TUGAS AKHIR

OPTIMASI DAYA KELUARAN PANEL SURYA MONOKRISTALIN 20WP MENGGUNAKAN PENDINGIN PASIF HEATSINK DENGAN SISTEM PENGUKURAN BERBASIS ESP32

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat memperoleh Gelar Sarjana

Pada Fakultas Teknik Program Studi Teknik Elektro

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun Oleh :

GILANG ASIARI

2207220009

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Gilang Asiari

NPM : 2207220009

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Optimasi Daya Keluaran Panel Surya Monokristalin 20WP Menggunakan Pendingin Pasif Heatsink Dengan Sistem Pengukuran Berbasis ESP32.

Bidang ilmu : Energi Baru Terbarrukan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 27 Agustus 2026

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Noorly Evalina S.T., M.T.

Dosen Pembanding I / Penguji	Dosen Pembanding II / Peguji
Dr. Rimbawati, S.T., M.T.	Rahmat Fauzi Siregar, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap	: Gilang Asiari
Tempat /Tanggal Lahir	: Tanjung Uban, 22 Desember 2003
NPM	: 2207220009
Fakultas	: Teknik
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

"Optimasi Daya Keluaran Panel Surya Monokristalin 20WP Menggunakan Pendingin Pasif Heatsink Dengan Sistem Pengukuran Berbasis ESP32",

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Tecknik Ssipil/Mesin/Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Medan, 27 Agustus 2026

Saya yang menyatakan,



Gilang Asiari

ABSTRAK

Panel surya monokristalin mengalami penurunan kinerja ketika suhu kerja meningkat akibat paparan radiasi matahari. Kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan tegangan dan daya keluaran panel surya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap suhu kerja, karakteristik listrik, dan daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP. Penelitian menggunakan metode kuantitatif eksperimental dengan membandingkan kinerja panel surya tanpa pendingin dan panel surya menggunakan pendingin pasif heatsink. Sistem pengukuran berbasis ESP32 digunakan untuk memantau dan merekam parameter suhu, tegangan rangkaian terbuka (Voc), tegangan kerja (Vmp), arus keluaran (Imp), dan daya keluaran. Pengujian dilakukan melalui pengambilan data tanpa beban selama dua hari dan pengujian berbeban selama empat hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink menurunkan suhu rata-rata panel dari 43,61°C menjadi 41,65°C, atau sebesar 1,96°C (4,49%). Nilai rata-rata Voc meningkat dari 23,50 V menjadi 23,69 V, Vmp meningkat dari 7,38 V menjadi 7,46 V, dan Imp meningkat dari 0,48 A menjadi 0,53 A. Peningkatan karakteristik listrik tersebut menghasilkan kenaikan daya keluaran rata-rata dari 4,45 W menjadi 5,02 W, atau meningkat sebesar 0,57 W (12,81%). Dengan demikian, penggunaan pendingin pasif heatsink terbukti dapat menurunkan suhu kerja dan meningkatkan daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP pada kondisi pengujian yang dilakukan.

Kata kunci: panel surya monokristalin, heatsink, pendingin pasif, ESP32, daya keluaran.

ABSTRACT

Monocrystalline solar panels experience a decrease in performance as their operating temperature increases due to exposure to solar radiation. This condition can reduce the voltage and power output of the solar panel. This study aims to analyze the effect of a passive heatsink cooling system on the operating temperature, electrical characteristics, and power output of a 20 WP monocrystalline solar panel. The study employed a quantitative experimental method by comparing the performance of a solar panel without cooling and a solar panel equipped with a passive heatsink cooling system. An ESP32-based measurement system was used to monitor and record temperature, open-circuit voltage (Voc), operating voltage (Vmp), output current (Imp), and power output. Data collection was conducted through an open-circuit test for two days and a loaded test for four days. The results showed that the use of a passive heatsink reduced the average panel temperature from 43.61°C to 41.65°C, representing a reduction of 1.96°C (4.49%). The average Voc increased from 23.50 V to 23.69 V, Vmp increased from 7.38 V to 7.46 V, and Imp increased from 0.48 A to 0.53 A. These improvements in the electrical characteristics resulted in an increase in the average power output from 4.45 W to 5.02 W, representing an increase of 0.57 W (12.81%). Therefore, the use of a passive heatsink cooling system was proven to reduce the operating temperature and increase the power output of the 20 WP monocrystalline solar panel under the test conditions.

Keywords: monocrystalline solar panel, heatsink, passive cooling, ESP32, power output.

KATA PENGANTAR

Tidak ada kata lain untuk menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT kecuali ucapan syukur atas segala nikmat dengan curahan kasih sayang-Nya atas selesainya Tugas Akhir ini dengan baik, dengan judul : *Optimasi Daya Keluaran Panel Surya Monokristalin 20WP Menggunakan Pendingin Pasif Heatsink Dengan Sistem Pengukuran Berbasis ESP32*.

Penulisan proposal penelitian ini dimaksudkan guna melengkapi sebagian persyaratan meraih gelar sarjana di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jurusan Teknik Elektro. Dalam menyusun proposal ini, penulis tidak dapat melupakan jasa orang-orang yang telah ikut berperan serta sehingga penelitian ini dapat selesai.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kepada kedua orang tua saya, yakni Bapak Suhendri dan Ibu Jubaidah Purba S.Ag, yang telah memberikan dukungan moral dan material serta doa yang tidak pernah berhenti demi kelancaran penulisan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd., selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Kepada Ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Kepada Bapak Benny Oktrialdi, S.T., M.T sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Kepada Ibu Noorly Evalina, S.T, M.T., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Kepada Ibu Dr. Rimbawati, S.T., M.T., selaku dosen pembanding 1 Tugas Akhir yang telah memberikan kritik, saran , dan masukan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

8. Kepada Bapak Rahmat Fauzi Siregar, S.T., M.T., selaku dosen pembanding 2 Tugas Akhir yang telah memberikan kritik, saran , dan masukan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
9. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, yang telah banyak memberikan ilmu kepada penulis.
10. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
11. Kepada Saudari Arini Mutiara Tantri yang senantiasa memberikan dukungan, doa, dan motivasi kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
12. Teman - teman seperjuangan Elektro A1 Pagi Stambuk 2022 yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga segala bentuk bantuan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan, baik dari bentuk penyusunan maupun materinya. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca dan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Medan, 27 Agustus 2026

Gilang Asiari

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ..... **Error! Bookmark not defined.**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI ii

ABSTRAK iii

ABSTRACT v

KATA PENGANTAR vi

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR TABEL xiii

DAFTAR LAMPIRAN xiv

BAB I PENDAHULUAN 15

1.1 Latar Belakang 15

1.2 Rumusan Masalah 17

1.3 Tujuan Penelitian 17

1.4 Batasan Masalah 17

1.5 Manfaat Penelitian 18

1.5.1 Manfaat Teoritis 19

1.5.2 Manfaat Praktis 19

1.6 Sistematika Penulisan 20

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 21

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan 21

2.2 Landasan Teori 23

2.2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Energi Surya 23

2.2.2 Pengertian dan Karakteristik Panel Surya Monokristalin 24

2.2.3 Spesifikasi dan Kinerja Panel Surya Monokristalin 20 WP 26

2.2.4 Faktor Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya 27

2.2.4.1 Intensitas radiasi 27

2.2.4.2 Suhu sel 28

2.2.4.3 Sistem pendinginan 28
2.2.4.4 Ventilasi dan orientasi panel 28
2.2.5 Hubungan Suhu dengan Tegangan dan Arus Panel Surya 29
2.2.6 Dampak Kenaikan Suhu terhadap Daya dan Efisiensi 30
2.2.7 Konsep Dasar Manajemen Termal Panel Surya 31
2.2.8 Sistem Pendingin Aktif dan Pasif 32
2.2.8.1 Sistem Pendingin Aktif 33
2.2.8.2 Sistem Pendingin Pasif 33
2.2.9 Heatsink sebagai Sistem Pendingin Pasif 34
2.2.10 Karakteristik dan Prinsip Kerja Heatsink 35
2.2.11 ESP32 sebagai Sistem Pengukuran 36
2.2.12 Sensor INA219 37
2.2.13 Sensor DS18B20 38
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 40
3.1 Waktu dan Tempat 40
3.1.1 Waktu 40
3.1.2 Tempat 40
3.2 Alat dan Bahan 40
3.2.1 Alat penelitian 40
3.2.2 Bahan penelitian 41
3.3 Perancangan Sistem Penelitian 41
3.3.1 Konsep Sistem Pengujian 41
3.3.2 Desain Pendingin Pasif Heatsink 43
3.3.3 Desain Sistem Pengukuran Berbasis ESP32 46
3.4 Prosedur Pengujian 48
3.4.1 Persiapan Pengujian 48

3.4.2 Pelaksanaan Pengujian 49
3.4.3 Pengambilan Data 50
3.5 Parameter Penelitian 51
3.6 Teknik Analisa Data 52
3.6.1 Analisis Suhu Panel Surya 52
3.6.2 Analisis Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc) 53
3.6.3 Analisis Tegangan Rangkaian Tertutup (Vmp) 53
3.6.4 Analisis Arus Keluaran 53
3.6.4 Analisis Daya Keluaran 54
3.7 Flowchart Penelitian 55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 56
4.1 Pelaksanaan Pengujian 56
4.2 Hasil Pengujian 59
4.2.1 Hasil Pengujian Suhu Panel Surya 60
4.2.2 Hasil Pengujian Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc 61
4.2.3 Hasil Pengujian Tegangan Keluaran (Vmp) 62
4.2.4 Hasil Pengujian Arus Keluaran (Imp) 63
4.2.5 Hasil Pengujian Daya Keluaran Panel Surya 65
4.3 Pembahasan Hasil Penelitian 66
4.3.1 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Suhu Panel Surya 66
4.3.2 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc) 67
4.3.3 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Tegangan Keluaran (Vmp) 68
4.3.4 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Arus Keluaran (Imp) 69
4.3.5 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Daya Keluaran Panel Surya 70

BAB V PENUTUP 72
5.1 Kesimpulan 72
5.2 Saran 72
DAFTAR PUSTAKA 74
LAMPIRAN 77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Konsep sistem pengujian 42
Gambar 3. 2 Tampak Atas Desain Heatsink 43
Gambar 3. 3 Tampak Samping Desain Heatsink 44
Gambar 3. 4 Isometrik (3D) Desain Heatsink 45
Gambar 3. 5 Desain Sistem Pengukuran Berbasis ESP32 46
Gambar 3. 6 Konfigurasi Modul Sistem Pengukuran Berbasis ESP32 47
Gambar 4. 1 Konfigurasi panel surya pada saat pelaksanaan pengujian. 56
Gambar 4. 2 Pemasangan heatsink dan sensor DS18B20 pada bagian belakang panel surya. 57
Gambar 4. 3 Sistem pengukuran berbasis ESP32. 58
Gambar 4. 4 Tampilan dashboard monitoring IoTKita. 58
Gambar 4. 5 Beban resistif yang digunakan pada proses pengujian. 59
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan suhu panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan heatsink 60
Gambar 4. 7 Grafik perbandingan tegangan rangkaian terbuka (Voc) panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink 62
Gambar 4. 8 Grafik perbandingan tegangan rangkaian tertutup (VMP) panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink 63
Gambar 4. 9 Grafik perbandingan arus rangkaian tertutup (Imp) panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink 64
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan daya keluaran panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink ……66

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Tabel Konfigurasi Pengujian 49
Tabel 3. 2 Parameter Penelitian..... 51
Tabel 4. 1 Statistik Suhu Panel Surya 60
Tabel 4. 2 Statistik tegangan rangkaian terbuka (Voc) panel surya..... 61
Tabel 4. 3 Statistik tegangan rangkaian tertutup (Vmp)..... 62
Tabel 4. 4 Statistik arus rangkaian tertutup (Imp)..... 64
Tabel 4. 5 Statistik Daya keluaran Panel surya 65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Raw Data Voc dan Suhu Tanggal 19 Juli 2026 77
Lampiran 2 : Raw Data Voc dan Suhu Tanggal 20 Juli 2026 79
Lampiran 3 : Raw Data Vmp, Imp, Daya dan Suhu Tanggal 14 Juli 2026 81
Lampiran 4 : Raw Data Vmp, Imp, Daya, dan Suhu Tanggal 16 Juli 2026 84
Lampiran 5 : Raw Data Vmp, Imp, Daya, dan Suhu Tanggal 17 Juli 2026 86
Lampiran 6 : Raw Data Vmp, Imp, Daya, dan Suhu Tanggal 23 Juli 2026 88
Lampiran 7 : Rata - rata Voc dan Suhu dalam 2 hari 91
Lampiran 8 : Rata - rata Vmp, Imp, Daya, dan Suhu dalam 4 hari 93
Lampiran 9 : Data cuaca saat pengambilan data pengujian tanpa beban (Voc dan Suhu) 95
Lampiran 10 : Data cuaca saat pengambilan data pengujian berbeban (Vmp, Imp, Daya, dan Suhu) 96
Lampiran 11 : Surat bimbingan Tugas Akhir 99

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transisi energi menuju sumber energi terbarukan menjadi agenda strategis global dalam upaya menurunkan emisi gas rumah kaca dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil. Sektor ketenagalistrikan memegang peranan penting dalam dekarbonisasi, sehingga pengembangan teknologi energi surya berbasis sistem fotovoltaik (PV) semakin diprioritaskan. Optimalisasi kinerja modul PV menjadi aspek krusial karena efisiensi konversi energi secara langsung menentukan besarnya daya keluaran yang dihasilkan. Kajian komprehensif mengenai metode peningkatan performa sistem pendinginan PV menunjukkan bahwa efisiensi modul sangat dipengaruhi oleh kondisi termal selama operasi (Novitasari et al., 2025).

Perkembangan teknologi fotovoltaik skala kecil, khususnya panel surya monokristalin, menunjukkan tren peningkatan pemanfaatan pada aplikasi rumah tangga, sistem mandiri (stand-alone), dan laboratorium pendidikan teknik. Panel monokristalin dikenal memiliki efisiensi relatif lebih tinggi dibandingkan tipe lainnya karena struktur kristal tunggalnya memungkinkan mobilitas elektron yang lebih baik sehingga menghasilkan konversi energi yang lebih optimal (Novitasari et al., 2025). Namun demikian, performa listriknya sangat sensitif terhadap perubahan suhu kerja. Analisis eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan suhu modul menyebabkan penurunan tegangan rangkaian terbuka (Voc) dan daya keluaran secara signifikan (Hudis & Chereches, 2021).

Permasalahan utama dalam pengoperasian panel surya, khususnya di wilayah beriklim tropis, adalah kenaikan suhu permukaan modul akibat paparan radiasi matahari yang tinggi. Kenaikan suhu tersebut berdampak pada penurunan efisiensi konversi energi listrik. Studi komparatif pada sistem pendinginan menunjukkan bahwa tanpa mekanisme pelepasan panas yang memadai, performa listrik modul mengalami degradasi yang terukur pada parameter tegangan, arus, dan daya (Yulia et al., 2023). Oleh karena itu,

pengendalian suhu menjadi faktor penting dalam upaya optimasi daya keluaran panel surya.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, baik melalui metode pendinginan aktif maupun pasif. Pendinginan aktif umumnya menggunakan kipas atau sistem sirkulasi fluida untuk mempercepat perpindahan panas, sedangkan pendinginan pasif memanfaatkan heatsink atau sirip aluminium untuk meningkatkan konveksi alami tanpa konsumsi energi tambahan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan heatsink dengan desain tertentu mampu meningkatkan produksi daya panel secara signifikan melalui penurunan suhu kerja (Hudis & Chereches, 2021). Pendekatan pendinginan pasif dinilai lebih sederhana, mudah diterapkan, serta tidak menambah konsumsi daya pada sistem fotovoltaik skala kecil.

