

**ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC THERMAL* DENGAN
SIRIP TIPE *CROSS-CUT HEATSINK* SUSUNAN *STAGGERED*
MENGUNAKAN METODE PENDINGINAN ALAMI**

SKRIPSI

Oleh:

Zyelena Wahyu Amalia

2115021005



**TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

**ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC THERMAL* DENGAN
SIRIP TIPE *CROSS-CUT HEATSINK* SUSUNAN *STAGGERED*
MENGUNAKAN METODE PENDINGINAN ALAMI**

Oleh:

Zyelena Wahyu Amalia

2115021005

Skripsi

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

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik



**TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC THERMAL* DENGAN SIRIP TIPE *CROSS-CUT HEATSINK* SUSUNAN *STAGGERED* MENGUNAKAN METODE PENDINGINAN ALAMI

Oleh:

Zyelena Wahyu Amalia

2115021005

Peningkatan kebutuhan energi listrik dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil mendorong pengembangan energi terbarukan, khususnya energi surya melalui sistem *photovoltaic* (PV). Namun, kenaikan temperatur permukaan akibat radiasi matahari dapat menurunkan efisiensi listrik PV. Penelitian ini menganalisis efisiensi *thermal* dan elektrik unjuk kerja sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan penambahan sirip pendingin tipe *cross-cut heatsink* susunan *staggered* menggunakan pendinginan alami. Pengujian dilakukan di luar ruangan menggunakan panel monokrystalin 50 Wp dengan variasi tutupan *heatsink* 0, 33, 66, dan 99. Parameter yang dianalisis meliputi irradiasi, temperatur PV, temperatur *heatsink*, arus, dan tegangan keluaran. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan *cross-cut heatsink* mampu menurunkan temperatur permukaan PV dan meningkatkan efisiensi sistem. Tutupan *heatsink* 99 memberikan hasil terbaik dengan efisiensi termal sebesar 53,41% dan efisiensi listrik 18,26%. Secara keseluruhan, pendinginan alami menggunakan *cross-cut heatsink* terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja sistem *Photovoltaic-Thermal*.

Kata kunci: *Photovoltaic-Thermal*, *cross-cut heatsink*, pendinginan alami, efisiensi termal, efisiensi listrik.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF A PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEM WITH STAGGERED CROSS-CUT HEATSINK FINS USING A NATURAL COOLING METHOD

By:

**Zylena Wahyu Amalia
2115021005**

The increasing demand for electrical energy and the continued dependence on fossil fuels have encouraged the development of renewable energy, particularly solar energy through photovoltaic (PV) systems. However, an increase in surface temperature caused by solar radiation can reduce the electrical efficiency of PV modules. This study analyzes the performance of a Photovoltaic–Thermal (PV/T) system with the addition of staggered cross-cut heatsink fins using a natural cooling method. Experimental testing was conducted outdoors using a 50 Wp monocrystalline photovoltaic panel with heatsink coverage variations of 0, 33, 66, and 99. The analyzed parameters included solar irradiance, PV surface temperature, heatsink temperature, output current, and output voltage. The results indicate that the use of cross-cut heatsinks effectively reduces the PV surface temperature and improves system efficiency. The 99 heatsink coverage produced the best performance, achieving a thermal efficiency of 53,41% and an electrical efficiency of 18,26%. Overall, natural cooling using cross-cut heatsinks is proven to be effective in enhancing the performance of the Photovoltaic–Thermal system.

Keywords: *Photovoltaic–Thermal, cross-cut heatsink, natural cooling, thermal efficiency, electrical efficiency.*

LEMBAR PENGESAHAN

Judul skripsi : ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC THERMAL* DENGAN SIRIP TIPE *CROSS-CUT HEATSINK* SUSUNAN *STAGGERED* MENGGUNAKAN METODE PENDINGINAN ALAMI

Nama mahasiswa : *Zyfelena Wahyu Amalia*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021005

Program Studi : S1 Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



Komisi Pembimbing

[Signature]
Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197002021998031004

[Signature]
Ahmad Yonanda, S.T., M.T.
NIP. 199301102019031008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

[Signature]
Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

[Signature]
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

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

2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 22 Januari 2026

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Zyelena Wahyu Amalia
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021005
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "*Analisis Unjuk Kerja Photovoltaic Thermal Dengan Sirip Tipe Cross-cut Heatsink Susunan Staggered Menggunakan Metode Pendinginan Alami*" adalah hasil karya ilmiah saya sendiri yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana pada Universitas Lampung. Skripsi ini tidak mengandung karya atau tulisan orang lain, baik sebagian maupun seluruhnya, kecuali yang telah disebutkan secara jelas dalam kutipan dan daftar pustaka sebagaimana layaknya karya ilmiah. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung.

Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan saya bersedia menanggung segala akibat yang ada, apabila pernyataan ini tidak benar.

Bandar Lampung, 02 Februari 2026



[Signature]
Zyelena Wahyu Amalia

2115021005

RIWAYAT HIDUP



Penulis Bernama Zyelena Wahyu Amalia, lahir di Kelaten pada tanggal 02 Desember 2003. Penulis merupakan anak dari pasangan Saryono dan Tri Asih. Sejak kecil, penulis menempuh pendidikan di SD Negri 3 Kelaten dan lulus pada tahun 2015. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP N 1 Penengahan, yang diselesaikan pada tahun 2018, serta melanjutkan pendidikan menengah akhir di SMAN 2 Kalianda dan berhasil lulus pada tahun 2021.

Penulis menjalankan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Paduan Rajawali, Kec. Paduan Rajawali, Kab. Tulang Bawang pada awal Januari – Februari 2024. Pada tahun 2024. Penulis berkesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PLTU UNIT SEBALANG, Kabupaten Lampung Selatan dengan mengambil topik “Analisis Pengaruh Veriasi Jumlah *Tube* Pada *High Preassure Heater Tipe Shell And Tube* Terhadap Evektivitas Alat Penukar Kalor Di PT PLN Nusantara Power UP Sebalang”.

Tahun 2024 Penulis melakukan penelitian di bidang *Photovoltaic Thermal* atau Energi Terbarukan dengan judul “ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC THERMAL* DENGAN SIRIP TIPE *CROSS-CUT HEATSINK* SUSUNAN *STAGGERED* MENGGUNAKAN METODE PENDINGINAN ALAMI” dibawah bimbingan Bapak Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. serta Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T., sebagai pembahas.

MOTTO

**“ Semua Jatuh Bangunmu, Hal Yang Biasa Angan dan Pertanyaan, Waktu
Yang Menjawabnya Berikan Tenggat Waktu, Bersedihlah Secukupnya
Rayakan Perasaanmu Sebagai Manusia”**

-(Baskara Putra-Hindia)-

**“Saya Datang, Saya Bimbingan, Saya Ujian, Saya Revisi, Dan Saya
Menang”**

-SAPRI (Saya Pribadi)-

**“Dan Jika Bicara Tentang Masa Depan, Aku Pun Bingung Tak Punya
Tebakan”**

-(Baskara Putra-Hindia)-

HALAMAN PERSEMBAHAN



Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar. Sholawat serta salam selau tercurahkan kepada Nabiallah Nabi Muhammad SAW

KARYA TULIS INI SAYA PERSEMBAHKAN KEPADA

Ibunda dan Ayahanda Tercinta

Yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasiku, memberikan semangat dan doa yang tiada henti-hentinya selalu menyertai. Terima kasih atas cinta, doa, dukungan, serta pengorbanan tanpa hentinya yang tidak akan pernah bisa penulis balas sepenuhnya. Segala pencapaian ini adalah buah dari doa dan usaha kalian yang menyertai saya selama proses penyelesaian skripsi ini.

Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin 2021

Serta

Almamater Tercinta Universitas Lampung

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan nikmat-Nya kepada Penulis, sehingga Penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“ANALISIS UNJUK KERJA *PHOTOVOLTAIC THERMAL* DENGAN SIRIP TIPE *CROSS-CUT HEATSINK* SUSUNAN *STAGGERED* MENGGUNAKAN METODE PENDINGINAN ALAMI”**. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini banyak pihak yang telah memberikan pengalaman, dukungan, dan bantuan baik secara materi maupun motivasi. Hal tersebutlah yang sangat memotivasi penulis dalam menyelesaikan Skripsi ini. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T, M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. Selaku Ketua Prodi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Nafrizal, S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan arahan selama dibangku perkuliahan.
5. Bapak Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D Selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan memberikan saran dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Seluruh Dosen, Staff dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas

Lampung.

