebut digunakan untuk membandingkan kinerja termal dan kinerja listrik sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T).



Gambar 3.30 Kondisi Saat Pengujian

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat dirumuskan berdasarkan tujuan penelitian dan hasil pengujian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sirip pendingin konfigurasi paralel dengan jarak antar sirip 70 mm berhasil dibuat dan diaplikasikan pada sistem *photovoltaic/thermal* (PV/T) melalui tahapan persiapan, fabrikasi, perakitan, dan finishing yang sistematis. Proses manufaktur meliputi pemotongan, pembentukan dudukan profil L, serta penyambungan mekanis menggunakan paku rivet yang dikombinasikan dengan *thermal adhesive*, sehingga dihasilkan struktur sirip yang kokoh dan memiliki kontak termal yang baik dengan modul PV. Konfigurasi sirip yang tersusun sejajar dan seragam menunjukkan kesiapan sistem PV/T untuk dilakukan pengujian perendaman pada kedalaman 25% dan 50%.
2. Perbedaan tingkat perendaman 25% dan 50% berpengaruh terhadap kinerja sistem PV/T. Semakin besar perendaman, temperatur modul semakin menurun, dari $\pm 86^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 63^{\circ}\text{C}$ (25%) dan $\pm 60^{\circ}\text{C}$ (50%). Penurunan temperatur ini meningkatkan daya keluaran dari 5,47 W menjadi 6,24 W. Dengan demikian, perendaman 50% memberikan kinerja yang lebih optimal dibandingkan 25%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan mengeksplorasi jarak antar sirip yang lebih bervariasi serta memodifikasi geometri sirip seperti tinggi, ketebalan, dan bentuk profil, sehingga dapat diperoleh konfigurasi paling optimal dalam menurunkan temperatur dan meningkatkan daya keluaran sistem PV/T.
2. Pengujian berikutnya perlu mencakup variasi kedalaman perendaman yang lebih luas, misalnya melebihi 50%, untuk mengetahui batas efektivitas pendinginan serta pengaruhnya terhadap kestabilan temperatur dan performa listrik sistem PV/T.
3. Penelitian lanjutan juga disarankan menambahkan analisis efisiensi termal dan efisiensi listrik, termasuk perhitungan rugi-rugi panas dan resistansi termal total, agar evaluasi kinerja sistem PV/T dapat dilakukan secara lebih komprehensif dan kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Z., dkk. (2023). *Green Technology: Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan Berbagai Bidang*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Cahyono, G. R., Ansyah, P., Riadi, J., & Awaly, N. Q. (2024). Pengaruh pendinginan menggunakan sirip terhadap performa panel surya. *Jurnal Teknik Elemen*, 8(1).
- Hidayat, R., Siregar, M., & Putra, R. (2019). Analisis pengaruh variasi bentuk sirip terhadap kinerja perpindahan panas heatsink. *Jurnal Teknik Mesin*, 8(2), 85–92.
- Harahap, P. (2020). Pengaruh temperatur permukaan panel surya terhadap daya yang dihasilkan dari berbagai jenis sel surya. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 2(2), 73-80.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing processes for engineering materials* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: *Pearson Education*.
- Khor, C. Y., Rosli, M. U., Nawi, M. A. M., Kee, W. C., & Ramdan, D. (2021). *Influence of inlet velocity and heat flux on the thermal characteristic of various heat sink designs using CFD analysis*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2051(1), 012013.
- Koesgi, D. P., & Wicaksono, D. (2021). Pengaruh Pemanasan Awal Terhadap Sifat Mekanik Sambungan *Spot Friction Stir Welding* Dalam Pemasangan Rivet Aluminium 2024. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 7(1), 140-153.

- Modul Pengenalan Teknologi Tenaga Surya. (2008). Pengenalan teknologi tenaga surya (hlm. 32). Jakarta: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Energi Terbarukan.
- Nugroho, C. B., & Hidayat, R. (2016). Studi cacat permukaan plat aluminium pada proses pembengkokkan sudut mesin bending. Politeknik Negeri Batam.
- Prasetyo, B., Rahman, A., & Kurniawan, D. (2021). Peningkatan performa panel surya menggunakan heatsink sebagai pendingin pasif. *Jurnal Energi Terbarukan*, 10(3), 145–153.
- Pratomo, L. B., & Sinaga, N. (2023). Tinjauan singkat optimalisasi pemanfaatan energi surya pada sektor rumah tangga. *Jurnal Mineral, Energi, dan Lingkungan*, 6(2), 1-7.
- Rahman, F., & Wibowo, T. (2019). Pemanfaatan sel surya sebagai pembangkit listrik ramah lingkungan. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(3), 134–141.
- Rahman, T., & Wijaya, R. (2022). Struktur material dan performa sel surya silikon: tinjauan teknologi fotovoltaik. *Jurnal Fisika Terapan Indonesia*, 15(4), 112-121.
- Sakti, A. M. (2010). Optimalisasi proses gerinda untuk permukaan. *Jurnal teknik industri*, 11(1), 26-30.
- Saputra, A. (2021). Pengaruh temperatur dan intensitas radiasi terhadap karakteristik I-V modul fotovoltaik. *Jurnal Teknik Elektro Nusantara*, 8(1), 23-31.
- Saputra, A. (2021). Teknologi penyambungan mekanis pada struktur industri. Jakarta: Graha Ilmu.

- Saputra, A., & Nugroho, Y. (2020). Studi karakteristik termal aluminium sebagai material heatsink pada sistem pendingin pasif. *Jurnal Rekayasa Energi*, 6(1), 15–22.
- Saputra, M. R., & Arizona, R. (2023). Pengaruh variasi pendingin pada permukaan bawah panel surya terhadap daya output dan efisiensi. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 15(2), 112–115.
- Sugianto, S. (2025). *Comparative analysis of solar cell efficiency between monocrystalline and polycrystalline*. INTEK:
- Surdia, T., & Saito, S. (2013). Pengetahuan bahan teknik. Jakarta, Indonesia: Pradnya Paramita.
- Utami, S., & Daud, A. (2021). Pengaruh temperatur panel surya terhadap efisiensi panel surya: Sistem monitoring menggunakan IoT. *Jurnal Teknik Energi*, 11(1).
- Widodo, S. (2019). Proses bending pada pembentukan logam lembaran. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(2), 85–92.
- Yogestio, Y., Surindra, M. D., et al. (2020). Perbandingan kinerja sel surya jenis Thin-Film dan Polycrystalline (Studi Kasus: Pontianak). *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*.
- Zulhakim. (2025). Analisis perbandingan efisiensi panel surya polikristalin dan monokristalin dalam kondisi iklim tropis. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*