Meskipun metode pendinginan aktif terbukti efektif, sistem tersebut memiliki keterbatasan berupa kebutuhan daya tambahan, kompleksitas instalasi, serta potensi peningkatan biaya operasional. Dalam konteks sistem PV skala kecil seperti modul monokristalin 20WP, penggunaan sistem aktif berpotensi mengurangi efisiensi keseluruhan karena sebagian daya digunakan untuk mengoperasikan perangkat pendingin. Oleh karena itu, pendekatan pendinginan pasif berbasis heatsink menjadi alternatif yang lebih sederhana dan ekonomis untuk meningkatkan performa modul tanpa menambah beban energi (Choifin et al., 2025).

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada modul berkapasitas besar atau sistem skala komersial, sementara kajian eksperimental pada panel monokristalin 20WP dengan sistem pendingin pasif sederhana masih terbatas. Kesenjangan penelitian ini menunjukkan perlunya studi kuantitatif eksperimental yang secara spesifik mengukur pengaruh penambahan heatsink terhadap suhu, tegangan, arus, dan daya keluaran pada modul skala kecil.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan membandingkan performa panel surya monokristalin 20WP sebelum dan sesudah pemasangan sistem pendingin pasif heatsink. Variabel yang diamati meliputi suhu permukaan modul, tegangan, arus, dan daya keluaran pada kondisi radiasi yang terukur. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi ilmiah berupa model optimasi sederhana yang

aplikatif, ekonomis, dan efektif dalam meningkatkan daya keluaran panel surya skala kecil, sehingga mendukung pengembangan sistem energi surya yang lebih efisien dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan dalam bentuk pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap suhu kerja panel surya monokristalin 20WP?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap daya keluaran panel surya monokristalin 20WP?
3. Apakah penggunaan pendingin pasif heatsink dapat mengoptimalkan daya keluaran panel surya monokristalin 20WP?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penerapan pendingin pasif heatsink terhadap kinerja panel surya monokristalin 20WP menggunakan sistem pengukuran berbasis ESP32. Secara lebih spesifik, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap suhu kerja panel surya monokristalin 20WP
2. Menganalisis pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap tegangan dan arus keluaran panel surya monokristalin 20WP.
3. Menganalisis kemampuan pendingin pasif heatsink dalam mengoptimalkan daya keluaran panel surya monokristalin 20WP.

Dengan tercapainya tujuan-tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan, khususnya terkait upaya peningkatan kinerja panel surya melalui metode pendinginan pasif yang hemat energi, serta menjadi rujukan awal bagi penelitian lanjutan maupun penerapan praktis di lapangan.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada analisis kuantitatif pengaruh sistem pendingin pasif heatsink terhadap optimasi daya keluaran panel surya monokristalin skala

kecil. Pembatasan ruang lingkup penelitian dilakukan agar studi ini terarah, terukur, dan menghasilkan data yang valid serta dapat dianalisis secara mendalam sesuai tujuan penelitian. Dengan adanya batasan yang jelas, penelitian dapat dilaksanakan secara realistis dari segi waktu, biaya, serta ketersediaan peralatan, sekaligus menghindari perluasan variabel yang tidak relevan dengan fokus utama kajian.

Secara lebih spesifik, batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Panel surya yang digunakan adalah panel monokristalin berkapasitas 20WP dengan spesifikasi pabrikan standar, tanpa modifikasi struktur internal sel surya.
2. Sistem pendingin yang digunakan adalah pendingin pasif berupa heatsink Aluminium, tanpa bantuan sistem pendingin aktif atau sumber energi tambahan.
3. Parameter yang dianalisis meliputi suhu panel, tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi panel.
4. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental, dengan metode perbandingan antara kondisi panel tanpa pendingin dan dengan pemasangan heatsink pasif. Analisis yang dilakukan bersifat deskriptif kuantitatif berdasarkan hasil pengukuran langsung di lapangan.
5. Pengujian dilakukan pada satu lokasi dengan kondisi lingkungan terbuka (outdoor), tanpa simulasi laboratorium terkendali. Variasi kondisi cuaca ekstrem di luar periode pengamatan tidak dianalisis secara khusus. Faktor lain seperti pengaruh debu, kelembapan ekstrem, degradasi jangka panjang panel, variasi sudut kemiringan, dan orientasi panel tidak menjadi fokus utama penelitian.
6. Pengambilan data dilakukan dalam rentang waktu tertentu pada jam operasional efektif penyinaran matahari, dan tidak mencakup pengujian sepanjang tahun atau analisis musiman.
7. Penelitian ini tidak membahas aspek ekonomi secara mendalam, analisis umur pakai (lifetime) modul, degradasi jangka panjang, maupun perbandingan dengan sistem pendinginan aktif atau teknologi pendinginan berbasis fluida.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan penerapan teknologi,

khususnya dalam bidang energi surya. Manfaat penelitian ini dijelaskan sebagai berikut :

1.5.1 Manfaat Teoritis

Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan, khususnya terkait dengan kajian kinerja panel surya dan pengaruh suhu terhadap daya keluaran serta efisiensi panel surya monokristalin. Hasil penelitian ini dapat memperkaya literatur ilmiah mengenai hubungan antara suhu operasional panel surya dan performa listrik yang dihasilkan, terutama pada panel surya skala kecil dengan kapasitas 20 WP.

Penelitian ini juga berkontribusi dalam memperdalam pemahaman konsep pendinginan pasif pada sistem fotovoltaik, dengan menunjukkan bagaimana penerapan heatsink sebagai media pelepas panas dapat memengaruhi karakteristik termal dan elektrik panel surya. Temuan penelitian ini dapat menjadi dasar empiris dalam pengembangan model atau teori yang menjelaskan mekanisme penurunan suhu panel surya dan implikasinya terhadap peningkatan daya keluaran dan efisiensi konversi energi.

Selain itu, penelitian ini dapat menjadi rujukan akademik bagi penelitian selanjutnya yang mengkaji optimasi kinerja panel surya melalui pendekatan termal, baik dengan variasi desain heatsink, material pendingin pasif, maupun penerapannya pada jenis dan kapasitas panel surya yang berbeda.

1.5.2 Manfaat Praktis

Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat nyata bagi berbagai pihak yang terlibat dalam pemanfaatan dan pengembangan sistem energi surya. Adapun manfaat praktis tersebut antara lain:

1. Memberikan solusi sederhana dan hemat energi untuk meningkatkan daya keluaran panel surya monokristalin melalui penerapan sistem pendingin pasif heatsink tanpa memerlukan sumber daya tambahan.
2. Menjadi referensi teknis bagi praktisi, teknisi, dan pengguna panel surya skala kecil dalam upaya meningkatkan kinerja panel surya di lapangan, khususnya pada daerah dengan suhu lingkungan relatif tinggi.

3. Membantu perancang dan pengembang sistem fotovoltaik dalam mempertimbangkan aspek manajemen termal sebagai bagian dari desain sistem panel surya yang lebih optimal.
4. Memberikan informasi awal bagi institusi pendidikan dan laboratorium dalam pengembangan media pembelajaran atau praktikum terkait pengujian kinerja panel surya dan sistem pendinginan pasif.
5. Menjadi dasar pertimbangan teknis dalam pengembangan prototipe atau inovasi desain sistem fotovoltaik skala kecil yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Dengan adanya manfaat teoritis dan praktis tersebut, penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi akademik, tetapi juga mendukung penerapan teknologi panel surya yang lebih efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan kondisi lingkungan tropis.

1.6 Sistematika Penulisan

1. BAB I Pendahuluan berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.
2. BAB II Tinjauan Pustaka membahas teori dasar dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan panel surya, pengaruh suhu terhadap daya keluaran dan pendinginan pasif menggunakan heatsink.
3. BAB III Metodologi Penelitian menjelaskan metode penelitian, alat dan bahan, perancangan sistem, prosedur pengambilan data, serta metode analisis data.
4. BAB IV Hasil dan Pembahasan menyajikan hasil pengujian dan pembahasan mengenai kinerja panel surya sebelum dan sesudah penggunaan pendingin pasif.
5. BAB V Penutup berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk pengembangan selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Kinerja panel surya fotovoltaik (PV) sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu operasional sel surya. Peningkatan suhu permukaan modul menyebabkan penurunan tegangan rangkaian terbuka (Voc) dan daya keluaran akibat meningkatnya laju rekombinasi pembawa muatan dalam material semikonduktor. Secara umum, kenaikan suhu sel akan berdampak langsung pada penurunan efisiensi konversi energi listrik, terutama pada panel silikon kristalin yang banyak digunakan pada sistem PV skala kecil hingga menengah. Studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa performa listrik panel surya sangat sensitif terhadap fluktuasi suhu lingkungan dan radiasi matahari (Krstic et al., 2024).

Beberapa penelitian eksperimental melaporkan bahwa setiap kenaikan suhu sel sebesar 1°C dapat menurunkan daya keluaran modul PV secara signifikan, tergantung pada jenis dan karakteristik koefisien suhu panel tersebut. Penelitian oleh Agyekum et al. (2021) menunjukkan bahwa peningkatan suhu tanpa sistem pendinginan menyebabkan penurunan efisiensi yang terukur secara konsisten pada kondisi radiasi tinggi. Temuan serupa dilaporkan oleh Elminshawy et al. (2022), yang menegaskan bahwa pengendalian suhu melalui mekanisme pendinginan dapat meningkatkan stabilitas daya keluaran panel.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode pendinginan telah dikembangkan, baik secara aktif maupun pasif. Sistem pendinginan aktif, seperti sirkulasi fluida atau penggunaan nanofluida, mampu menurunkan suhu panel secara signifikan, namun membutuhkan energi tambahan serta kompleksitas instalasi yang lebih tinggi (Ibrahim et al., 2023). Oleh karena itu, sistem pendinginan pasif menjadi alternatif yang lebih sederhana dan ekonomis, terutama untuk aplikasi panel surya berdaya kecil.

Pendinginan pasif umumnya memanfaatkan mekanisme konduksi dan konveksi alami untuk melepaskan panas dari permukaan belakang panel. Salah satu metode

yang banyak diteliti adalah penggunaan heatsink aluminium. Aluminium dipilih karena memiliki konduktivitas termal tinggi, massa jenis relatif rendah, serta ketahanan terhadap korosi, sehingga efektif dalam meningkatkan laju pelepasan panas ke lingkungan. Penelitian oleh (Hudis & Chereches, 2021) menunjukkan bahwa penggunaan heatsink dengan sirip berlubang mampu meningkatkan luas permukaan perpindahan panas dan secara signifikan meningkatkan daya keluaran panel. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Krstic et al. (2024), yang menyatakan bahwa pemasangan heatsink aluminium pada sisi belakang modul PV mampu menurunkan suhu panel secara nyata dibandingkan tanpa pendinginan.

Desain geometris heatsink, seperti jumlah sirip, tinggi sirip, ketebalan, serta jarak antar sirip, berpengaruh besar terhadap efektivitas pelepasan panas. Studi komprehensif oleh Al-Masalha et al. (2023) menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan melalui optimasi desain sirip dapat meningkatkan efisiensi konveksi alami dan berdampak langsung pada kenaikan daya keluaran panel. Selain itu, analisis berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) yang ditinjau oleh (Raza et al., 2026) menegaskan bahwa konfigurasi sirip yang tepat mampu memaksimalkan distribusi aliran udara alami di sekitar panel.

Selain pendekatan eksperimental, beberapa penelitian juga membandingkan berbagai teknik pendinginan untuk menentukan metode yang paling efisien dan ekonomis. Studi oleh (Masalha et al., 2025) menyimpulkan bahwa pendinginan pasif berbasis peningkatan luas permukaan merupakan solusi yang layak untuk sistem PV skala kecil karena tidak memerlukan konsumsi energi tambahan. Penelitian tersebut menekankan bahwa metode pasif sangat sesuai untuk daerah dengan intensitas radiasi tinggi dan keterbatasan sumber daya listrik tambahan.

Penelitian di tingkat nasional juga menunjukkan hasil yang konsisten. (Nazaar et al., 2024) melaporkan bahwa penggunaan heatsink pada panel surya mampu meningkatkan daya keluaran secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa pendinginan. Choifin et al. (2025) menunjukkan bahwa penambahan heatsink aluminium sederhana dapat meningkatkan efisiensi panel surya melalui penurunan suhu operasional. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Efendi & Nofendri, 2024), yang menyatakan bahwa sistem pendinginan pada sisi belakang panel memberikan peningkatan daya keluaran yang terukur.

Studi eksperimental oleh (Mesin et al., 2024) menunjukkan bahwa pendinginan pasif mampu menstabilkan performa panel pada kondisi radiasi maksimum, sedangkan Saputra dan Arizona (2023) menegaskan bahwa variasi sistem pendingin pada permukaan bawah panel berpengaruh langsung terhadap peningkatan efisiensi daya keluaran. Secara umum, penelitian-penelitian nasional tersebut memperkuat temuan internasional bahwa pengendalian suhu merupakan faktor kunci dalam optimasi kinerja panel surya.

Berdasarkan kajian literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem pendingin pasif berbasis heatsink aluminium merupakan solusi yang efektif dan ekonomis dalam meningkatkan daya keluaran panel surya melalui penurunan suhu operasional. Meskipun berbagai penelitian telah membahas peningkatan kinerja panel melalui pendinginan pasif, masih terdapat ruang penelitian terkait optimasi desain heatsink pada panel surya monokristalin berdaya rendah, khususnya pada kapasitas 20 WP. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh sistem pendingin pasif heatsink aluminium terhadap optimasi daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori pada penelitian ini memuat konsep dan teori yang mendukung pelaksanaan penelitian serta menjadi dasar dalam analisis hasil pengujian

2.2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Energi Surya

Energi surya merupakan energi yang berasal dari radiasi elektromagnetik matahari yang mencapai permukaan bumi dalam bentuk gelombang cahaya, yang mencakup spektrum ultraviolet, cahaya tampak, dan inframerah. Teknologi fotovoltaik (PV) memungkinkan konversi langsung energi radiasi tersebut menjadi energi listrik tanpa melalui proses mekanik. Perkembangan teknologi sel surya modern menunjukkan bahwa sistem fotovoltaik menjadi salah satu teknologi utama dalam sistem energi berkelanjutan karena kemampuannya mengubah energi cahaya secara langsung menjadi energi listrik (Rabaia et al., 2021).

Konversi energi cahaya menjadi energi listrik pada sistem PV didasarkan pada efek fotovoltaik yang terjadi pada material semikonduktor. Ketika foton dengan energi yang cukup diserap oleh material, energi tersebut ditransfer kepada elektron

sehingga memungkinkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Perpindahan ini menghasilkan pasangan elektron–hole yang menjadi dasar terbentuknya arus listrik. Karakteristik material semikonduktor dan struktur sel surya sangat menentukan efisiensi konversi energi yang dapat dicapai (Green et al., 2023).

Pada sel surya berbahan silikon kristalin, struktur dasarnya terdiri atas lapisan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk sambungan p–n. Sambungan ini menghasilkan medan listrik internal akibat perbedaan konsentrasi pembawa muatan pada kedua sisi. Ketika pasangan elektron–hole terbentuk akibat absorpsi foton, medan listrik internal tersebut memisahkan muatan dan mendorong elektron menuju sisi n serta hole menuju sisi p. Aliran elektron melalui rangkaian eksternal menghasilkan arus listrik searah (DC).