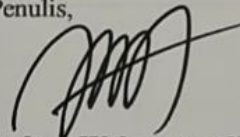
9. Terimakasih tak terhingga kepada kedua orang tua tercinta saya yakni Ayah dan Mamah yang dengan segala pengorbanan, kerja keras, dan kasih sayanng tulusnya selalu mendukung saya dalam setiap langkah. Skripsi ini kupersembahkan sebagai bentuk bakti dan penghormatan kepada kedua orang tua saya.
10. Keluarga besar, seseorang yang darahnya ikut mengalir dalam tubuh saya, terimakasih yang tak terhingga untuk kalian semua. Sosok yang sudah membantu penulis dalam materi penulis hingga meraih gelar Sarjana Teknik. Yang telah mendukung penulis selama masa perkuliahan hingga meraih gelar Sarjana Teknik.
11. Saya mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Shifa Qana Laila atas segala bantuan dan dedikasi yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
12. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 khususnya Anggita Dwi Marshanda dan Hanifa Nurjanah Iskandar, serta teman-teman yang ada di laboratorium termodinamika, motor bakar, mekanika struktur, dan fluida di jurusan teknik mesin UNILA yang telah kebersamai, memberi motivasi dan semangat selama perkuliahan .
13. Teman-teman yang berada di kampung halaman semasa SMA yang telah menjadi tempat cerita dan selalu memberi dukungan serta motivasi kepada penulis selama ini. Untuk mba Lulu dan juga mba Shela yang sudah memberikan segalanya untuk penulis. Penulis berharap ikatan persahabatan ini tidak akan pernah terputus sampai kapanpun dan selalu saling mendukung satu sama lain.
14. Teruntuk seseorang dengan kepemilikan NIM 123360100 yang pernah singgah cukup lama bersama penulis. Terimakasih untuk patah hati yang diberikan saat penyusunan tugas akhir ini memberikan cukup motivasi untuk terus maju dan berproses menjadi pribadi yang mengerti arti pengalaman, pendewasaan, sabar dan arti kehilangan. Saya sangat berterimakasih atas dukungan emosi, materi, tenaga serta menyemangati penulis melalui belakang layar, sekali lagi saya ucapkan terimakasih. Terimakasih telah menjadi bagian menyenangkan

sekaligus menyakitkan dari pendewasaan ini.

15. Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak. Akhir kata penulis sangat berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembacanya.

Bandar Lampung, Januari 2026

Penulis,



Zylena Wahyu Amalia
NPM. 2115021005

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	ii
DAFTAR TABEL	iii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Energi Terbarukan	6
2.2 Perpindahan Panas	7
2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi	7
2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi	9
2.2.3 Radiasi	10
2.3 <i>Photovoltaic</i>	11
2.4 Jenis <i>Photovoltaic</i>	14
2.4.1 <i>Mono-Crystalline Photovoltaic</i>	14
2.4.2 <i>Poly-Crystalline Photovoltaic</i>	15
2.4.3 <i>Thin-Film Photovoltaic</i>	16
2.5 <i>Photovoltaic-Thermal (PV/T)</i>	16
2.6 <i>Heatsink</i>	19
III. METODOLOGI PENELITIAN	21

3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian	21
3.1.1 Tempat Penelitian	21
3.1.2 Waktu Penelitian.....	21
3.2 Diagram Alur Penelitian	22
3.3 Alat dan Bahan	23
3.4 Prosedur Penelitian.....	29
3.4.1 <i>Heatsink yang digunakan Sistem Photovoltaic-Thermal (PV/T)</i>	29
3.4.2 Skema Penelitian	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Hasil Pengambilan Data	33
4.2 Pembahasan	35
4.2.1 <i>Photovoltaic – Thermal (PV/T) Tidak Menggunakan Heatsink dan Menggunakan Tutupan Heatsink</i> 33	35
4.2.2 <i>Photovoltaic Thermal Tutupan Heatsink</i> 66 Berdasarkan Irradiasi.....	40
4.2.3 <i>Photovoltaic Thermal Tutupan Heatsink</i> 99 Berdasarkan Irradiasi	43
4.2.4 Grafik Efisiensi <i>Thermal</i> Berdasarkan Irradiasi.....	50
4.2.5 Grafik Efisiensi Listrik Berdasarkan Irradiasi	53
V. PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN.....	61

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi	8
Gambar 2.2 Batas lapisan perpindahan panas konveksi	9
Gambar 2.3 Pancaran radiasi.....	11
Gambar 2.4 Struktur modul <i>photovoltaic</i>	12
Gambar 2.5 Prinsip kerja <i>photovoltaic</i>	14
Gambar 2.6 <i>Mono-crystalline photovoltaic</i>	15
Gambar 2.7 <i>Poly-crystalline photovoltaic</i>	15
Gambar 2.8 <i>Copper indium diselenide thin-film photovoltaic</i>	16
Gambar 2.9 Skema kerja pada <i>photovoltaic thermal</i> (pv/t)	17
Gambar 2.10 (a) <i>Rectangular heatsink</i> , (b) <i>Circular heatsink</i> , (c) <i>Cross- cut heatsink</i>	20
Gambar 3. 1 Diagram alur penelitian.....	23
Gambar 3.2 <i>Solar power meter</i> spm-1116 sd.....	24
Gambar 3.3 <i>Thermocouple</i>	24
Gambar 3.4 MPPT	25
Gambar 3.5 <i>Temperature recorder</i> luntan btm-420 sd.....	26
Gambar 3.6 <i>Anemometer</i> lm-8000a	26
Gambar 3.7 Aki no. lc-v127r2n41.....	27
Gambar 3.8 <i>Monokrystalin photovoltaic</i>	27
Gambar 3.9 <i>Cross-cut heatsink</i>	28
Gambar 3. 10 Lampu beban dc led 50 watt	28
Gambar 3. 11 Pasta termal gd-900	29
Gambar 3.12 Dimensi <i>cross-cut heatsink</i>	30
Gambar 3. 13 (a) susunan <i>straggered</i> tutupan <i>heatsink</i> 33, (b) susunan <i>straggered</i> tutupan <i>heatsink</i> 66, (c) sususnan <i>heatsink</i> 99	30

Gambar 3.14 Skema penelitian	31
Gambar 3.15 Skema penelitian.	32
Gambar 4.1 Grafik Temperatur Tanpa <i>Heatsink</i> Dan Tutupan <i>Heatsink</i> 33 Berdasarkan Irradiasi.....	36
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Arus Listrik Tanpa <i>Heatsink</i> Dan Menggunakan Tutupan <i>Heatsink</i> 33 Berdasarkan Irradiasi..	37
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Tegangan Tanpa <i>Heatsink</i> Dan Tutupan <i>Heatsink</i> 33 Berdasarkan Irradiasi.	39
Gambar 4.4 Grafik temperatur PV Tutupan 66 Berdasarkan Irradiasi.....	40
Gambar 4.5 Grafik Arus PV Tutupan 66 Berdasarkan Irradiasi	41
Gambar 4.6 Grafik Tegangan <i>Heatsink</i> Tutupan 66 Berdasarkan Irradiasi.	42
Gambar 4.7 Grafik Temperatur Pv Tutupan <i>Heatsink</i> 99 Berdasarkan Irradiasi. ..	43
Gambar 4.8 Grafik Arus Tutupan <i>Heatsink</i> 99 Berdasarkan Irradiasi	44
Gambar 4.9 Grafik Tegangan Tutupan <i>Heatsink</i> 99 Berdasarkan Irradiasi.	46
Gambar 4.10 Grafik Efisiensi <i>Thermal</i> Tutupan <i>Heatsink</i> 33 Berdasarkan Irradiasi.....	50
Gambar 4.11 Grafik Efisiensi Grafik Efisiensi <i>Thermal</i> Tutupan <i>Heatsink</i> 66 Berdasarkan Irradiasi.....	51
Gambar 4.12 Grafik Efisiensi L <i>Thermal</i> Tutupan <i>Heatsink</i> 99 Berdasarkan Irradiasi.	52

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4. 1 Hasil rata-rata percobaan <i>photovoltaic</i> tanpa menggunakan <i>heatsink</i> dan menggunakan tutupan <i>heatsink</i> 33	34
Tabel 4. 2 Hasil rata-rata percobaan <i>photovoltaic</i> menggunakan tutupan <i>heatsink</i> 66	34
Tabel 4. 3 Hasil rata-rata percobaan <i>photovoltaic</i> menggunakan tutupan <i>heatsink</i> 99	34
Tabel 4.4 Hasil efisiensi <i>thermal</i> dan listrik <i>photovoltaic</i> tanpa menggunakan <i>Heatsink</i> dan menggunakan tutupan <i>Heatsink</i> 33.....	47
Tabel 4.5 Hasil efisiensi <i>thermal</i> dan listrik <i>photovoltaic</i> menggunakan tutupan <i>heatsink</i> 66.....	47
Tabel 4.6 Hasil efisiensi <i>thermal</i> dan listrik <i>photovoltaic</i> menggunakan tutupan <i>Heatsink</i> 99.....	48

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambahan jumlah penduduk menyebabkan peningkatan penggunaan energi listrik dari waktu ke waktu. Peningkatan kebutuhan listrik tersebut sebagian besar masih dipenuhi oleh pembangkit listrik konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil sehingga menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan. Semakin tinggi penggunaan energi listrik, semakin besar pula jumlah bahan bakar fosil yang dikonsumsi dalam proses pembangkitannya. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi turut mendorong meningkatnya kebutuhan energi listrik, baik di sektor industri maupun dalam penggunaan peralatan rumah tangga. Energi listrik dipilih karena memiliki tingkat efisiensi, keekonomisan, dan kepraktisan yang lebih tinggi dibandingkan bentuk energi lainnya. Pada kondisi saat ini, energi listrik tidak hanya berfungsi sebagai kebutuhan penunjang aktivitas sehari-hari, tetapi juga telah menjadi kebutuhan utama dalam mendukung pembangunan nasional.

Pengembangan energi baru dan terbarukan dilaksanakan untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi tak terbarukan. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional, ditetapkan target energi baru dan terbarukan sebesar minimal 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yang menjanjikan adalah *Photovoltaic*, yang berfungsi menangkap radiasi matahari sebagai bentuk energi yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan tanpa risiko kehabisan sumbernya. *Photovoltaic* (PV) terdiri dari sel-sel yang terbuat dari semikonduktor silikon kristalin, yang disusun dalam konfigurasi seri atau paralel untuk membentuk modul surya. Teknologi ini mampu mengubah gelombang

elektromagnetik dari pancaran cahaya (*photon*) matahari menjadi energi listrik. Penggunaan *Photovoltaic* (PV) menawarkan sejumlah keunggulan, di antaranya adalah sifatnya yang ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan emisi karbon (CO₂) selama proses produksinya. Selain itu, perawatan modul PV tergolong mudah, dan sumber energi yang dihasilkan dapat diperoleh secara terus-menerus tanpa memerlukan waktu lama untuk pemulihan. Indonesia, sebagai negara yang kaya akan sumber daya alam, memiliki potensi EBT yang sangat besar. Potensi ini berasal dari berbagai sumber, termasuk energi matahari, air, angin, biomassa, laut, dan panas bumi. Meskipun potensi yang dimiliki sangat besar, realisasi pemanfaatannya masih belum sebanding. Energi listrik yang dapat dihasilkan dari potensi EBT di Indonesia diperkirakan mencapai 432 GW (Kementerian ESDM, 2019), cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Namun, dari potensi yang melimpah tersebut, saat ini baru sekitar 7 GW yang telah dimanfaatkan secara komersial (Sianipar dkk., 2024).

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan panel surya (*photovoltaic*/PV) adalah biaya instalasi awal yang cukup tinggi sekitar Rp. 900 sampai Rp. 2000/kWh nya dibandingkan dengan sumber energi batubara. PVT dengan pendinginan alami dan sirip *cross-cut heatsink* memiliki beberapa kekurangan. Salah satunya adalah kemampuan pendinginan yang terbatas karena hanya bergantung pada konveksi alami, yang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, dan distribusi suhu yang tidak merata pada permukaan modul. Sirip meningkatkan massa, ukuran, dan biaya fabrikasi, tetapi debu di sirip dapat menurunkan efektivitas perpindahan panas. Oleh karena itu, jika dibandingkan dengan sistem pendinginan aktif, peningkatan efisiensi termal dan elektrik yang dihasilkan masih sangat kecil.

Selain itu, efisiensi panel PV sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan kondisi cuaca. Ketika suhu meningkat akibat paparan sinar matahari, efisiensi panel surya dapat menurun. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendinginan untuk menjaga kinerjanya tetap optimal. Salah satu metode

pendinginan yang efektif adalah dengan menggunakan *heatsink* yang disusun secara *staggered*. Penelitian oleh Hasan dkk. (2017) menunjukkan bahwa penggunaan *heatsink* dengan desain *staggered* dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 12% dan efisiensi elektrik hingga 8%, yang menjadi dasar penting untuk pengembangan sistem pendinginan alami pada panel PV. Selain itu, penelitian oleh Dubey dkk. (2013) mengonfirmasi bahwa peningkatan suhu panel dapat mengurangi efisiensi konversi energi hingga 0,5% per derajat Celsius, sehingga menegaskan pentingnya sistem pendinginan untuk menjaga kinerja panel PV. Selain itu menurut Nazaar dkk., (2024) peningkatan daya bersih rata-rata berkisar antara 1,07 W - 2,07 W (4,70%- 16,17%) sedangkan peningkatan efisiensi rata-rata panel surya adalah 0,38%-1,24%.

Di sisi lain, banyak penelitian sebelumnya yang mengembangkan metode pendinginan paksa, yang tentunya membutuhkan tambahan konsumsi energi listrik. Dalam penelitian ini, penulis fokus pada metode pendinginan alami yang memanfaatkan angin dan radiasi matahari secara langsung. Pengujian dilakukan di luar ruangan dengan memperhatikan variasi intensitas cahaya matahari serta kecepatan angin. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menghitung dan menganalisis efisiensi termal dan elektrik dari sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang dilengkapi dengan *cross-cut heatsink*. Penelitian sebelumnya oleh Tonui dkk., (2007) telah mengembangkan sistem PV/T dengan menggunakan *heatsink*, yang menunjukkan peningkatan efisiensi termal hingga 15% dan efisiensi elektrik hingga 10%. Selain itu, penelitian oleh Abdullah dkk., (2019) mengusulkan sistem pendinginan alami dengan memanfaatkan angin dan radiasi matahari langsung, yang dapat meningkatkan efisiensi panel PV sebesar 5-7% tanpa memerlukan tambahan konsumsi energi listrik. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain *heatsink* dan sistem pendinginan alami guna meningkatkan efisiensi panel PV secara keseluruhan.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang didapatkan berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan

sebagai berikut:

1. Menganalisis efisiensi yang dihasilkan *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan pendinginan *cross-cut heatsink*.
2. Menganalisis efisiensi elektrik yang dihasilkan *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan pendinginan *cross-cut heatsink*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada pengujian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan di luar hanggar jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung menggunakan *photovoltaic* dengan menggunakan energi matahari.
2. Pengujian menggunakan *heatsink* tipe *cross-cut* dengan ukuran 4x4 cm.
3. Penelitian menggunakan udara sebagai pendinginan alami.
4. Pengujian menggunakan satu panel *Photovoltaic* (PV) dengan daya 50 Wp dengan ukuran 67 cm x 40 cm.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan untuk penyusunan laporan tugas akhir ini sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

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

II. TINJAUAN PUSTAKA

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

III. METODOLOGI PENELITIAN

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

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil data yang telah diperoleh selama penelitian, analisa, dan pembahasan mengenai analisis unjuk kerja *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan *cross-cut heatsink* baik efisiensi termal dan efisiensi elektrik.

V. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

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

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Terbarukan

Energi terbarukan merupakan jenis energi yang berasal dari sumber alami yang dapat diperbarui atau dipulihkan secara alami dalam waktu relatif singkat. Sumber-sumber ini biasanya tidak akan habis meskipun digunakan secara terus-menerus, berbeda dengan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, atau gas alam yang memerlukan jutaan tahun untuk terbentuk kembali. Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yaitu dengan menggunakan energi matahari dengan upaya besar dalam mengurangi penggunaan sumber daya fosil yang sudah semakin menipis (Sulaiman dkk., 2024). Energi matahari dimanfaatkan melalui teknologi seperti panel surya, yang mengubah sinar matahari menjadi listrik, serta pemanas air tenaga surya untuk keperluan rumah tangga dan industri. Langkah ini tidak hanya membantu menjaga kelestarian sumber daya alam, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca, sehingga mendukung upaya global dalam menghadapi perubahan iklim.

Energi matahari adalah sumber energi yang berasal dari sinar matahari dan merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang paling melimpah di bumi. Energi ini dapat dimanfaatkan melalui teknologi seperti panel surya yang mengubah cahaya matahari menjadi listrik, atau kolektor surya yang digunakan untuk menghasilkan panas. Selain ramah lingkungan, energi matahari tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca sehingga membantu mengurangi dampak perubahan iklim. Dengan potensi yang besar, terutama di daerah beriklim tropis, energi matahari menjadi alternatif yang menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar fosil dalam memenuhi kebutuhan energi global. Investasi dalam teknologi energi surya juga mendukung keberlanjutan dan kemandirian energi di masa depan. Di Indonesia, potensi energi surya sangat

besar, khususnya di provinsi Lampung sendiri terletak pada koordinat $105^{\circ} 50'$ - $103^{\circ} 40'$ Bujur Timur dan $3^{\circ} 45'$ - $6^{\circ} 45'$ Lintang Selatan. Kondisi ini memungkinkan Indonesia menerima sinar matahari secara konsisten sepanjang tahun.