Secara operasional, daya keluaran panel surya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus ($P = V \times I$). Arus keluaran modul umumnya berbanding lurus dengan intensitas radiasi matahari yang diterima, sedangkan tegangan rangkaian terbuka (Voc) sangat dipengaruhi oleh suhu sel. Peningkatan suhu menyebabkan penurunan tegangan akibat peningkatan arus saturasi pada sambungan p–n, sehingga efisiensi konversi energi menurun pada suhu operasional tinggi. Hubungan antara radiasi, suhu, dan performa listrik modul fotovoltaik menjadi parameter penting dalam evaluasi kinerja sistem PV modern (Shaik et al., 2023).

Selain faktor material dan suhu, performa sistem fotovoltaik juga dipengaruhi oleh orientasi panel, sudut kemiringan, kondisi atmosfer, serta faktor lingkungan lainnya. Namun secara fundamental, mekanisme efek fotovoltaik dan karakteristik sambungan p–n tetap menjadi dasar utama dalam menjelaskan proses transformasi energi cahaya menjadi energi listrik pada panel surya (Green et al., 2023).

2.2.2 Pengertian dan Karakteristik Panel Surya Monokristalin

Panel surya monokristalin merupakan modul fotovoltaik yang menggunakan silikon kristal tunggal sebagai bahan utama sel surya. Struktur kristal yang seragam terbentuk melalui proses pertumbuhan kristal tunggal sehingga susunan atomnya teratur dan memiliki tingkat cacat kristal yang sangat rendah. Dalam perspektif teori semikonduktor, keteraturan struktur kristal tersebut dapat meningkatkan mobilitas

pembawa muatan serta menurunkan tingkat rekombinasi elektron dan hole. Kondisi ini menyebabkan proses pemisahan muatan pada sambungan p–n berlangsung lebih efektif sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan oleh sel surya (Green et al., 2023).

Teori sambungan p–n menjelaskan bahwa pertemuan antara material semikonduktor tipe-p dan tipe-n akan membentuk medan listrik internal pada daerah junction. Medan listrik ini berfungsi memisahkan pasangan elektron–hole yang terbentuk akibat penyerapan foton dari radiasi matahari. Pada sel surya monokristalin, hambatan internal relatif rendah karena struktur kristal yang homogen, sehingga aliran arus listrik dapat berlangsung lebih stabil. Kondisi tersebut menjadikan panel monokristalin memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan panel berbasis polikristalin (Rabaia et al., 2021).

Secara fisik, sel surya monokristalin umumnya memiliki warna hitam pekat yang menunjukkan kemampuan penyerapan cahaya yang lebih baik. Permukaan sel biasanya berbentuk pseudo-square dengan sudut yang terpotong, yang merupakan hasil dari proses pemotongan wafer dari kristal silikon berbentuk silinder. Karakteristik fisik ini menjadi salah satu pembeda visual utama antara panel surya monokristalin dan tipe panel surya lainnya.

Karakteristik Utama Panel Surya Monokristalin :

1. Efisiensi tinggi

Panel monokristalin memiliki efisiensi konversi energi yang relatif lebih tinggi dibandingkan jenis panel surya lainnya. Struktur kristal tunggal yang seragam meminimalkan kehilangan energi akibat proses rekombinasi pembawa muatan. Dengan efisiensi yang lebih tinggi, panel monokristalin mampu menghasilkan daya listrik yang lebih besar pada luas permukaan yang sama (Green et al., 2023).

2. Koefisien suhu negatif

Daya keluaran panel surya monokristalin cenderung menurun ketika suhu sel meningkat. Peningkatan suhu menyebabkan penurunan tegangan rangkaian terbuka (open circuit voltage) akibat perubahan karakteristik semikonduktor pada

sambungan p–n. Oleh karena itu, koefisien suhu menjadi parameter penting dalam analisis kinerja panel surya di lingkungan operasional (Shaik et al., 2023).

3. Stabilitas performa jangka panjang

Struktur kristal yang homogen pada panel monokristalin mendukung stabilitas performa dalam jangka waktu yang panjang. Tingkat degradasi daya pada panel monokristalin relatif lebih lambat dibandingkan jenis panel lainnya. Secara umum, panel monokristalin memiliki umur teknis lebih dari 20 tahun dengan penurunan efisiensi yang terjadi secara bertahap setiap tahunnya (Rabaia et al., 2021).

2.2.3 Spesifikasi dan Kinerja Panel Surya Monokristalin 20 WP

Panel surya monokristalin 20 WP merupakan modul fotovoltaik berkapasitas kecil yang banyak digunakan pada sistem tenaga surya skala laboratorium, perangkat edukasi, serta aplikasi dengan kebutuhan daya rendah. Daya puncak sebesar 20 watt ditentukan berdasarkan pengujian pada kondisi Standard Test Conditions (STC). Kondisi STC merupakan standar internasional yang digunakan untuk menguji performa modul fotovoltaik, yaitu pada intensitas radiasi matahari sebesar 1000 W/m², suhu sel sebesar 25°C, dan spektrum radiasi matahari standar AM 1.5 (Green et al., 2023).

Dalam kondisi operasional di lapangan, parameter lingkungan sering kali tidak sesuai dengan kondisi STC. Suhu sel panel surya dapat meningkat secara signifikan akibat penyerapan radiasi matahari dan keterbatasan pelepasan panas ke lingkungan. Peningkatan suhu ini menyebabkan penurunan tegangan keluaran modul sehingga daya aktual yang dihasilkan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan daya nominal yang tertera pada spesifikasi panel. Fenomena ini berkaitan dengan sifat material semikonduktor yang sensitif terhadap perubahan suhu (Shaik et al., 2023).

Secara umum, panel surya monokristalin berkapasitas 20 WP memiliki spesifikasi teknis berupa tegangan maksimum daya sekitar 17–18 volt, arus maksimum daya sekitar 1,1–1,2 ampere, serta tegangan rangkaian terbuka (open circuit voltage) sekitar 21–22 volt. Nilai spesifikasi ini dapat berbeda tergantung pada pabrikan, namun umumnya menggunakan konfigurasi sekitar 36 sel yang

dirangkai secara seri. Konfigurasi tersebut dirancang untuk mendukung sistem pengisian baterai 12 volt pada aplikasi off-grid skala kecil.

Kinerja panel surya ditentukan oleh interaksi antara intensitas radiasi matahari, suhu sel, serta karakteristik listrik modul. Peningkatan intensitas radiasi akan meningkatkan jumlah foton yang diserap oleh sel surya sehingga arus keluaran meningkat. Sebaliknya, kenaikan suhu sel cenderung menurunkan tegangan keluaran modul. Kombinasi kedua faktor ini secara langsung mempengaruhi besar kecilnya daya aktual yang dihasilkan panel surya pada kondisi operasional tertentu (Shaik et al., 2023).

2.2.4 Faktor Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Kinerja panel surya dipengaruhi oleh berbagai faktor yang secara langsung memengaruhi parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya keluaran. Faktor-faktor tersebut dapat diklasifikasikan menjadi faktor lingkungan dan faktor teknis. Secara umum, faktor utama yang memengaruhi performa panel surya meliputi intensitas radiasi matahari, suhu sel, sistem pendinginan, serta kondisi pemasangan seperti ventilasi dan orientasi panel (Shaik et al., 2023).

2.2.4.1 Intensitas radiasi

Intensitas radiasi matahari merupakan faktor utama yang menentukan jumlah energi yang dapat dikonversi oleh panel surya. Semakin tinggi intensitas radiasi yang diterima, semakin besar jumlah foton yang diserap oleh sel surya, sehingga meningkatkan pembentukan pasangan elektron-hole. Kondisi ini menyebabkan peningkatan arus keluaran secara signifikan.

Penelitian Irwanto et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari menyebabkan peningkatan arus dan daya keluaran panel surya. Sebaliknya, ketika intensitas radiasi menurun akibat perubahan kondisi cuaca, tegangan, arus, dan daya keluaran panel juga mengalami penurunan.

Secara karakteristik, arus berbanding lurus dengan intensitas radiasi, sedangkan tegangan hanya mengalami peningkatan dalam rentang terbatas. Oleh karena itu, peningkatan daya keluaran panel surya lebih dominan dipengaruhi oleh kenaikan arus akibat peningkatan radiasi. Sebaliknya, pada kondisi radiasi rendah, arus yang dihasilkan menjadi kecil sehingga daya keluaran juga menurun

2.2.4.2 Suhu sel

Suhu sel memiliki pengaruh negatif terhadap kinerja panel surya. Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan energi kinetik pembawa muatan, namun pada saat yang sama menurunkan tegangan rangkaian terbuka (Voc) dan tegangan maksimum daya (Vmp). Penurunan tegangan ini mengakibatkan berkurangnya daya keluaran secara keseluruhan.

Pada kondisi operasional di wilayah tropis, suhu sel sering melebihi suhu standar pengujian (25°C). Kenaikan suhu ini tidak hanya menurunkan efisiensi konversi, tetapi juga dapat mempercepat degradasi material panel. Oleh karena itu, suhu menjadi salah satu faktor kritis yang harus dikendalikan dalam upaya optimasi kinerja panel surya (Shaik et al., 2023).

2.2.4.3 Sistem pendinginan

Sistem pendinginan berfungsi untuk mengendalikan suhu sel agar tetap berada pada kondisi optimal. Pendinginan dapat dilakukan secara aktif maupun pasif. Sistem pendinginan pasif, seperti penggunaan heatsink atau ventilasi alami, bekerja dengan meningkatkan pelepasan panas melalui mekanisme konduksi dan konveksi.

Penurunan suhu sel akibat sistem pendinginan akan meningkatkan tegangan kerja panel, sehingga berdampak langsung pada peningkatan daya keluaran. Berbagai studi menunjukkan bahwa penerapan sistem pendinginan dapat meningkatkan stabilitas performa panel surya terutama pada kondisi radiasi tinggi**.**

2.2.4.4 Ventilasi dan orientasi panel

Ventilasi dan orientasi panel merupakan faktor instalasi yang memengaruhi kinerja termal dan penyerapan radiasi. Ventilasi yang baik memungkinkan sirkulasi udara di bagian belakang panel, sehingga mempercepat proses pelepasan panas melalui konveksi alami. Panel yang dipasang tanpa ruang ventilasi cenderung mengalami peningkatan suhu yang lebih tinggi.

Selain itu, orientasi dan sudut kemiringan panel menentukan besarnya radiasi efektif yang diterima. Sudut kemiringan yang sesuai dengan lintang geografis akan memaksimalkan penyerapan energi matahari sepanjang hari.

Sebaliknya, orientasi yang tidak tepat dapat mengurangi intensitas radiasi yang diterima meskipun kondisi cuaca cerah (Shaik et al., 2023).

2.2.5 Hubungan Suhu dengan Tegangan dan Arus Panel Surya

Hubungan antara suhu dan parameter listrik panel surya dijelaskan melalui konsep suhue coefficient, yaitu tingkat sensitivitas tegangan, arus, dan daya terhadap perubahan suhu. Pada material semikonduktor silikon, peningkatan suhu memengaruhi sifat kelistrikan melalui perubahan energi celah pita (band gap) serta dinamika pembawa muatan (Hudis & Chereches, 2021).

Kenaikan suhu menyebabkan peningkatan energi kinetik elektron sehingga mempercepat proses rekombinasi antara elektron dan hole. Proses ini menurunkan beda potensial pada junction p-n dan mengakibatkan penurunan tegangan rangkaian terbuka (open circuit voltage/Voc) secara signifikan. Di sisi lain, arus keluaran cenderung mengalami peningkatan yang relatif kecil akibat kenaikan konsentrasi pembawa muatan intrinsik. Namun, peningkatan arus tersebut tidak mampu mengimbangi penurunan tegangan, sehingga daya maksimum panel tetap menurun ketika suhu meningkat (Hudis & Chereches, 2021).

Secara kuantitatif, pengaruh suhu terhadap kinerja panel dinyatakan dalam koefisien suhu yang menunjukkan perubahan parameter listrik untuk setiap kenaikan 1°C dari suhu referensi 25°C. Panel surya monokristalin umumnya memiliki koefisien suhu daya bernilai negatif, yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu akan menyebabkan penurunan daya keluaran secara langsung.

Hasil penelitian Harahap (2020) juga memperlihatkan bahwa temperatur permukaan merupakan salah satu faktor dominan yang memengaruhi karakteristik keluaran panel surya. Semakin tinggi temperatur permukaan panel, semakin besar penurunan daya yang dihasilkan sehingga diperlukan upaya pengendalian suhu selama operasi panel.

Dalam kondisi operasional di wilayah tropis, suhu sel dapat meningkat jauh di atas suhu standar akibat paparan radiasi matahari yang tinggi. Permukaan panel yang terpapar langsung sinar matahari dapat mencapai suhu lebih dari 45°C. Kondisi ini menyebabkan penurunan tegangan menjadi faktor dominan dalam menurunkan performa sistem. Oleh karena itu, analisis hubungan suhu dengan

tegangan dan arus menjadi aspek penting dalam penelitian optimasi daya keluaran panel surya.

2.2.6 Dampak Kenaikan Suhu terhadap Daya dan Efisiensi

Kenaikan suhu sel panel surya memberikan dampak langsung terhadap performa listrik dan efisiensi konversi energi. Secara teoritis, peningkatan suhu memengaruhi karakteristik semikonduktor melalui peningkatan laju rekombinasi pembawa muatan dan penurunan beda potensial pada junction p-n. Kondisi ini menyebabkan penurunan tegangan keluaran yang berkontribusi terhadap penurunan daya maksimum panel surya (Hudis & Chereches, 2021).

Secara umum, peningkatan suhu sel di atas kondisi standar pengujian (25°C) akan menurunkan efisiensi dan daya keluaran panel. Studi eksperimental menunjukkan bahwa panel surya silikon kristalin mengalami penurunan efisiensi sekitar 0,3% hingga 0,5% untuk setiap kenaikan suhu 1°C, tergantung pada karakteristik material dan desain modul (Shaik et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa suhu merupakan salah satu faktor dominan yang memengaruhi performa sistem fotovoltaik.

Dampak kenaikan suhu terhadap kinerja panel surya dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penurunan tegangan

Tegangan rangkaian terbuka (Voc) dan tegangan maksimum daya (Vmp) mengalami penurunan akibat berkurangnya beda potensial internal pada junction p-n. Penurunan tegangan ini menjadi faktor utama dalam berkurangnya daya keluaran panel (Hudis & Chereches, 2021).

2. Penurunan daya maksimum

Daya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus. Meskipun arus mengalami sedikit peningkatan akibat kenaikan suhu, penurunan tegangan jauh lebih signifikan sehingga menyebabkan daya maksimum menurun secara keseluruhan (Shaik et al., 2023).

3. Penurunan efisiensi konversi

Efisiensi panel surya didefinisikan sebagai perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan dengan energi radiasi yang diterima. Ketika daya keluaran menurun akibat kenaikan suhu, maka efisiensi konversi juga mengalami penurunan secara langsung.

Dalam kondisi operasional di wilayah tropis, suhu sel panel surya dapat meningkat hingga lebih dari 45°C akibat paparan radiasi matahari yang tinggi dan keterbatasan pelepasan panas. Kenaikan suhu yang signifikan ini berpotensi menurunkan efisiensi panel secara substansial dan mengurangi total energi listrik yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengendalian suhu melalui sistem pendinginan menjadi langkah penting dalam upaya optimasi kinerja panel surya.