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

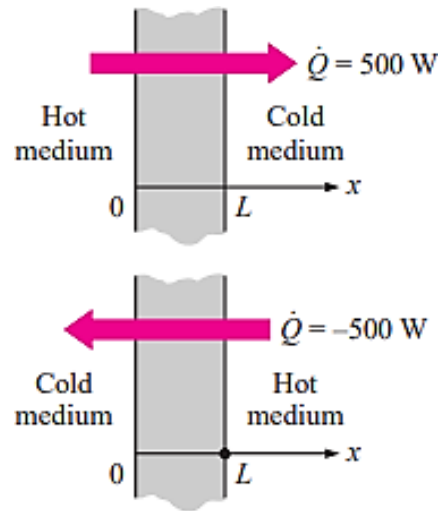
2.2 Perpindahan Panas

Perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut. Dalam kehidupan sehari-hari, perpindahan panas memainkan peran penting dalam berbagai proses, baik alami maupun buatan. Perpindahan perpindahan panas pada umumnya dibedakan menjadi tiga cara yang berbeda: konduksi, konveksi dan radiasi (Çengel, Y.A. dkk., 2011).

2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi adalah proses pemindahan panas dari wilayah bertemperatur tinggi ke wilayah bertemperatur lebih rendah dalam satu medium (padat, cair, atau gas) atau antara medium yang berbeda yang bersinggungan langsung. Dalam konduksi panas, energi berpindah melalui hubungan molekul langsung tanpa perpindahan molekul yang signifikan. Konduksi adalah satu-satunya cara panas dapat mengalir

dalam zat padat yang tidak tembus cahaya. Konduksi juga penting dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat (Çengel, Y.A. and Ghajar, 2011). Arah perpindahan panas pada konduksi diilustrasikan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2. 1 Perpindahan panas konduksi

(Sumber: Çengel, Y.A. dkk., 2011)

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

$$Q_{\text{cond}} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta X} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

Q_{cond} = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)

K = Konduktivitas termal (W/m. °C)

A = Luas penampang rambat panas (m²)

ΔT = Perubahan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

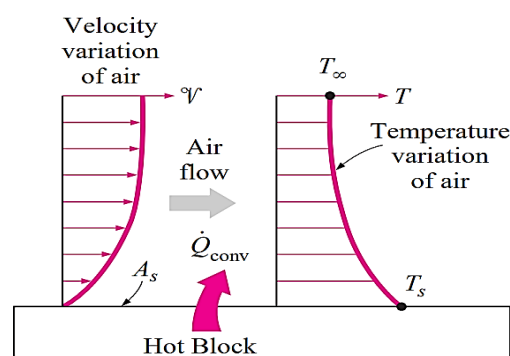
Δx = Perubahan jarak (m)

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

2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi

Energi berpindah melalui konveksi dari suatu permukaan yang suhunya lebih tinggi dari suhu fluida sekitarnya dalam beberapa tahap. Pertama, energi tersebut meningkatkan suhu dan energi dalam partikel fluida yang berdekatan. Kemudian, partikel fluida yang suhunya telah naik akan bergerak ke wilayah fluida yang suhunya lebih rendah, di mana partikel-partikel ini akan bercampur dan mentransfer sebagian energinya ke partikel fluida lainnya. (Çengel, Y.A. and Ghajar, 2011).

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



Gambar 2.2 Batas lapisan perpindahan panas konveksi
(Sumber: Çengel, Y.A. dkk., 2011)

Aliran fluida di atas permukaan pada Gambar 2.2 semakin melambat

ketika mendekati permukaan dan bernilai nol pada titik temu antara fluida dan permukaan (*no-slip condition*). Perpindahan panas konveksi dibagi menjadi dua jenis yaitu konveksi secara alami dan konveksi secara paksa. Konveksi paksa terjadi karena ada gaya eksternal yang mengakibatkan fluida mengalir seperti pada kipas angin dan pompa yang bergantung pada nilai inersia terhadap suatu viskositas dinamik fluida tersebut sedangkan konveksi alami dapat terjadi akibat gaya-gaya apung (*buoyancy*) terhadap viskositas kinematik fluida (Çengel, Y.A. and Ghajar, 2011). Persamaan perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan (2.2).

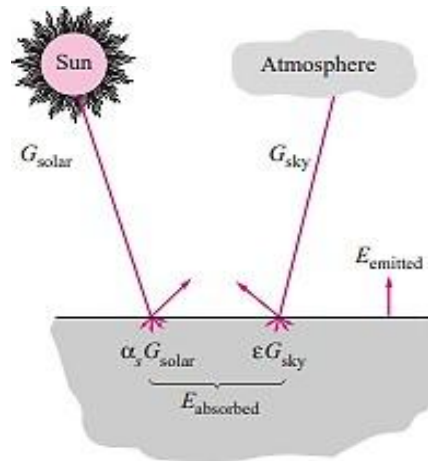
$$\dot{Q}_{conv} = h(T_s - T_a) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

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

2.2.3 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan energi dari permukaan ke segala arah melalui suatu gelombang elektromagnetik. Radiasi terjadi karena adanya foton-foton dan temperatur yang dipancarkan pada suatu permukaan menuju kesegala arah yang mengandung gelombang elektromagnetik. Setiap benda memiliki pancaran radiasi yang berbeda berdasarkan temperatur dan sifat permukaan benda itu sendiri. Radiasi dapat dipantulkan, diserap dan diteruskan pada suatu medium (Çengel, Y.A. and Ghajar, 2011).



Gambar 2.3 Pancaran radiasi
(Sumber: Çengel, Y.A. dkk., 2011)

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

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

Dimana:

E = Daya pancar (W/m^2)

σ = Konstanta Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$

T = Temperatur absolut (K)

2.3 Photovoltaic

Photovoltaic atau biasa disebut panel surya merupakan alat penangkap energi matahari terdiri dari beberapa sel yang tersusun dan memiliki sifat untuk penyerapan pancaran energi matahari dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Selama *Photovoltaic* bekerja di bawah sinar matahari, energi

radiasi matahari yang dikonversikan menjadi energi listrik dan terjadi suatu peningkatan temperatur *Photovoltaic*. Pembangkit listrik tenaga matahari dapat diimplementasikan atau diwujudkan dengan menggunakan *Photovoltaic* (Julisman dkk., 2017).

Photovoltaic (PV), atau lebih dikenal sebagai panel surya, adalah teknologi yang memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip dasarnya terletak pada efek fotovoltaiik, yaitu proses fisika di mana cahaya yang mengenai bahan tertentu dapat menghasilkan aliran listrik. Panel surya terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon, yang diproses secara khusus untuk menciptakan dua lapisan dengan sifat elektrik yang berbeda. Lapisan pertama disebut lapisan tipe-P, yang memiliki lebih banyak "lubang" tempat elektron bisa masuk. Lapisan kedua disebut lapisan tipe-N, yang kaya akan elektron bebas. Di antara kedua lapisan ini terdapat persimpangan p-n, tempat terjadinya medan listrik internal yang memainkan peran penting dalam menghasilkan listrik.



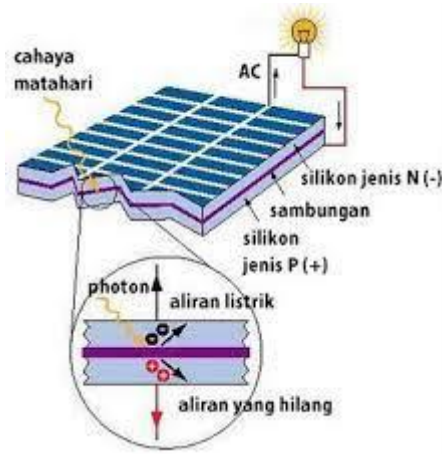
Gambar 2.4 Struktur Modul *Photovoltaic*

(Sumber: Soetadji dkk., 2024)

Permukaan panel saat mengenai sinar matahari, partikel cahaya (foton)

ditangkap oleh bahan semikonduktor. Energi dari foton ini cukup untuk melepaskan elektron dari atomnya di dalam material semikonduktor. Elektron yang bebas kemudian diarahkan oleh medan listrik di persimpangan p-n, menciptakan aliran elektron. Aliran ini membentuk arus listrik searah (DC), yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Listrik yang dihasilkan oleh panel PV sering kali tidak langsung digunakan. Sebagai gantinya, arus searah tersebut dialirkan ke inverter untuk diubah menjadi arus bolak-balik (AC), yang kompatibel dengan jaringan listrik rumah tangga atau umum. Energi ini dapat dimanfaatkan secara langsung, disimpan dalam baterai untuk digunakan di lain waktu, atau bahkan dialirkan kembali ke jaringan listrik. Teknologi PV menawarkan banyak keunggulan. PV menggunakan energi matahari yang melimpah dan tidak terbatas, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, dan dapat dipasang di berbagai tempat, mulai dari atap rumah hingga ladang terbuka.

Aliran muatan ini akan berlanjut sampai tercapai keseimbangan termal dan menginduksi pembentukan wilayah muatan ruang (atau wilayah penipisan) tanpa pembawa muatan bebas di dalamnya. Muatan positif menumpuk di antarmuka sisi-N antara dua semikonduktor, sementara muatan negatif yang sama berkumpul di sisi-P, menghasilkan medan listrik di seluruh wilayah penipisan yang menentang difusi muatan lebih lanjut. Faktanya, keberadaan medan listrik akan memaksa semua elektron berlebih yang melewati wilayah muatan ruang menuju sisi-N, sementara lubang akan bergerak ke persimpangan sisi-P (Carlo dkk., 2020).



Gambar 2.5 Prinsip Kerja *Photovoltaic*

(Sumber: Rudawin dkk., 2020)

2.4 Jenis *Photovoltaic*

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

2.4.1 *Mono-Crystalline Photovoltaic*

Jenis ini terbuat dari batang kristal silikon murni yang tersusun secara lurus. Hal ini menghasilkan sel surya yang identik satu sama lain dan memiliki kinerja tinggi. Oleh karena itu, jenis ini adalah sel surya yang paling efisien, dengan efisiensi sekitar 15% - 20%. Namun, karena harga kristal silikon murni dan teknologi yang digunakan cukup tinggi, harga jenis sel surya ini juga lebih mahal dibandingkan dengan jenis sel surya lainnya di pasaran (Puriza et al., 2021)



Gambar 2.6 *Mono-crystalline Photovoltaic*
(Sumber: Harahap, 2020)

2.4.2 *Poly-Crystalline Photovoltaic*

Photovoltaic (PV) ini memiliki susunan kristal acak karena dibuat dengan proses pengecoran. Jenis ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan tipe *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama. PV jenis ini memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan tipe *monocrystalline*, sehingga harganya cenderung lebih rendah. (Purwoto dkk., 2018)



Gambar 2.7 *Poly-Crystalline Photovoltaic*
(Sumber: Harahap, 2020)

2.4.3 *Thin-Film Photovoltaic*

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

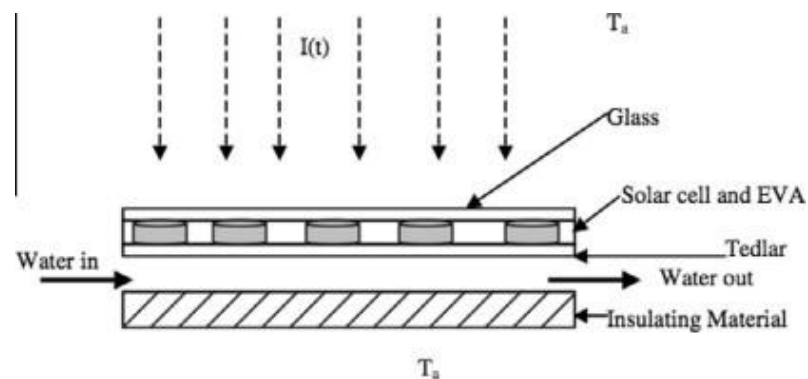


Gambar 2.8 *Copper Indium Diselenide Thin-film Photovoltaic*
(Sumber: Harahap, 2020)

2.5 *Photovoltaic-Thermal (PV/T)*

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

Photovoltaic Thermal (PV/T) adalah sistem hibrida yang dirancang untuk memanfaatkan energi matahari secara maksimal dengan menghasilkan listrik dan panas sekaligus. Sistem ini bekerja dengan mengintegrasikan modul fotovoltaik, yang mengubah cahaya matahari menjadi listrik, dengan mekanisme pemanfaatan panas. Ketika sinar matahari mengenai permukaan modul, sebagian energi diubah menjadi listrik, sementara sebagian besar sisanya terbuang sebagai panas. Dalam PV/T, panas terbuang ini tidak dibiarkan hilang begitu saja, melainkan dimanfaatkan untuk aplikasi termal.



Gambar 2.9 Skema kerja pada *Photovoltaic Thermal* (PV/T)

(Sumber: Reddy dkk., 2015)

Panas dari modul PV/T dapat diekstraksi melalui sistem pendingin. Pendinginan ini dapat berupa aliran udara yang melewati bagian belakang modul atau cairan yang disirkulasikan melalui pipa-pipa di bawah modul. Selain menghasilkan panas untuk keperluan seperti pemanas air atau ruangan, sistem pendinginan ini juga membantu menjaga suhu modul tetap rendah. Hal ini penting karena peningkatan suhu modul fotovoltaik dapat menurunkan efisiensinya dalam menghasilkan listrik. Dengan mengurangi panas pada modul, efisiensi listrik tetap terjaga sekaligus menghasilkan energi termal yang bermanfaat (Ghule et al., 2025).

Energi listrik yang dihasilkan PV/T dapat digunakan langsung, disimpan dalam baterai, atau disalurkan ke jaringan listrik. Sementara itu, energi termal yang

dihasilkan digunakan untuk berbagai kebutuhan, seperti pemanas air domestik, proses industri, atau bahkan pendinginan berbasis siklus absorpsi. Dengan kombinasi ini, PV/T menjadi solusi yang efisien, memadukan fungsi pembangkit listrik dan sistem pemanas dalam satu perangkat. Selain itu, desainnya yang kompak dan multifungsi membuatnya ideal untuk lokasi dengan keterbatasan ruang.

Efisiensi termal pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) berguna untuk mengetahui seberapa besar panas yang mampu dipindahkan dari kolektor pada *Photovoltaic* (PV) terhadap maksimum radiasi yang dipancarkan ke permukaan *Photovoltaic* (PV). Untuk mendapatkan efisiensi termal dari sistem *Photovoltaic-Thermal*, digunakan persamaan 2.4 berikut:

$$Q = \frac{kA(T_f - T_s)}{l} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

Q_{cond}	=	Perpidahan Panas Konduksi (W)
K	=	Konduktivitas Thermal (W/m.C)
A	=	Luas Permukaan (m^2)
T_f	=	Temperatur Sirip (C)
T_s	=	Temperatur Survace (C)
l	=	Tebal (m)

Jadi setelah nilai Q didapatkan, langkah selanjutnya yaitu mencari nilai efisiensi dengan *menggunakan* persamaan 2.5 berikut:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{\text{cond}}}{G.A} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

η_{th}	=	Efisiensi termal <i>Photovoltaic</i> (%)
G	=	Irradiasi (W/m^2)
A_{PV}	=	Luas permukaan <i>Photovoltaic</i> (m^2)

Perhitungan ini sangat penting agar dapat mengevaluasi kinerja suatu sistem

PV/T secara keseluruhan. Dengan menggunakan persamaan tersebut, kita dapat menentukan efisiensi PV/T dalam menghasilkan listrik dan panas dari sumber energi matahari. Kemudian pada suatu *Photovoltaic* dalam pengujian secara *Thermal* (PV/T) dihasilkan arus dan tegangan. Dalam hal tersebut didapatkan efisiensi dari *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yaitu:

$$\eta_{el} = \frac{V_{PV} \cdot I_{PV}}{G \cdot A_{PV}} \dots \dots \dots (2.6)$$

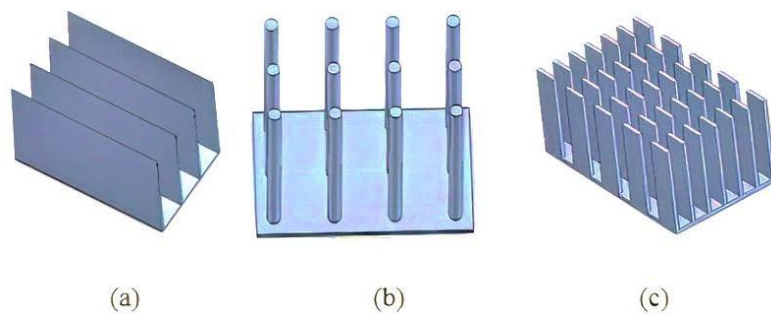
Dimana:

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

2.6 Heatsink

Heatsink adalah komponen pasif yang dirancang untuk mengalirkan dan menyebarkan panas seperti prosesor, kartu grafis, dan komponen lainnya ke lingkungan sekitarnya. Dengan menggunakan bahan konduktor panas yang efisien, seperti aluminium atau tembaga, *heatsink* berfungsi untuk menjaga suhu perangkat agar tetap dalam batas optimal, sehingga mencegah terjadinya *overheating* yang dapat merusak komponen dan mengurangi kinerja sistem. *Heatsink* biasanya memiliki bentuk yang berlekuk atau bersirip, yang meningkatkan luas permukaan kontak dengan udara, sehingga mempercepat proses transfer panas. Dalam banyak aplikasi, *heatsink* bekerja sama dengan kipas atau sistem pendingin lainnya untuk meningkatkan efisiensi pendinginan, memastikan bahwa perangkat elektronik dapat beroperasi dengan stabil dan andal dalam jangka waktu yang lama. Dengan demikian, *heatsink* memainkan peran penting dalam *desain thermal management*. Kinerja pendinginan pasif

biasanya ditingkatkan dengan menggunakan *heatsink*. Pada material *heatsink* standar yaitu aluminium, nilai konduktivitas termal bahannya adalah $207 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Berbagai desain *heatsink* dapat memiliki karakteristik termal yang berbeda (Khor et al., 2021).