2.2.7 Konsep Dasar Manajemen Termal Panel Surya

Manajemen termal panel surya merupakan suatu pendekatan teknis yang bertujuan untuk mengendalikan suhu sel fotovoltaik agar tetap berada pada kondisi operasi yang optimal. Suhu yang tinggi dapat menurunkan tegangan keluaran, daya maksimum, serta efisiensi konversi energi listrik. Oleh karena itu, pengelolaan panas menjadi aspek penting dalam meningkatkan kinerja sistem fotovoltaik (Ramkiran et al., 2021).

Secara teoritis, perpindahan panas pada panel surya mengikuti prinsip dasar perpindahan panas (heat transfer) yang meliputi tiga mekanisme utama, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga mekanisme ini terjadi secara bersamaan ketika panel menerima radiasi matahari dan mengalami peningkatan suhu.

1. Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan panas melalui material padat akibat adanya perbedaan suhu. Pada panel surya, panas yang dihasilkan oleh sel silikon akan merambat menuju lapisan belakang modul dan rangka panel. Proses ini sangat dipengaruhi oleh konduktivitas termal material, di mana material dengan konduktivitas tinggi seperti aluminium mampu mempercepat aliran panas keluar dari sel sehingga mengurangi akumulasi suhu.

2. Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan panas antara permukaan panel dengan udara di sekitarnya. Pada kondisi alami, udara yang bersentuhan dengan permukaan panas akan mengalami pemuaian dan bergerak naik, kemudian digantikan oleh udara yang lebih dingin. Proses ini dikenal sebagai konveksi alami. Peningkatan luas permukaan serta desain struktur pendingin seperti sirip (fins) dapat meningkatkan efektivitas konveksi dan mempercepat pelepasan panas ke lingkungan (Elminshawy et al., 2022).

3. Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan panas dalam bentuk gelombang elektromagnetik dari permukaan panel ke lingkungan. Besarnya radiasi termal dipengaruhi oleh suhu permukaan serta sifat emisivitas material. Walaupun kontribusinya relatif lebih kecil dibandingkan konveksi, mekanisme ini tetap berperan dalam total pelepasan panas dari panel surya.

Secara konseptual, manajemen termal bertujuan untuk menciptakan keseimbangan antara panas yang diterima panel akibat radiasi matahari dengan panas yang dilepaskan ke lingkungan. Ketika laju pelepasan panas lebih besar dibandingkan akumulasi panas, suhu sel akan menurun sehingga performa listrik panel menjadi lebih stabil.

Dalam implementasinya, sistem pendinginan pasif seperti heatsink, sirip pendingin, dan ventilasi alami digunakan untuk meningkatkan luas permukaan pelepasan panas serta memperbaiki sirkulasi udara di sekitar panel. Pendekatan ini dinilai efektif karena tidak memerlukan energi tambahan dan mampu meningkatkan efisiensi panel melalui penurunan suhu operasional (Elminshawy et al., 2022).

2.2.8 Sistem Pendingin Aktif dan Pasif

Sistem pendinginan pada panel surya diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu sistem pendingin aktif dan sistem pendingin pasif. Kedua sistem ini bertujuan untuk menurunkan suhu sel fotovoltaik agar tetap berada pada kondisi kerja optimal, sehingga stabilitas tegangan, daya keluaran, dan efisiensi konversi energi dapat dipertahankan. Perbedaan utama antara kedua sistem terletak pada

penggunaan energi tambahan serta mekanisme perpindahan panas yang digunakan (Novitasari et al., 2025).

2.2.8.1 Sistem Pendingin Aktif

Sistem pendingin aktif merupakan metode pendinginan yang menggunakan bantuan energi eksternal untuk meningkatkan laju perpindahan panas dari panel surya ke lingkungan. Sistem ini umumnya memanfaatkan perangkat mekanis seperti kipas (fan), blower, atau pompa fluida untuk mempercepat proses konveksi.

Pada sistem berbasis udara, kipas digunakan untuk meningkatkan aliran udara pada permukaan belakang panel sehingga panas dapat dilepaskan lebih cepat. Sementara itu, pada sistem pendingin cair, fluida seperti air dialirkan menggunakan pompa untuk menyerap panas dari permukaan panel, kemudian dibuang ke lingkungan melalui proses sirkulasi (Novitasari et al., 2025).

Keunggulan sistem pendingin aktif terletak pada kemampuannya dalam menurunkan suhu panel secara signifikan, terutama pada kondisi radiasi matahari tinggi. Dengan suhu yang lebih rendah, tegangan dan daya keluaran panel dapat dipertahankan mendekati kondisi optimal. Namun demikian, sistem ini memiliki kelemahan berupa kebutuhan energi tambahan untuk mengoperasikan perangkat pendingin. Konsumsi energi tersebut dapat mengurangi daya bersih yang dihasilkan panel. Selain itu, keberadaan komponen mekanis juga meningkatkan kompleksitas sistem serta kebutuhan perawatan berkala (Novitasari et al., 2025).

2.2.8.2 Sistem Pendingin Pasif

Sistem pendingin pasif merupakan metode pendinginan yang tidak memerlukan energi tambahan dalam proses operasinya. Pendinginan terjadi secara alami melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi. Sistem ini biasanya memanfaatkan desain struktural seperti heatsink, sirip pendingin (fins), serta pengaturan ventilasi untuk meningkatkan pelepasan panas dari panel surya.

Heatsink berbahan aluminium banyak digunakan karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi, sehingga mampu mempercepat aliran panas dari panel menuju lingkungan. Selain itu, peningkatan luas permukaan melalui penambahan sirip memungkinkan proses konveksi alami berlangsung lebih efektif.

Ventilasi yang baik juga berperan dalam memperlancar sirkulasi udara di sekitar panel sehingga panas dapat dilepaskan dengan lebih optimal (Novitasari et al., 2025).

Keunggulan utama sistem pendingin pasif adalah kesederhanaan desain, biaya operasional yang rendah, serta tidak adanya konsumsi energi tambahan. Hal ini menjadikan sistem pasif sangat cocok untuk aplikasi panel surya skala kecil, seperti modul 20 WP, karena lebih efisien secara energi dan minim perawatan. Namun, efektivitas sistem ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan, seperti kecepatan angin dan suhu udara sekitar. Pada kondisi udara yang stagnan, kemampuan pendinginan sistem pasif cenderung lebih rendah dibandingkan sistem aktif (Novitasari et al., 2025).

2.2.9 Heatsink sebagai Sistem Pendingin Pasif

Heatsink merupakan perangkat pendingin pasif yang dirancang untuk meningkatkan pelepasan panas dari permukaan panel surya ke lingkungan. Komponen ini bekerja tanpa energi eksternal dan mengandalkan prinsip konduksi serta konveksi alami. Pada modul fotovoltaik, panas yang terakumulasi pada sel silikon dialirkan menuju bagian belakang panel, kemudian disalurkan ke heatsink untuk dilepaskan ke udara sekitar.

Heatsink meningkatkan luas permukaan kontak dengan udara melalui struktur sirip atau fin. Semakin besar luas permukaan, semakin besar pula area perpindahan panas. Kondisi ini mempercepat proses konveksi alami karena udara panas di sekitar sirip akan naik dan digantikan udara yang lebih dingin. Mekanisme ini menurunkan suhu sel secara bertahap dan menjaga stabilitas tegangan kerja.

Penelitian menunjukkan penggunaan heatsink dapat menurunkan suhu panel hingga beberapa derajat dan meningkatkan daya keluaran (Nazaar et al., 2024). Penurunan suhu ini berdampak langsung pada peningkatan tegangan maksimum daya karena karakteristik panel monokristalin memiliki koefisien suhu negatif. Dengan suhu yang lebih rendah, penurunan tegangan dapat diminimalkan sehingga daya dan efisiensi konversi meningkat.

2.2.10 Karakteristik dan Prinsip Kerja Heatsink

Heatsink merupakan komponen pendingin pasif yang berfungsi untuk mempercepat pelepasan panas dari suatu permukaan ke lingkungan tanpa memerlukan energi tambahan. Pada sistem panel surya, heatsink umumnya dipasang pada bagian belakang modul untuk mengurangi akumulasi panas akibat kinerja listrik panel tetap stabil (Hudis & Chereches, 2021).

Prinsip kerja heatsink didasarkan pada mekanisme perpindahan panas yang meliputi konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga mekanisme ini bekerja secara bersamaan dalam proses pelepasan panas dari panel ke lingkungan. Heatsink bekerja melalui tiga mekanisme utama perpindahan panas, yaitu konduksi dan konveksi.

1. Konduksi panas dari panel ke heatsink

Panas yang dihasilkan oleh sel surya akan berpindah menuju heatsink melalui proses konduksi. Perpindahan ini terjadi karena adanya perbedaan suhu antara panel dan heatsink. Efektivitas proses konduksi sangat dipengaruhi oleh sifat material dan kualitas kontak antara permukaan panel dan heatsink. Material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti aluminium, memungkinkan aliran panas yang lebih cepat dan merata ke seluruh bagian heatsink (Hudis & Chereches, 2021).

2. Konveksi panas ke udara

Panas yang telah mencapai heatsink akan dilepaskan ke udara melalui mekanisme konveksi alami. Heatsink biasanya dilengkapi dengan sirip (fin) yang berfungsi untuk memperluas luas permukaan kontak dengan udara. Peningkatan luas permukaan ini memperbesar laju perpindahan panas, di mana udara panas di sekitar sirip akan naik dan digantikan oleh udara yang lebih dingin, sehingga membentuk sirkulasi alami yang berkelanjutan (Elminshawy et al., 2022).

Karakteristik heatsink sangat dipengaruhi oleh material dan desain geometrinya. Aluminium menjadi material yang umum digunakan karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi, ringan, dan tahan terhadap korosi. Selain itu, desain sirip seperti jumlah, tinggi, ketebalan, dan jarak antar sirip menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas pendinginan. Desain yang tidak optimal,

seperti jarak sirip yang terlalu rapat, dapat menghambat aliran udara alami dan menurunkan performa perpindahan panas (Elminshawy et al., 2022).

2.2.11 ESP32 sebagai Sistem Pengukuran

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam sistem pengukuran dan akuisisi data karena memiliki kemampuan pemrosesan yang tinggi serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi dengan sensor. ESP32 dilengkapi dengan fitur Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, sehingga mampu melakukan pengolahan dan pengiriman data secara real-time. Selain itu, ESP32 memiliki jumlah pin input/output yang cukup banyak sehingga dapat digunakan untuk menghubungkan beberapa sensor dalam satu sistem pengukuran (Technology & Science, 2024).

Konsep sistem monitoring secara real-time telah banyak diterapkan pada berbagai bidang keteknikan untuk memantau kondisi operasi peralatan. Evalina et al. (2024) merancang sistem monitoring suhu dan getaran pada bearing motor induksi berbasis Human Machine Interface (HMI), sehingga parameter operasi dapat dipantau secara kontinu dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Penerapan konsep monitoring secara real-time tersebut menunjukkan pentingnya sistem akuisisi data yang mampu menyajikan informasi pengukuran secara berkelanjutan.

Dalam sistem pengukuran panel surya, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengolahan data yang menerima informasi dari sensor arus, sensor tegangan, dan sensor suhu. Data yang diperoleh dari sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler dan dikirimkan ke perangkat komputer melalui komunikasi serial untuk ditampilkan dan disimpan sebagai data pengujian. Kemampuan ini memungkinkan proses pengambilan data dilakukan secara otomatis dan berkelanjutan sehingga dapat meningkatkan efisiensi serta akurasi pengukuran.

Penelitian yang dilakukan oleh (Technology & Science, 2024) menunjukkan bahwa ESP32 mampu digunakan sebagai sistem pengukuran pada pembangkit listrik tenaga surya untuk mengukur parameter listrik berupa tegangan, arus, dan daya secara real-time. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ESP32 dapat mendukung proses pemantauan kinerja panel surya secara efektif dan mempermudah proses pengumpulan data selama pengujian berlangsung.

Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai sistem pengukuran untuk memperoleh data suhu, tegangan, dan arus dari dua panel surya monokristalin 20 WP yang diuji secara simultan. Data yang diperoleh digunakan untuk menganalisis pengaruh pemasangan heatsink aluminium terhadap suhu kerja panel dan daya keluaran yang dihasilkan. Dengan kemampuan pemrosesan yang baik serta kemudahan integrasi dengan berbagai sensor, ESP32 menjadi salah satu mikrokontroler yang sesuai untuk mendukung sistem pengukuran pada penelitian ini.

2.2.12 Sensor INA219

Sensor INA219 merupakan sensor arus dan tegangan berbasis integrated circuit (IC) yang dikembangkan oleh Texas Instruments. Sensor ini dirancang untuk melakukan pengukuran tegangan, arus, dan daya pada sistem kelistrikan DC secara digital dengan tingkat akurasi yang baik. INA219 banyak digunakan pada sistem pengukuran energi karena mampu mengukur tegangan dan arus secara bersamaan melalui komunikasi I2C, sehingga memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32 dan Arduino.

Prinsip kerja INA219 didasarkan pada metode pengukuran tegangan jatuh (voltage drop) pada resistor shunt yang terpasang di dalam modul sensor. Ketika arus listrik mengalir melalui resistor shunt, akan timbul perbedaan tegangan yang sangat kecil. Tegangan tersebut kemudian diukur dan diolah oleh IC INA219 untuk menghitung nilai arus yang mengalir pada rangkaian. Selain mengukur arus, sensor ini juga dapat mengukur tegangan sumber sehingga daya listrik dapat dihitung secara otomatis.

Pada sistem pengukuran panel surya, sensor INA219 digunakan untuk memperoleh data tegangan dan arus keluaran panel secara real-time. Data hasil pengukuran dikirimkan ke mikrokontroler melalui komunikasi I2C untuk selanjutnya diproses dan ditampilkan pada perangkat pengukur. Penggunaan sensor INA219 memungkinkan proses pengambilan data dilakukan secara otomatis dan kontinu sehingga mempermudah analisis performa panel surya selama pengujian berlangsung.

Penelitian yang dilakukan oleh (Muqorrobin et al., 2024) menunjukkan bahwa sensor INA219 mampu digunakan untuk pengukuran tegangan, arus, dan

daya pada sistem PLTS berbasis ESP32 dengan tingkat kesalahan pengukuran yang relatif kecil dibandingkan alat ukur standar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa INA219 layak digunakan sebagai instrumen pengukuran dalam penelitian panel surya karena memiliki akurasi yang memadai serta kemudahan integrasi dengan sistem mikrokontroler.

Dalam penelitian ini, sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus keluaran dari masing-masing panel surya monokristalin 20 WP. Data hasil pengukuran digunakan untuk menghitung daya keluaran panel serta menganalisis pengaruh pemasangan heatsink aluminium terhadap peningkatan performa panel surya.

2.2.13 Sensor DS18B20

Sensor DS18B20 merupakan sensor suhu digital yang banyak digunakan pada sistem pengukuran karena memiliki tingkat akurasi yang baik, konsumsi daya rendah, serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler. Sensor ini dikembangkan oleh Maxim Integrated dan menggunakan protokol komunikasi One-Wire, sehingga hanya memerlukan satu jalur data untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. Karakteristik tersebut menjadikan DS18B20 banyak diterapkan pada sistem pengukuran suhu berbasis ESP32 maupun Arduino.