Gambar 2.10 (a) *Rectangular heatsink*, (b) *Circular heatsink*,
(c) *Cross-cut heatsink*

(Sumber: Khor dkk., 2021)

Heatsink secara luas dianggap sebagai metode utama perpindahan panas untuk permukaan yang dipanaskan ke lingkungan sekitar. Peningkatan luas kontak perpindahan panas dan turbulensi aliran fluida dapat meningkatkan efisiensi termal dan elektrik. Dengan menambahkan *heatsink* yang cukup pada sistem *Photovoltaic*, maka sistem tersebut menjadi *Photovoltaic-Thermal (PV/T)*. Fungsi dari penambahan *heatsink* pada desain adalah bertujuan untuk mengacaukan aliran udara yang melewatinya sehingga aliran udara menjadi turbulen dan akan meningkatkan koefisien dari perpindahan panas (Khor et al., 2021). *Heatsink* tipe *cross cut* sering digunakan dalam aplikasi di mana aliran udara atau cairan pendingin cukup baik untuk memaksimalkan performa termal. Ini juga sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan pendinginan yang lebih efisien dibandingkan dengan *heatsink* lainnya.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian

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

3.1.1 Tempat Penelitian

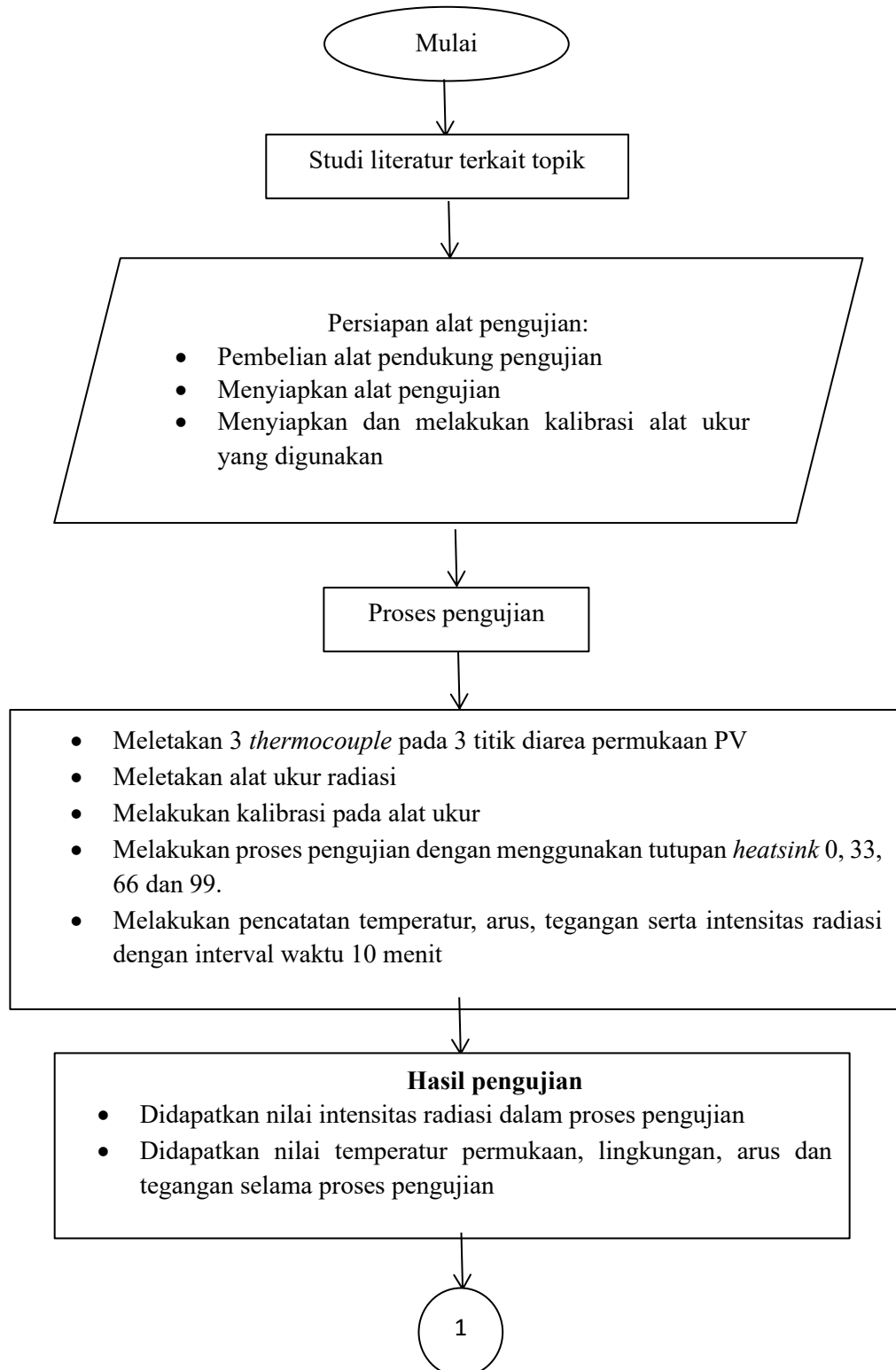
Tempat penelitian dilakukan di luar hanggar jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

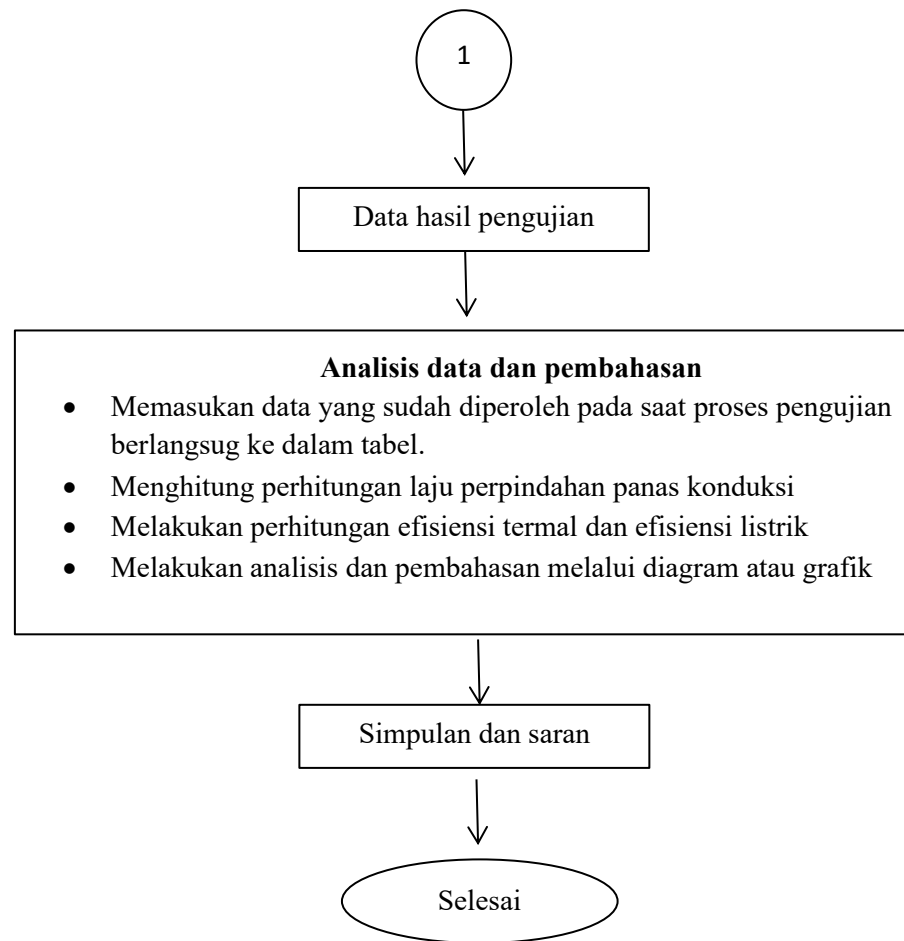
3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada periode bulan November 2024 hingga November 2025.