Prinsip kerja sensor DS18B20 didasarkan pada pengukuran suhu yang kemudian dikonversi secara langsung menjadi data digital oleh sensor. Data hasil pengukuran dikirimkan ke mikrokontroler melalui komunikasi One-Wire sehingga tidak memerlukan rangkaian konversi analog ke digital tambahan. Sensor ini memiliki rentang pengukuran suhu antara -55°C hingga 125°C dengan resolusi pengukuran hingga 12-bit, sehingga mampu menghasilkan data suhu yang cukup akurat untuk berbagai aplikasi pengukuran.

Dalam sistem pengukuran panel surya, sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu kerja panel selama proses pengujian berlangsung. Sensor ditempatkan pada bagian belakang panel surya untuk memperoleh data suhu yang mendekati kondisi aktual sel surya. Data suhu yang diperoleh kemudian dikirimkan ke ESP32 untuk direkam dan ditampilkan pada sistem pengukuran. Informasi suhu tersebut digunakan untuk menganalisis pengaruh kenaikan maupun penurunan suhu terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya.

Penelitian yang dilakukan oleh (Munazzar & Saputra, 2026) menunjukkan bahwa sensor DS18B20 dapat digunakan sebagai sensor suhu pada sistem pengukuran berbasis ESP32 dengan kemampuan pembacaan data secara real-time dan stabil. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi ESP32 dan DS18B20 mampu mendukung proses pengukuran suhu secara kontinu dan efektif.

Pada penelitian ini, sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu permukaan belakang panel surya monokristalin 20 WP baik pada panel tanpa pendingin maupun panel yang menggunakan heatsink aluminium. Data suhu yang diperoleh digunakan untuk menganalisis efektivitas sistem pendingin pasif dalam menurunkan suhu kerja panel serta pengaruhnya terhadap daya keluaran yang dihasilkan.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Adapun waktu dan tempat pada pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

3.1.1 Waktu

Waktu yang digunakan dalam pelaksanaan tugas akhir ini dimulai dari bulan Mei 2026 sampai dengan bulan Juli 2026

3.1.2 Tempat

Tempat yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini di Laboratorium Teknik Elektro di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapten Muchtar Basri No.3, Glugur Darat II, Kec. Medan Timur, Kota Medan.

3.2 Alat dan Bahan

Pada saat ingin melakukan penelitian sistem ini, diperlukan alat serta bahan agar mempermudah pekerjaan. Adapaun alat dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut :

3.2.1 Alat penelitian

Dalam penelitian sistem ini penulis menggunakan beberapa alat yang digunakan untuk memperlancar proses pekerjaan alat pada sistem ini. Adapun alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Obeng positif(+) berfungsi untuk membuka dan mengetatkan baut (+).
2. Obeng negative(-) berfungsi untuk membuka dan mengetatkan baut (-).
3. Tang potong berfungsi untuk memotong dan mengupas kabel.
4. Tang buaya berfungsi untuk menjepit atau memegang benda kerja dengan kuat, terutama pada bagian yang sulit dijangkau.
5. Tang kombinasi berfungsi untuk menjepit, memutar, maupun memotong kabel dalam proses instalasi atau perbaikan.
6. Isolasi berfungsi untuk membungkus kabel yang di kupas atau mengisolasi penyambungan kabel.

3.2.2 Bahan penelitian

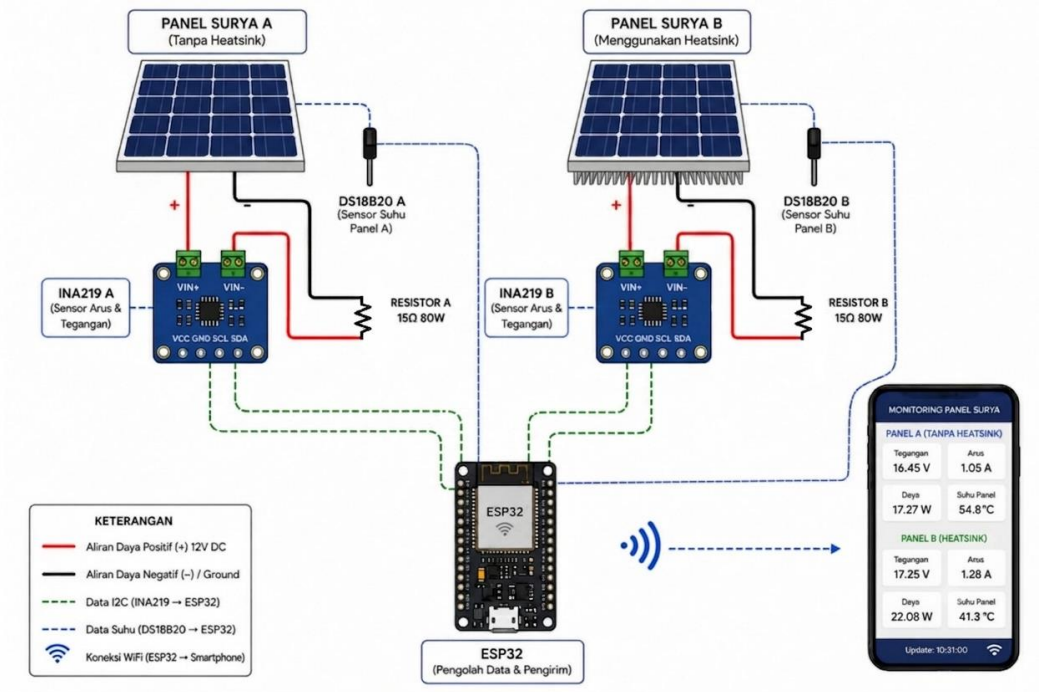
1. Panel surya Monokristalin 20WP : objek utama penelitian untuk dianalisis daya keluarannya sebelum dan sesudah pemasangan heatsink.
2. Heatsink Alumunium : alat untuk menurunkan suhu kerja panel sehingga diharapkan dapat meningkatkan daya keluaran.
3. Sensor Suhu DS18B20 : berfungsi untuk mengambil data suhu panel.
4. Sensor Daya INA219 : berfungsi untuk mengambil data Arus, Tegangan
5. ESP32 : ESP32 menjadi otak dari modul pengukuran dan sebagai pengirim data ke platform IoTKita untuk pencatatan data.
6. Beban Resistor : Sebagai beban dalam penelitian
7. Rangka penyangga : Sebagai dudukan panel

3.3 Perancangan Sistem Penelitian

Perancangan sistem penelitian dilakukan untuk memperoleh konfigurasi sistem yang sesuai dengan tuujuan penelitian.

3.3.1 Konsep Sistem Pengujian

Sistem penelitian dirancang untuk membandingkan kinerja dua panel surya monokristalin 20 WP yang diberikan perlakuan berbeda, yaitu panel surya tanpa sistem pendingin dan panel surya yang menggunakan sistem pendingin pasif heatsink. Perbandingan tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan heatsink terhadap suhu kerja dan daya keluaran panel surya.



Gambar 3. 1 Konsep sistem pengujian

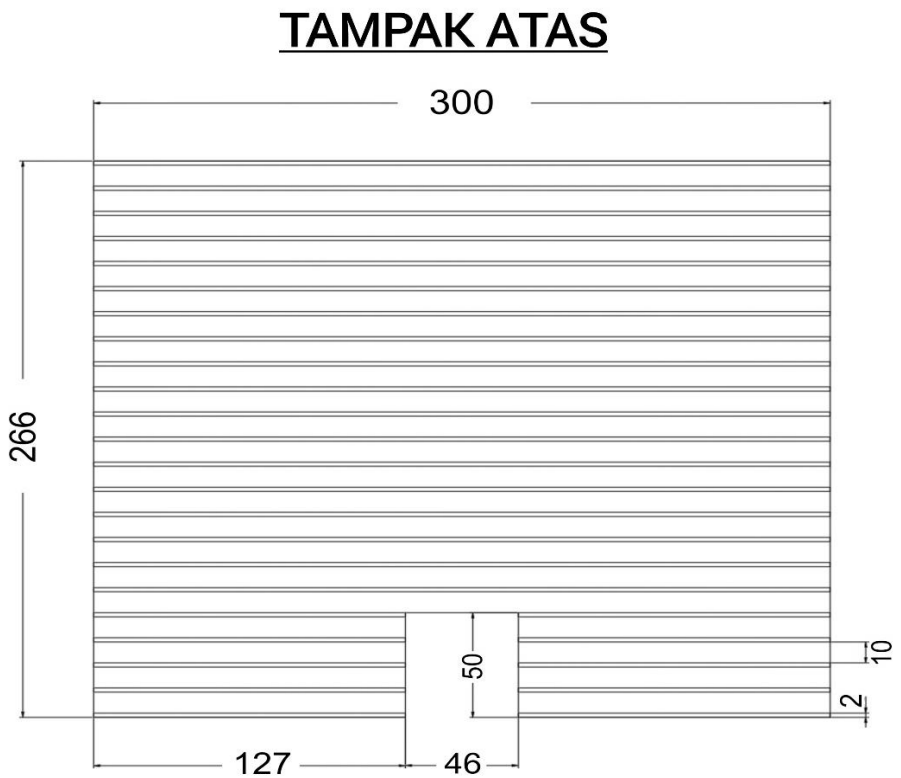
Pada sistem yang dirancang, masing-masing panel surya dihubungkan dengan sensor INA219 untuk mengukur tegangan dan arus keluaran panel serta sensor DS18B20 untuk mengukur suhu panel surya. Data hasil pengukuran dari kedua panel kemudian dikirimkan ke ESP32 sebagai unit akuisisi dan transmisi data. Selanjutnya, data dikirim secara nirkabel melalui jaringan WiFi menuju perangkat smartphone sehingga dapat dipantau secara real-time.

Panel surya A digunakan sebagai panel pembanding tanpa pemasangan heatsink, sedangkan panel surya B digunakan sebagai panel uji yang dipasang sistem pendingin pasif heatsink pada bagian belakang panel. Masing-masing panel dihubungkan dengan beban DC yang memiliki spesifikasi yang sama sehingga kondisi pengujian dapat dibuat setara. Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi suhu panel, tegangan keluaran, arus keluaran, dan daya keluaran panel surya.

Melalui sistem penelitian yang dirancang tersebut, data dari kedua panel surya dapat diperoleh secara bersamaan sehingga memudahkan proses analisis terhadap pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap kinerja panel surya.

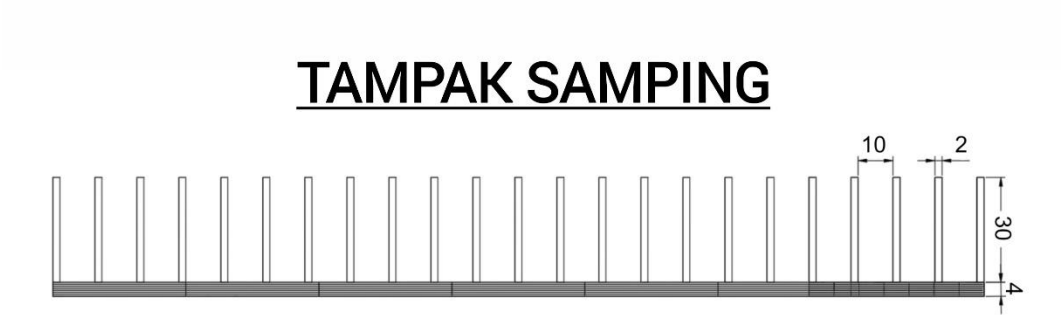
3.3.2 Desain Pendingin Pasif Heatsink

Sistem pendingin pasif pada penelitian ini dirancang menggunakan heatsink berbahan aluminium yang dipasang pada bagian belakang panel surya monokristalin 20 WP. Material aluminium dipilih karena memiliki konduktivitas termal yang baik, bobot yang relatif ringan, serta umum digunakan sebagai material heatsink pada berbagai aplikasi pendinginan pasif.



Gambar 3. 2 Tampak Atas Desain Heatsink

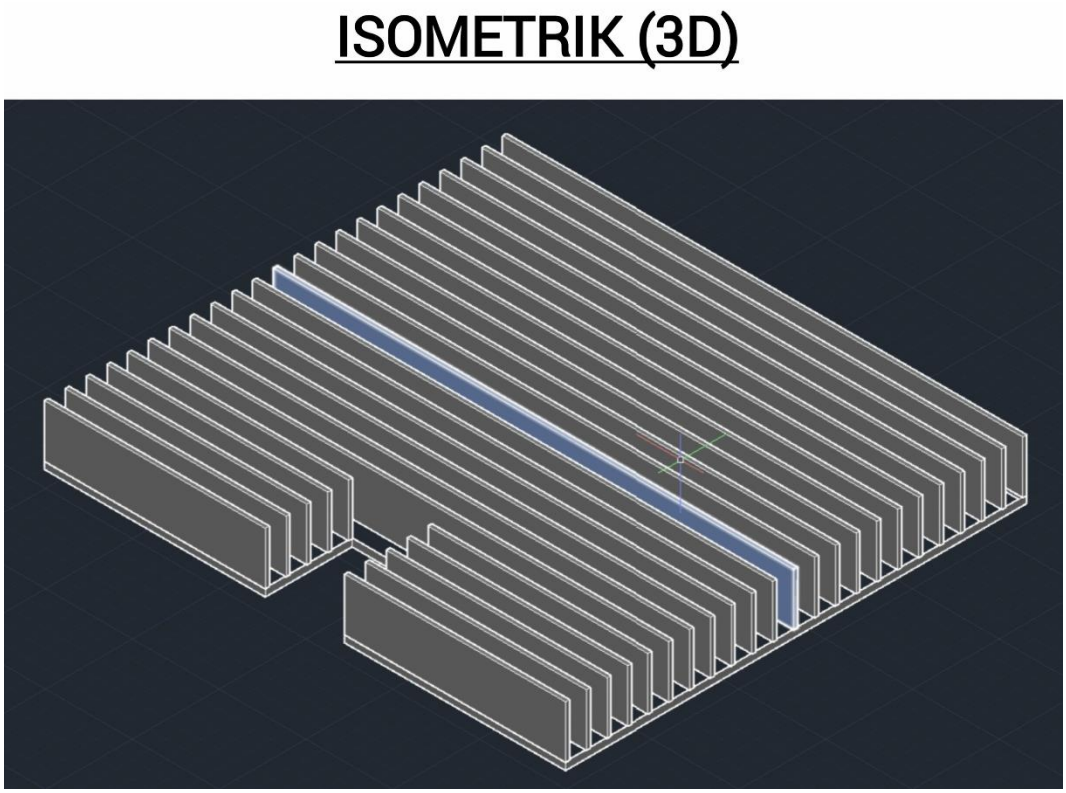
Heatsink yang digunakan memiliki dimensi lebar 300 mm dan panjang 266 mm. Pada bagian tengah heatsink terdapat potongan berbentuk U dengan lebar 46 mm dan panjang ke dalam 50 mm. Potongan tersebut dirancang untuk menyesuaikan posisi junction box pada bagian belakang panel surya sehingga pemasangan heatsink dapat dilakukan tanpa mengganggu komponen bawaan panel.