3.2 Diagram Alur Penelitian

Dibawah ini merupakan diagram dari alur penelitian yang dilaksanakan penulis pada Gambar 3.1 berikut.





Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

3.3 Alat dan Bahan

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

1. *Solar Power Meter* SPM-1116 SD

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



Gambar 3.2 *Solar Power Meter* SPM-1116 SD

2. *Thermocouple*

Seperti yang terlihat pada Gambar 3.3. *thermocouple* yang berfungsi untuk mengukur temperatur yang terjadi pada sistem *Photovoltaic- Thermal* (PV/T). Seperti *heatsink*, fluida *inlet* dan *outlet*. Spesifikasi dari *thermocouple* ini dapat mengukur temperatur dengan besar -200°C hingga 2000°C dan bertipe “K”.



Gambar 3.3 *Thermocouple*

3. MPPT

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



Gambar 3.4 MPPT

4. *Temperature Recorder*

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



Gambar 3.5 *Temperature Recorder* Lunton BTM-420 SD

5. *Anemometer*

Terlihat Gambar 3.6. *Anemometer* ini digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang mengalir masuk ke dalam sistem *Photovoltaic- Thermal* (PV/T) dengan model LM-8000A. Spesifikasi alat ini bias mengukur kelembapan 10% hingga 95%, pengukuran kecepatan udara 0,4 m/s hingga 30 m/s. Alat ini juga bisa mengukur cahaya dan temperatur.



Gambar 3.6 Anemometer LM-8000A

6. Aki

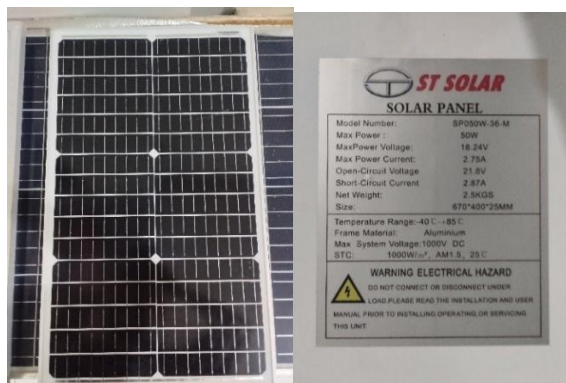
Aki digunakan untuk menyimpan daya yang dihasilkan dari sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T). Aki ini memiliki model No. LC-V127R2N41. Aki yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan 12 V, 7,2 Ah / 20HR. Berikut Gambar 3.7. aki yang digunakan.



Gambar 3.7 Aki No. LC-V127R2N41

7. Monokristalin Photovoltaic

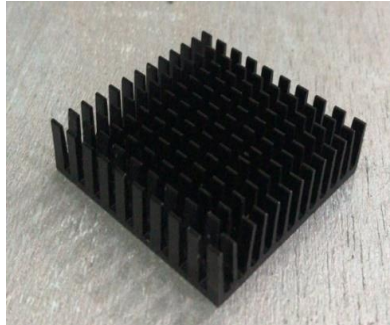
Jenis *Photovoltaic* yang digunakan adalah *monokristalin* dengan dimensi modul sebesar 670 mm x 540 mm x 30 mm dengan besar daya 50 Wp. Tegangan maksimal sebesar V dan kuat arus maksimal A. Tertampil pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Monokristalin Photovoltaic

8. Cross-Cut Heatsink

Terlihat Gambar 3.9. *cross-cut heatsink* adalah *heatsink* bahan yang digunakan untuk meningkatkan turbulensi dari aliran udara pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dan terjadinya daya penyerapan panas. *Heatsink* ini dibuat dari material Aluminium dengan dimensi 40 mm x 40 mm x 11 mm.



Gambar 3.9 Cross-cut heatsink

9. Lampu Beban DC

Pada Gambar 3.10. terlihat lampu beban yang digunakan pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) adalah 50 Watt. Spesifikasi dari beban yang digunakan yaitu 12 watt.



Gambar 3.10 Lampu beban DC LED 50 Watt

10. Pasta Termal

Pasta termal yang digunakan bermerk GD900 yang digunakan untuk merekatkan antara permukaan *cross-cut plate fins* dan juga *Photovoltaic* (PV). Pasta termal ini memiliki nilai konduktivitas sebesar 4,8 W/m.K dengan SG 2,3 g/cm³. Pasta termal yang digunakan terlihat pada gambar 3.11.



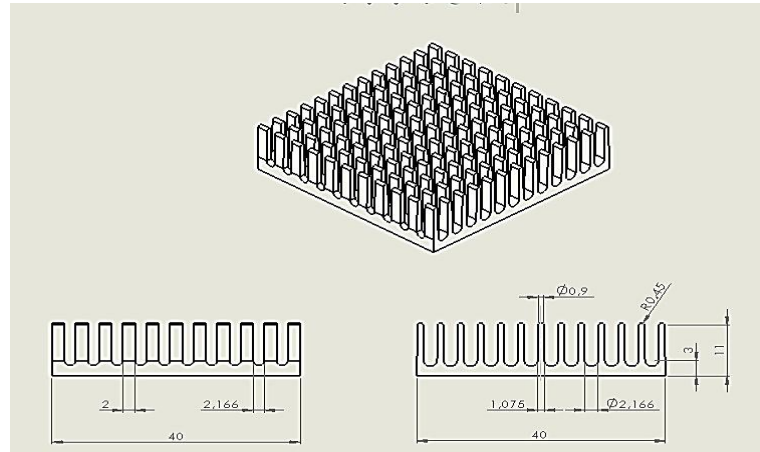
Gambar 3. 11 Pasta termal GD-900

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun dalam proses penelitian ini adalah desain dari *heatsink* yang digunakan pada bagian sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dan *heatsink* pada sistem *Photovoltaic- Thermal* (PV/T) untuk menguji penelitian yang berlangsung pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) dengan uraian berikut ini.

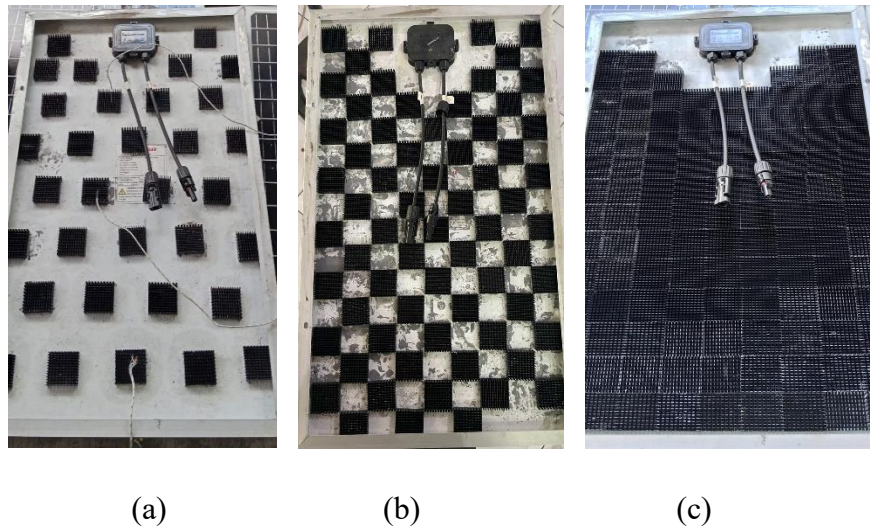
3.4.1 *Heatsink* yang digunakan Sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T)

Heatsink yang digunakan sebagai *absorber* pada sistem *Photovoltaic-Thermal* adalah *cross-cut plate fins* yang diletakkan di bagian bawah *Photovoltaic*. *Heatsink* ini memiliki dimensi panjang dan lebar 40 mm x 40 mm serta tinggi 30 mm. Material *heatsink* ini terbuat dari Aluminium dengan konduktivitas 222,706 Watt/m.⁰C dan massa 25 g. Pada bagian *heatsink* terdapat 143 sirip kecil dengan dimensi pada Gambar 3.12 berikut.



Gambar 3.12 Dimensi *cross-cut heatsink*

Susunan pada bagian *cross-cut heatsink* memiliki 4 variasi jumlah *heatsink* yaitu tutupan *heatsink* 0, 33, 66, dan 99 dengan susunan *Staggered*. Jarak antar *heatsink* ditentukan berdasarkan jumlah ketersediaan dari *heatsink* yaitu secara total. Kemudian, berdasarkan motif susunannya akan dibagi perluasan dari *Photovoltaic* (Astawa dkk,2024). Susunan *straggered* dapat dilihat pada gambar 3.13.



Gambar 3. 13 (a) Susunan *Straggered heatsink* tutupan 33, (b) Susunan *Straggered heatsink* tutupan 66, (c). Susunan *heatsink* tutupan 99.

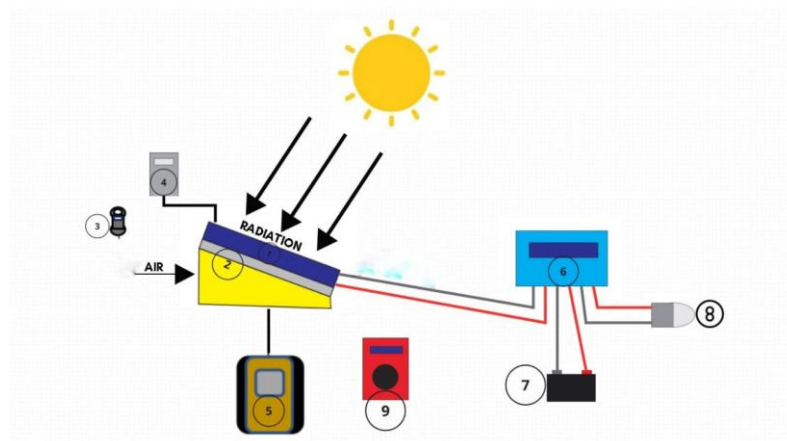
Adapun tahapan pengujian yang dilakukan pada sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T):

Langkah-langkah percobaan

- a. Melakukan pengukuran irradiansi (G) pada sistem PV/T yang berada di luar ruangan.
- b. Mengukur temperatur lingkungan di luar hanggar jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
- c. Mengukur temperatur permukaan bagian PV (T_{SPV}).
- d. Mengukur temperatur sirip (T_{sirip}).
- e. Mengukur tegangan (V_{PV}) dan arus (I_{PV}).
- f. Menghitung efisiensi termal ($\eta_{th,PV}$) dan efisiensi elektrik ($\eta_{el,PV}$) pada *Photovoltaic-Thermal* (PV/T).
- g. Mengulangi langkah 1-6 dengan variasi *heatsink* tutupan 0, 33, 66, dan 99 pada PV-T nya.
- h. Mengelola hasil data yang diperoleh dari pengujian.

3.4.2 Skema Penelitian

Gambar 3.14 merupakan skema dari penelitian sistem *Photovoltaic-Thermal* (PV/T) yang akan diuji.



Gambar 3.14 Skema Penelitian



Gambar 3.15 Skema Penelitian.

Dimana:

1. *Solar photovoltaic*
2. *Cross-cut heatsink*
3. *Anemometer*
4. *Solar power meter*
5. *Temperatue recorder*
6. *Solar charge controller*
7. *Aki*
8. *Lampu (output)*

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat di ambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, sistem *Photovoltaic–Thermal* (PV/T) dengan *cross-cut heatsink* terbukti mampu meningkatkan performa panel surya baik secara termal maupun elektrik. Penggunaan heatsink memberikan penurunan suhu permukaan panel yang signifikan dibandingkan PV tanpa pendinginan, karena bentuk *cross-cut* meningkatkan luas kontak udara sehingga proses pelepasan panas berlangsung lebih cepat. Hal ini menyatakan bahwa efisiensi termal meningkat seiring penambahan luas permukaan *heatsink*. Efisiensi termal tertinggi dicapai pada penggunaan tutup *heatsink* 99 dengan nilai sebesar 60%, menunjukkan bahwa semakin besar cakupan sirip, semakin efektif sistem PV/T melepaskan panas.
2. Hasil dari efisiensi elektrik menunjukkan bahwa suhu yang lebih rendah meningkatkan jumlah energi yang dihasilkan. Suhu panel tetap konstan berkat pendinginan alami *heatsink cross-cut*. Ini meningkatkan kualitas proses konversi energi cahaya menjadi listrik. Seperti yang ditunjukkan oleh fakta bahwa meningkatnya pendinginan maka dapat meningkatkan efisiensi listrik, terbesar mencapai 18,26%. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa *heatsink cross-cut* dapat meningkatkan efisiensi termal dan elektrik sistem PV/T secara signifikan. Oleh karena itu, teknologi ini layak untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai cara yang efektif secara alami untuk mendinginkan panel surya.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan untuk pengujian berikutnya seperti;

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan variasi desain dan dimensi *cross-cut heatsink* (seperti tinggi sirip, jarak antar sirip, dan ketebalan dasar) untuk memperoleh konfigurasi yang paling efisien dalam pelepasan panas tanpa mengurangi luas penyerapan radiasi pada permukaan panel.
2. Untuk meningkatkan efisiensi lebih lanjut, penelitian lanjutan dapat mengombinasikan *cross-cut heatsink* dengan pendinginan aktif seperti aliran udara atau cairan pendingin, sehingga perpindahan panas lebih optimal dan efisiensi listrik dapat ditingkatkan secara signifikan.
3. Disarankan untuk melakukan pengujian jangka panjang terhadap sistem PV/T dengan *cross-cut heatsink* guna mengetahui ketahanan material terhadap paparan panas berulang dan lingkungan luar. Analisis ini penting untuk menilai stabilitas efisiensi termal dan listrik serta potensi degradasi performa panel seiring waktu penggunaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., et al. (2019). "Natural cooling methods for photovoltaic panels: A review." *Energy*, 175, 1125-1136.
- Carlo.A.D., Enrico.L., and N. Y. N. (2020). Photovoltaics. *Joint EPS-SIF International School on Energy 2019*
Https://Doi.Org/10.1051/Epjconf/202024600005, 00005.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202024600005>.
- Çengel, Y.A. and Ghajar, A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill.
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1495769>.
- Ghule, V. M., Pawar, A. A., Patil, L. N., & Javanjal, V. K. (2025). *Numerical and experimental investigation of cross cut angle impact on heat transfer in microchannels*. 43(2), 463–486. <https://doi.org/10.14744/sigma.2025.00>.
- Harahap, P. (2020). Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan Dari Berbagai Jenis Sel Surya. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, 2(2), 73–80.
<https://doi.org/10.30596/rele.v2i2.4420>.
- Julisman, A., Sara, I. D., & Siregar, R. H. (2017). Prototipe Pemanfaatan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Pada Sistem Otomasi Stadion Bola Menggunakan Sensor LDR dan Sensor Air. *Kitektro*, 2(1), 35–42.
- Khor, C. Y., Rosli, M. U., Nawli, M. A. M., Kee, W. C., & Ramdan, D. (2021). Influence of inlet velocity and heat flux on the thermal characteristic of various heat sink designs using CFD analysis. *Journal of Physics: Conference Series*,

2051(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012013>.

Nazaar, A. A., K. S. S., & Pangkung, A. (2024). *Penggunaan Sistem Pendingin Temperatur Menggunakan Heatsink-Fan sebagai Peningkatan Kinerja Panel Surya*. 22(2), 284–292.

Puriza, M. Y., Yandi, W., & Asmar, A. (2021). Perbandingan Efisiensi Konversi Energi Panel Surya Tipe Polycrystalline dengan Panel Surya Monocrystalline Berbasis Arduino di Kota Pangkalpinang. *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, 8(1), 47–52. <https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v8i1.2034>.

Purwoto, B. H., Jatmiko, J., Fadilah, M. A., & Huda, I. F. (2018). Efisiensi Penggunaan Panel Surya sebagai Sumber Energi Alternatif. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 18(1), 10–14. <https://doi.org/10.23917/emitor.v18i01.6251>.

Rudawin, L., Rajabiah, N., & Irawan, D. (2020). Analisa sistem kerja photovoltaic berdasarkan sudut kemiringan menggunakan monocrystalline dan polycrystalline. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, 9. <http://ojs.umm metro.ac.id/index.php/turbo%0AAnalisa>.

Sianipar, R. J., Januar, R. R., & Silalahi, S. D. C. (2024). Analisis Pemetaan Potensi dan Realisasi Energi Baru Terbarukan (EBT) dengan Pemodelan Determinan Konsumsi dan Metode Grouping Analysis EBT di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(2), 30–49. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22970>.

Soetadji, P., & Khoirudin, A. (2024). Argumen Listrik Tenaga Surya (Photovoltaic) Perspektif Fikih Energi Terbarukan. *R2J*, 7(1). <https://doi.org/10.38035/rj.v7i1>.

Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J., & Jijón, D. J. (2017). Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on

multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. *Renewable Energy*, 109(3), 275–286.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.041>.

Yuliananda, S., Sarya, G., & Retno Hastijanti, R. (2015). Pengaruh Perubahan Intensitas Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Surya. *Jurnal Pengabdian LPPM Untag Surabaya Nopember*, 01(02), 193–202.