SPESIFIKASI HEATSINK	
Lebar (ke samping)	300 mm
Panjang (ke depan)	266 mm
Tinggi sirip	30 mm
Ketebalan sirip	2 mm
Jumlah sirip	23 buah
Jarak antar sirip (clearance)	10 mm
Ketebalan dasar (base)	4 mm
Ukuran potongan (lebar)	46 mm
Ukuran potongan (panjang ke dalam)	50 mm

Gambar 3. 3 Tampak Samping Desain Heatsink

Heatsink memiliki tinggi sirip sebesar 30 mm dengan ketebalan sirip 2 mm. Selain itu, heatsink menggunakan ketebalan alas sebesar 4 mm yang berfungsi sebagai media penghantar panas dari permukaan belakang panel surya menuju sirip pendingin. Heatsink terdiri dari 23 sirip yang disusun sejajar dengan jarak antar sirip sebesar 10 mm. Konfigurasi tersebut dirancang untuk memperbesar luas permukaan kontak dengan udara sehingga proses pelepasan panas dapat berlangsung lebih efektif.



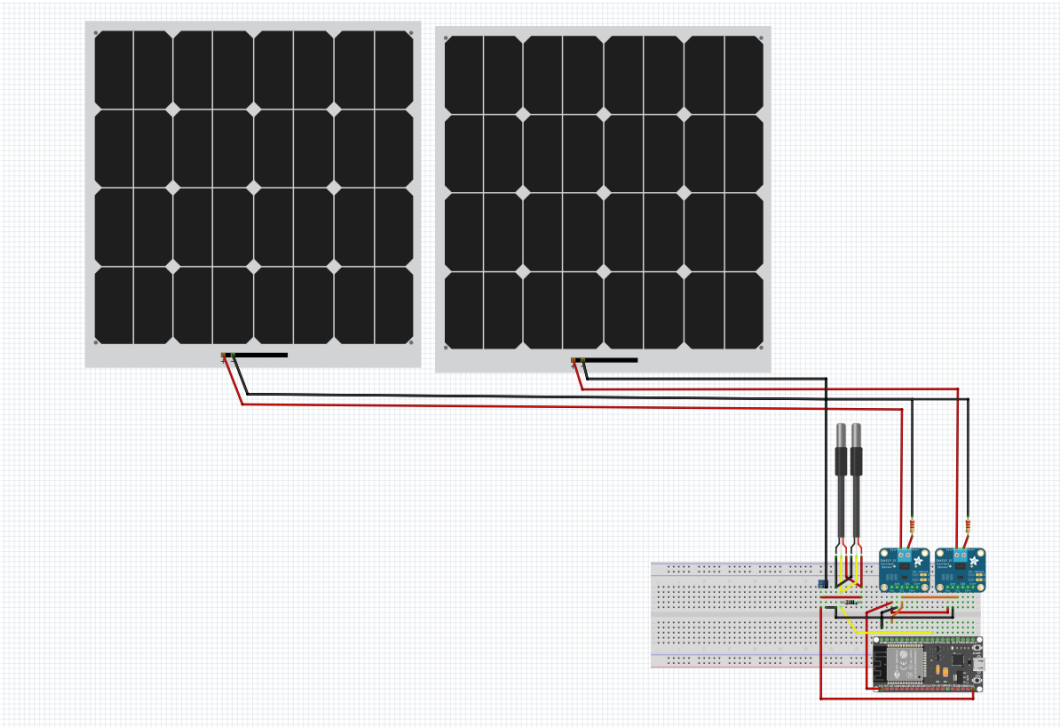
Gambar 3. 4 Isometrik (3D) Desain Heatsink

Susunan sirip sejajar memungkinkan udara mengalir di antara celah sirip sehingga panas yang diterima heatsink dapat dilepaskan ke lingkungan melalui proses konveksi alami. Dengan meningkatnya luas permukaan perpindahan panas, suhu kerja panel surya diharapkan dapat ditekan sehingga penurunan performa akibat kenaikan suhu dapat dikurangi.

Heatsink dipasang pada bagian belakang panel surya menggunakan thermal glue yang berfungsi sebagai perekat sekaligus media penghantar panas antara panel surya dan heatsink. Panas yang dihasilkan selama proses konversi energi surya akan disalurkan dari permukaan panel menuju heatsink, kemudian dilepaskan ke lingkungan melalui mekanisme konduksi dan konveksi alami. Rancangan ini dipilih karena tidak memerlukan sumber energi tambahan sehingga lebih sederhana, ekonomis, dan mudah diterapkan pada sistem panel surya skala kecil.

3.3.3 Desain Sistem Pengukuran Berbasis ESP32

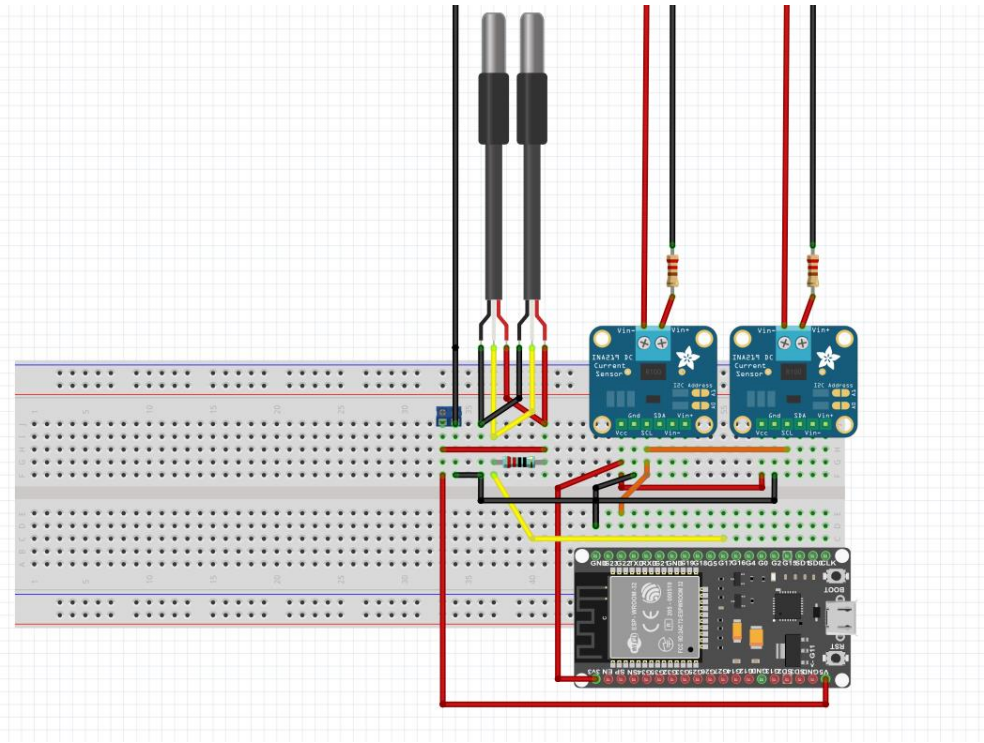
Desain sistem pengukuran berbasis ESP32 pada penelitian ini dirancang untuk mengintegrasikan seluruh komponen pengukuran ke dalam satu sistem yang mampu memperoleh data suhu, tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya secara otomatis dan simultan. Sistem terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor INA219 sebagai sensor arus dan tegangan, sensor DS18B20 sebagai sensor suhu, resistor beban 15 Ω 80 W, serta platform Web IoTKita sebagai media monitoring dan penyimpanan data hasil pengukuran. Desain sistem pengukuran yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Desain Sistem Pengukuran Berbasis ESP32

Gambar 3.5 menunjukkan rancangan sistem pengukuran secara keseluruhan yang menghubungkan dua panel surya monokristalin 20 WP dengan sistem pengukuran berbasis ESP32. Setiap panel dihubungkan dengan satu sensor INA219 untuk mengukur parameter listrik, sedangkan pengukuran suhu dilakukan menggunakan sensor DS18B20. Seluruh data hasil pengukuran diterima oleh ESP32 untuk diproses, kemudian dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju platform Web IoTKita sehingga dapat dipantau melalui smartphone maupun laptop

secara real-time. Konfigurasi detail rangkaian sistem pengukuran ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Konfigurasi Modul Sistem Pengukuran Berbasis ESP32

Pada konfigurasi rangkaian tersebut, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali sistem yang menghubungkan seluruh sensor pengukuran. Sensor DS18B20 dihubungkan secara paralel menggunakan protokol OneWire dengan jalur data menuju pin GPIO17 dan dilengkapi resistor pull-up 4,7 kΩ. Sementara itu, kedua sensor INA219 memperoleh catu daya 3,3 V dari ESP32 dan berkomunikasi menggunakan antarmuka I^2C melalui pin GPIO21 (SDA) dan GPIO22 (SCL). Agar kedua sensor dapat bekerja secara bersamaan, masing-masing sensor menggunakan alamat I2C yang berbeda, yaitu 0x40 dan 0x41.

Pada sisi pengukuran daya, terminal positif panel surya dihubungkan menuju terminal VIN(+) pada sensor INA219, kemudian diteruskan melalui terminal VIN(−) menuju resistor beban sebesar 15 Ω 80 W. Terminal negatif panel dibuat bercabang menuju terminal negatif beban serta dihubungkan ke ground sistem (common ground) sebagai referensi tegangan yang sama bagi ESP32 dan seluruh sensor.

Data suhu, tegangan, dan arus yang diperoleh dari masing-masing sensor diproses oleh ESP32 untuk menghitung daya keluaran panel surya. Selanjutnya, data hasil pengukuran dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju Web IoTKita sehingga dapat dipantau secara real-time melalui browser pada smartphone maupun laptop. Selain sebagai media monitoring, platform tersebut juga menyediakan fitur ekspor data ke format Microsoft Excel sehingga proses pencatatan data penelitian dapat dilakukan secara otomatis.

3.4 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dilakukan untuk memperoleh data suhu, tegangan, arus, dan daya keluaran dari dua panel surya monokristalin 20 WP yang diuji secara simultan. Panel surya A digunakan tanpa sistem pendingin pasif heatsink sebagai panel pembanding, sedangkan panel surya B dipasang sistem pendingin pasif heatsink sebagai panel perlakuan. Kedua panel ditempatkan berdampingan sehingga menerima kondisi lingkungan yang relatif sama selama proses pengujian. Untuk meminimalkan pengaruh variasi karakteristik sensor dan beban terhadap hasil penelitian, selama proses pengujian diterapkan metode pertukaran sensor dan beban (sensor and load swapping) yang disesuaikan dengan jenis pengujian yang dilakukan.

Melalui metode ini, setiap panel surya menggunakan seluruh sensor dan resistor beban dalam jumlah yang sama selama periode pengujian. Dengan demikian, perbedaan hasil pengukuran diharapkan lebih merepresentasikan pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink dibandingkan pengaruh karakteristik instrumen pengukuran maupun beban. Data pengukuran diperoleh menggunakan sensor DS18B20 dan INA219 yang terhubung dengan ESP32 sebagai sistem pengukuran berbasis Internet of Things (IoT).

3.4.1 Persiapan Pengujian

Tahap persiapan pengujian dilakukan dengan menyiapkan seluruh peralatan dan komponen yang digunakan dalam penelitian. Persiapan meliputi pemasangan sensor DS18B20 dan INA219 pada kedua panel surya, pemasangan sistem pengukuran berbasis ESP32, pemasangan sistem pendingin pasif heatsink pada

panel surya B, serta pemasangan resistor beban pada masing-masing panel surya dipengujian berbeban.

Kedua panel surya kemudian ditempatkan berdampingan dengan sudut kemiringan 0°. Setiap panel dihubungkan dengan resistor beban yang memiliki spesifikasi yang sama sehingga kondisi pengujian dibuat setara. Setelah seluruh komponen terpasang, dilakukan pengecekan koneksi sensor, sistem pengukuran, serta komunikasi data menuju platform IoTKita untuk memastikan seluruh perangkat berfungsi dengan baik sebelum proses pengambilan data dilakukan.

3.4.2 Pelaksanaan Pengujian

Pelaksanaan pengujian dilakukan secara simultan pada kedua panel surya selama enam hari pengujian. Dua hari pertama digunakan untuk pengujian tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc) tanpa menggunakan resistor beban. Pada hari kedua dilakukan pertukaran sensor INA219 antar panel untuk meminimalkan pengaruh bias sensor. Selanjutnya, pengujian berbeban dilakukan selama empat hari dengan menerapkan empat konfigurasi pertukaran sensor dan resistor beban sehingga setiap panel memperoleh kesempatan menggunakan seluruh sensor INA219 dan resistor beban secara seimbang.

Konfigurasi pertama merupakan konfigurasi awal pengujian. Konfigurasi kedua dilakukan dengan mempertukarkan posisi resistor beban pada kedua panel surya, sedangkan posisi sensor tetap. Konfigurasi ketiga dilakukan dengan mempertukarkan sensor INA219, sedangkan konfigurasi resistor beban dipertahankan. Konfigurasi keempat merupakan kombinasi akhir yang memastikan setiap panel telah menggunakan seluruh sensor dan resistor beban dalam jumlah yang sama selama penelitian.

Tabel 3. 1 Tabel Konfigurasi Pengujian

Hari Pengujian	Panel Tanpa	Panel Heatsink
Hari ke-1	Sensor 1	Sensor 2
Hari ke-2	Sensor 2	Sensor 1
Hari ke-3	Sensor 1, Beban A	Sensor 2, Beban B
Hari ke-4	Sensor 1, Beban B	Sensor 2, Beban A
Hari ke-5	Sensor 2, Beban B	Sensor 1, Beban A

Hari ke-6	Sensor 2, Beban A	Sensor 1, Beban B

Pada pengujian berbeban, pertukaran dilakukan terhadap sensor INA219 dan resistor beban sesuai konfigurasi yang telah ditentukan. Sementara itu, pada pengujian Open Circuit Voltage (Voc), pertukaran hanya dilakukan pada sensor INA219 karena pengujian dilaksanakan tanpa menggunakan resistor beban. Metode pertukaran sensor dan beban tidak bertujuan menghasilkan nilai pengukuran yang identik pada setiap konfigurasi. Metode ini diterapkan untuk meminimalkan potensi bias pengukuran akibat perbedaan karakteristik sensor maupun resistor beban, sehingga hasil perbandingan kedua panel surya lebih merepresentasikan pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink. Selama proses pengujian, sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu permukaan panel surya, sedangkan sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus keluaran panel surya. Nilai daya keluaran panel surya dihitung berdasarkan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor INA219.

Seluruh data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 dan dikirim melalui jaringan WiFi menuju platform IoTKita sebagai media penyimpanan dan pemantauan data. Data pengukuran dapat dipantau secara real-time melalui perangkat smartphone, laptop, maupun komputer menggunakan aplikasi atau halaman web IoTKita.

3.4.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan secara otomatis menggunakan sistem pengukuran berbasis ESP32 dengan interval pencatatan setiap 5 menit. Parameter yang diamati meliputi suhu panel surya, tegangan keluaran, arus keluaran, dan daya keluaran panel surya.

Pengambilan data dilakukan setiap hari mulai pukul 08.00 WIB hingga 16.00 WIB pada seluruh konfigurasi pengujian yang telah ditentukan. Data hasil pengujian Open Circuit Voltage (Voc) diperoleh dari dua hari pengujian dengan konfigurasi pertukaran sensor, sedangkan data tegangan keluaran (Vmp), arus keluaran (Imp), dan daya keluaran diperoleh dari empat hari pengujian berbeban dengan konfigurasi pertukaran sensor dan resistor beban. Data dari masing-masing jenis pengujian kemudian diolah dan dianalisis sesuai parameter yang diamati untuk

membandingkan performa panel surya tanpa sistem pendingin pasif heatsink dengan panel surya yang menggunakan sistem pendingin pasif heatsink.

Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap suhu kerja, tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP.

3.5 Parameter Penelitian

Parameter penelitian digunakan untuk mengukur dan mengevaluasi pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap kinerja panel surya monokristalin 20 WP. Parameter yang diamati selama proses pengujian meliputi suhu panel surya, tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc), tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp), arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp), dan daya keluaran panel surya. Masing-masing parameter diukur menggunakan sistem pengukuran berbasis ESP32 sesuai dengan konfigurasi pengujian yang telah ditetapkan.

Tabel 3. 2 Parameter Penelitian

Parameter	Satuan	Instrumen Pengukuran	Keterangan
Suhu Panel Surya	Celcius (°C)	DS18B20	Suhu panel surya yang diukur pada bagian belakang panel selama proses pengujian berlangsung.
Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)	Volt (V)	INA219	Tegangan DC yang dihasilkan panel surya selama proses pengujian.
Tegangan Rangkaian Tertutup (Vmp)	Volt (V)	INA219	Tegangan DC yang dihasilkan panel surya selama proses pengujian.

Arus Keluaran	Ampere (A)	INA219	Arus DC yang dihasilkan panel surya selama proses pengujian.
Daya Keluaran	Watt (P)	INA219	Daya keluaran panel surya yang dihasilkan selama proses pengujian.

3.6 Teknik Analisa Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara kuantitatif untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap suhu panel surya, tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc), tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp), arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp), dan daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP. Analisis dilakukan berdasarkan dua jenis pengujian, yaitu pengujian Open Circuit Voltage (Voc) tanpa beban selama dua hari serta pengujian berbeban selama empat hari untuk memperoleh data Vmp, Imp, dan daya keluaran panel surya. Metode pertukaran sensor dan beban diterapkan sesuai dengan konfigurasi pengujian untuk meminimalkan pengaruh karakteristik sensor maupun resistor beban sehingga hasil perbandingan performa kedua panel surya memiliki tingkat keandalan yang lebih baik.

3.6.1 Analisis Suhu Panel Surya

Analisis suhu dilakukan dengan membandingkan data suhu panel surya A (tanpa sistem pendingin pasif heatsink) dan panel surya B (menggunakan sistem pendingin pasif heatsink) pada setiap interval pengambilan data. Selanjutnya, data suhu dari seluruh konfigurasi pengujian berbeban dianalisis untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap suhu kerja panel surya.

Selisih suhu kedua panel surya dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\Delta T = T_{\text{tanpa}} - T_{\text{heatsink}}$$

Keterangan :

ΔT = Selisih suhu panel surya (°C)

T_{tanpa} = Suhu panel tanpa heatsink (°C)

T_{heatsink} = Suhu panel dengan heatsink (°C)

3.6.2 Analisis Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)

Analisis tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc) dilakukan dengan membandingkan nilai Voc panel surya tanpa sistem pendingin pasif heatsink dan panel surya yang menggunakan sistem pendingin pasif heatsink pada kondisi tanpa beban. Data diperoleh dari dua hari pengujian dengan metode pertukaran sensor INA219 untuk meminimalkan pengaruh perbedaan karakteristik sensor terhadap hasil pengukuran.

Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap nilai Open Circuit Voltage (Voc) panel surya.

3.6.3 Analisis Tegangan Rangkaian Tertutup (Vmp)

Analisis tegangan keluaran dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp) panel surya tanpa sistem pendingin pasif heatsink dan panel surya yang menggunakan sistem pendingin pasif heatsink pada setiap konfigurasi pengujian berbeban. Selanjutnya, data tegangan keluaran dari seluruh konfigurasi pengujian berbeban dianalisis untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap tegangan keluaran panel surya.

Hasil analisis tegangan kemudian digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara perubahan suhu panel surya dengan perubahan tegangan keluaran selama proses pengujian.

3.6.4 Analisis Arus Keluaran

Analisis arus dilakukan dengan membandingkan nilai arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp) panel surya tanpa sistem pendingin pasif heatsink dan panel surya yang menggunakan sistem pendingin pasif heatsink pada setiap konfigurasi pengujian berbeban. Selanjutnya, data arus dari seluruh konfigurasi

pengujian berbeban dianalisis untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap karakteristik arus keluaran panel surya.

Hasil analisis digunakan untuk melihat perubahan arus keluaran yang terjadi selama proses pengujian sebagai salah satu parameter kinerja panel surya.

3.6.4 Analisis Daya Keluaran

Analisis daya dilakukan dengan membandingkan daya keluaran panel surya tanpa sistem pendingin pasif heatsink dan panel surya yang menggunakan sistem pendingin pasif heatsink pada setiap konfigurasi pengujian berbeban. Daya keluaran dihitung berdasarkan hasil perkalian antara tegangan keluaran dan arus keluaran panel surya menggunakan persamaan berikut :

$$P = V \times I$$

Keterangan:

P = Daya keluaran panel surya (W)

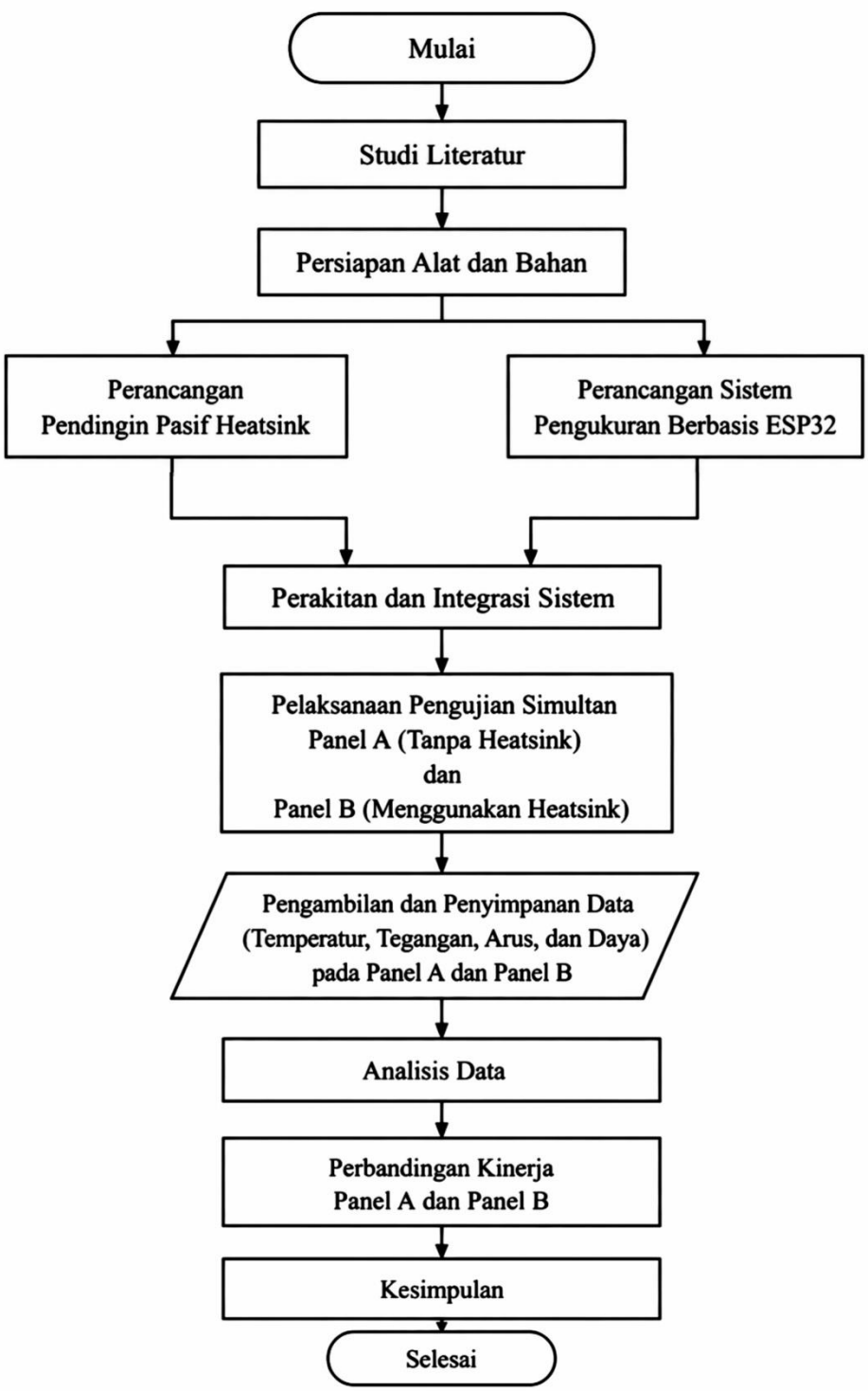
V = Tegangan rangkaian tertutup panel surya (V)

I = Arus keluaran panel surya (A)

Selanjutnya, data daya keluaran dari seluruh konfigurasi pengujian dianalisis untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem pendingin pasif heatsink terhadap daya keluaran panel surya. Persentase perubahan daya dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\textit{Perubahan Daya (\%)} = \frac{P_{heatsink} - P_{tanpa}}{P_{tanpa}} \times 100$$

3.7 Flowchart Penelitian



BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pelaksanaan Pengujian

Pelaksanaan pengujian dilakukan menggunakan dua panel surya monokristalin berkapasitas 20 WP yang dipasang pada lokasi dan orientasi yang sama sehingga memperoleh paparan sinar matahari dengan kondisi yang relatif seragam. Salah satu panel digunakan sebagai panel pembanding tanpa penambahan pendingin, sedangkan panel lainnya menggunakan pendingin pasif heatsink. Selama proses pengujian dilakukan pengukuran suhu, tegangan, arus, dan daya keluaran menggunakan sistem pengukuran berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan sensor DS18B20 dan INA219. Seluruh data hasil pengukuran kemudian dikirim dan direkam secara otomatis pada platform IoTKita sebagai media monitoring serta penyimpanan data untuk proses analisis.



Gambar 4. 1 Konfigurasi panel surya pada saat pelaksanaan pengujian.

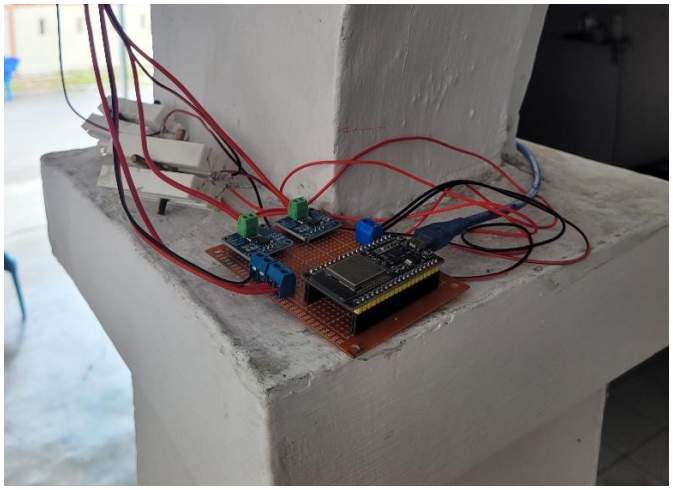
Kedua panel surya dipasang secara berdampingan pada area terbuka untuk memperoleh paparan sinar matahari secara langsung selama proses pengujian.

Penempatan kedua panel pada posisi yang berdekatan bertujuan untuk meminimalkan perbedaan kondisi lingkungan, seperti intensitas radiasi matahari,suhu udara, dan kecepatan angin. Dengan konfigurasi tersebut, perbandingan kinerja antara panel tanpa pendingin dan panel yang menggunakan pendingin pasif heatsink dapat dilakukan pada kondisi pengujian yang relatif sama.



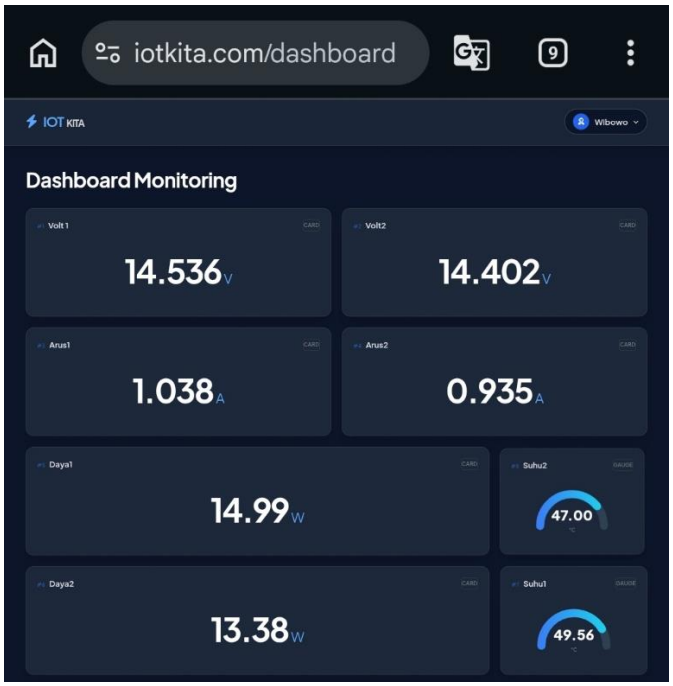
Gambar 4. 2 Pemasangan heatsink dan sensor DS18B20 pada bagian belakang panel surya.

Pendingin pasif heatsink dipasang pada bagian belakang salah satu panel surya menggunakan perekat termal agar perpindahan panas dari panel menuju heatsink dapat berlangsung dengan baik. Heatsink berfungsi membantu mempercepat pelepasan panas ke lingkungan sehingga temperatur panel dapat ditekan selama proses pengujian. Pada panel yang sama juga dipasang sensor DS18B20 untuk mengukur perubahan suhu panel secara langsung selama pengambilan data.



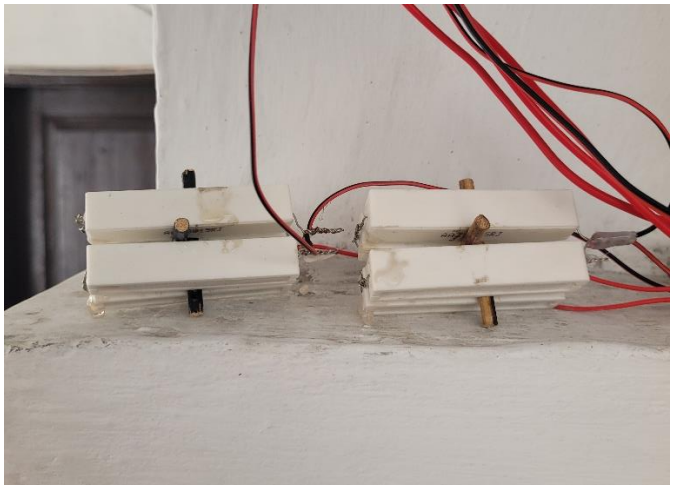
Gambar 4. 3 Sistem pengukuran berbasis ESP32.

Sistem pengukuran terdiri atas mikrokontroler ESP32 yang dihubungkan dengan dua sensor INA219 untuk mengukur tegangan dan arus keluaran masing-masing panel, serta dua sensor DS18B20 untuk mengukur suhu panel. Seluruh komponen dirangkai pada papan PCB sehingga membentuk sistem pengukuran yang ringkas dan mampu melakukan proses akuisisi data secara otomatis selama pengujian berlangsung.



Gambar 4. 4 Tampilan dashboard monitoring IoTKita.

Data hasil pengukuran yang diperoleh dari ESP32 ditampilkan secara real-time pada dashboard IoTKita. Dashboard menampilkan parameter suhu, tegangan, arus, dan daya keluaran dari masing-masing panel surya sehingga memudahkan proses pemantauan selama pengujian. Selain sebagai media monitoring, dashboard juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan data yang selanjutnya digunakan pada proses pengolahan dan analisis.



Gambar 4. 5 Beban resistif yang digunakan pada proses pengujian.

Pengujian dilakukan menggunakan beban resistif yang dipasang pada masing-masing panel surya. Penggunaan beban dengan spesifikasi yang sama bertujuan untuk menjaga keseragaman kondisi pembebanan sehingga hasil pengujian yang diperoleh lebih mencerminkan pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink dibandingkan perbedaan karakteristik beban.

4.2 Hasil Pengujian

Hasil pengujian pada penelitian ini diperoleh dari pengukuran parameter suhu, tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc), tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp), arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp), dan daya keluaran panel surya. Pengambilan data dilakukan sesuai dengan prosedur penelitian yang telah dijelaskan pada BAB III. Seluruh data hasil pengujian kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk tabel statistik serta grafik untuk mempermudah pengamatan terhadap kinerja panel surya tanpa pendingin dan panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink.

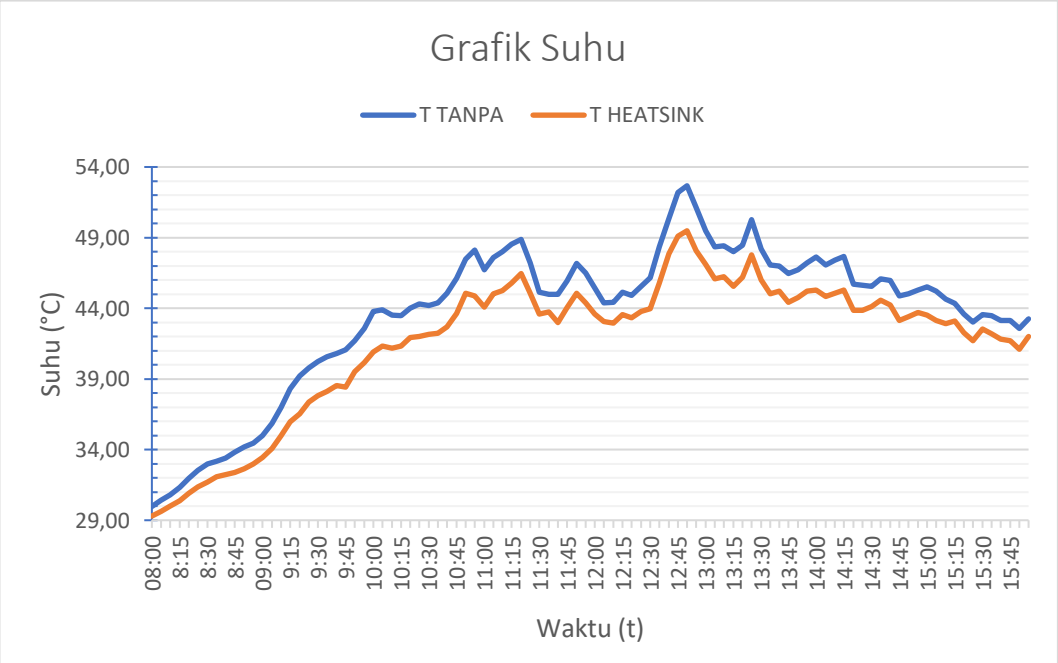
4.2.1 Hasil Pengujian Suhu Panel Surya

Pengujian suhu panel surya dilakukan untuk memperoleh data suhu kerja panel surya pada kondisi berbeban. Pengambilan data dilakukan selama empat hari dengan interval pencatatan setiap 5 menit menggunakan sensor suhu DS18B20 yang dipasang pada masing-masing panel surya. Data hasil pengukuran kemudian diolah sehingga diperoleh nilai rata-rata dari seluruh periode pengujian berbeban.

Tabel 4. 1 Statistik Suhu Panel Surya

Parameter	Panel Tanpa	Panel Heatsink
Rata-rata (°C)	43,61	41,65
Minimum (°C)	29,97	29,30
Maksimum (°C)	52,67	49,49

Tabel 4.1 menyajikan hasil statistik suhu panel surya berdasarkan data *Lampiran 8* meliputi nilai rata-rata, minimum, dan maksimum selama pengujian berbeban. Nilai statistik tersebut diperoleh dari hasil pengolahan data pengukuran menggunakan sensor DS18B20 yang dipasang pada masing-masing panel surya. Penyajian statistik ini memberikan gambaran umum mengenai karakteristik suhu panel surya selama pengujian



Gambar 4. 6 Grafik perbandingan suhu panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan heatsink

Berdasarkan data *Lampiran 8* Gambar 4.6 menunjukkan perubahan suhu panel surya tanpa pendingin dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink selama periode pengujian berbeban. Grafik menyajikan pola perubahan suhu berdasarkan hasil pengukuran sensor DS18B20 pada setiap waktu pengamatan.

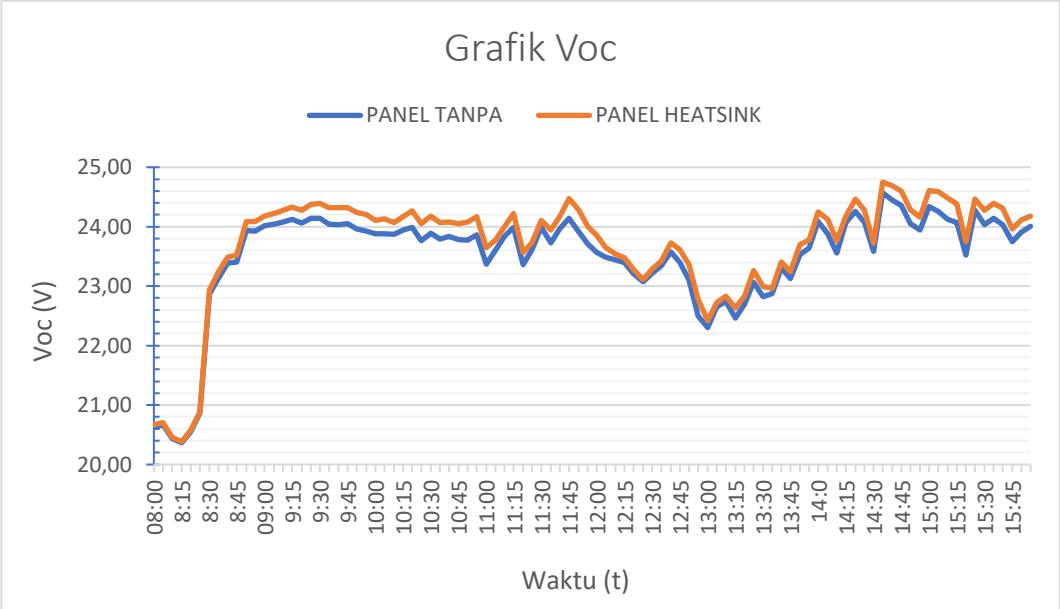
4.2.2 Hasil Pengujian Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)

Pengujian tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc) dilakukan untuk memperoleh karakteristik tegangan panel surya pada kondisi tanpa beban. Pengambilan data dilakukan selama dua hari dengan interval pencatatan setiap 5 menit. Pada hari kedua dilakukan pertukaran sensor pengukuran antar panel untuk meminimalkan pengaruh bias sensor, sehingga data yang disajikan merupakan nilai rata-rata dari kedua hari pengujian.

Tabel 4. 2 Statistik tegangan rangkaian terbuka (Voc) panel surya.

Parameter	Panel Tanpa	Panel Heatsink
Rata-rata (V)	23,50	23,69
Minimum (V)	2 0,37	20,39
Maksimum (V)	24,57	24,75

Tabel 4.2 menyajikan hasil statistik tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc) panel surya berdasarkan data *Lampiran 7* yang meliputi nilai rata-rata, minimum, dan maksimum selama pengujian tanpa beban. Nilai tersebut diperoleh dari hasil pengolahan data selama dua hari pengujian dengan metode pertukaran sensor pada hari kedua. Statistik ini digunakan sebagai dasar penyajian hasil pengukuran tegangan rangkaian terbuka sebelum dilakukan pembahasan lebih lanjut.



Gambar 4. 7 Grafik perbandingan tegangan rangkaian terbuka (Voc) panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink

Berdasarkan data *Lampiran 7* Gambar 4.7 menunjukkan perubahan nilai tegangan rangkaian terbuka (Voc) panel surya tanpa pendingin dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink selama periode pengujian. Grafik menyajikan pola perubahan tegangan hasil rata-rata pengukuran pada setiap waktu pengamatan.

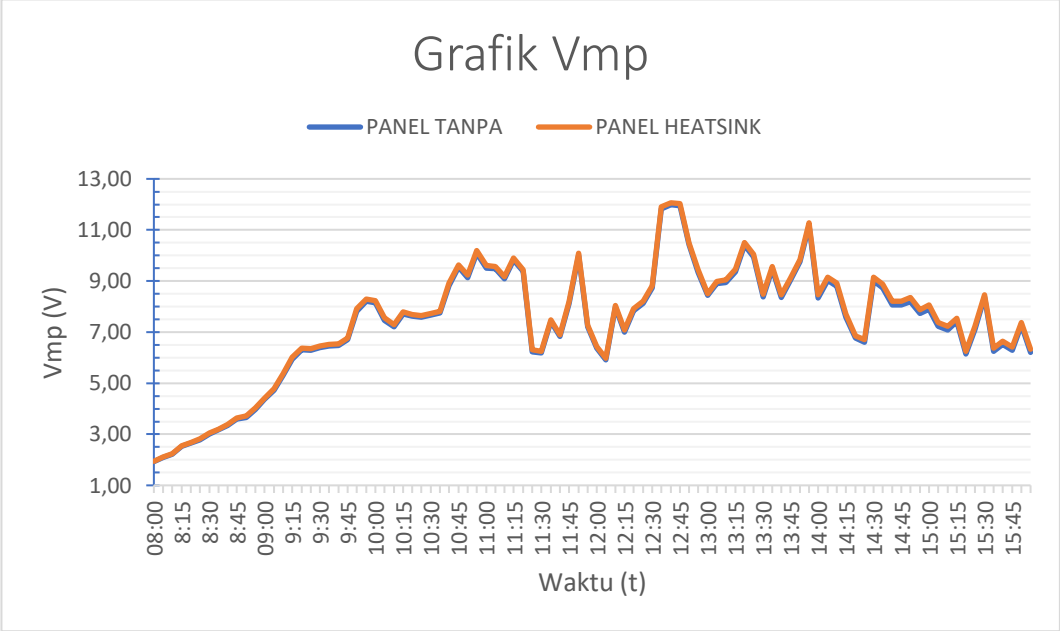
4.2.3 Hasil Pengujian Tegangan Keluaran (Vmp)

Pengujian tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp) dilakukan untuk memperoleh data tegangan kerja panel surya pada kondisi berbeban. Pengambilan data dilakukan selama empat hari dengan interval pencatatan setiap 5 menit. Selama pengujian diterapkan empat konfigurasi pertukaran sensor INA219 dan resistor beban untuk meminimalkan pengaruh perbedaan karakteristik instrumen terhadap hasil pengukuran, sehingga data yang disajikan merupakan nilai rata-rata dari seluruh konfigurasi pengujian berbeban.

Tabel 4. 3 Statistik tegangan rangkaian tertutup (Vmp).

Parameter	Panel Tanpa	Panel Heatsink
Rata-rata (V)	7,38	7,46
Minimum (V)	1,93	1,94
Maksimum (V)	11,99	12,06

Tabel 4.3 menyajikan hasil statistik tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp) panel surya selama pengujian berbeban berdasarkan data *Lampiran 8* yang meliputi nilai rata-rata, minimum, dan maksimum. Nilai statistik tersebut diperoleh dari hasil pengolahan data selama empat hari pengujian dengan empat konfigurasi pertukaran sensor INA219 dan resistor beban. Data ini memberikan gambaran umum mengenai karakteristik tegangan kerja panel surya selama pengujian.



Gambar 4. 8 Grafik perbandingan tegangan rangkaian tertutup (VMP) panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink

Berdasarkan data *Lampiran 8* Gambar 4.8 menunjukkan perubahan tegangan keluaran (Vmp) panel surya tanpa pendingin dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink selama periode pengujian berbeban. Grafik menyajikan pola perubahan tegangan berdasarkan hasil rata-rata pengukuran pada setiap waktu pengamatan.

4.2.4 Hasil Pengujian Arus Keluaran (Imp)

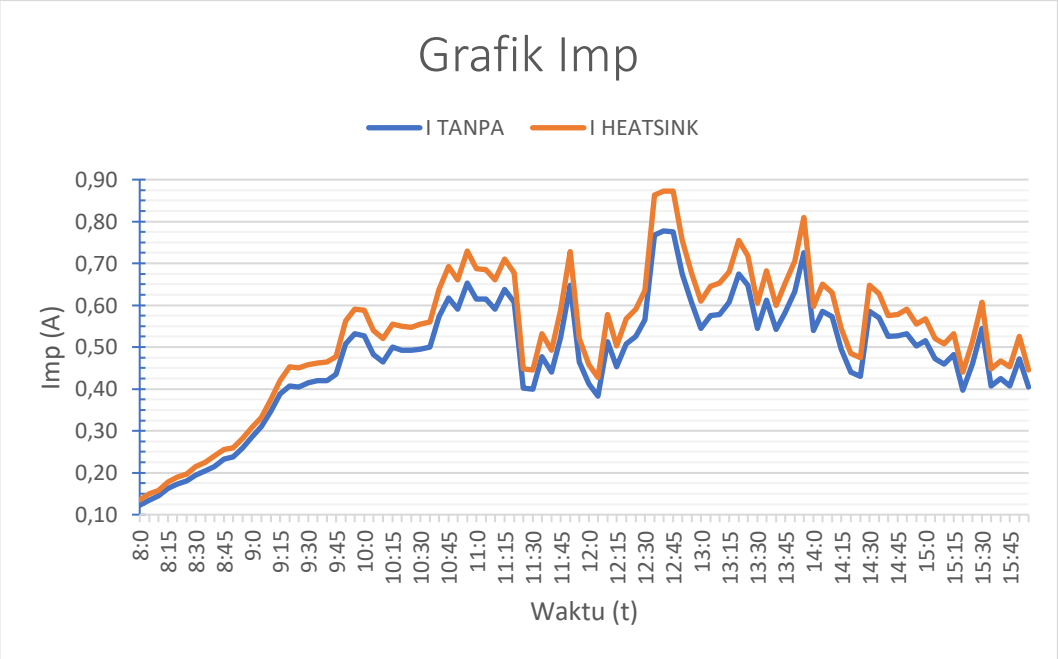
Pengujian arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp) dilakukan untuk memperoleh data arus kerja panel surya pada kondisi berbeban. Pengambilan data dilakukan selama empat hari dengan interval pencatatan setiap 5 menit. Selama

pengujian diterapkan empat konfigurasi pertukaran sensor INA219 dan resistor beban untuk meminimalkan pengaruh perbedaan karakteristik instrumen terhadap hasil pengukuran, sehingga data yang disajikan merupakan nilai rata-rata dari seluruh konfigurasi pengujian berbeban.

Tabel 4. 4 Statistik arus rangkaian tertutup (Imp)

Parameter	Panel Tanpa	Panel Heatsink
Rata-rata (I)	0,48	0,53
Minimum (I)	0,12	0,14
Maksimum (I)	0,78	0,87

Tabel 4.4 menyajikan hasil statistik arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp) panel surya selama pengujian berbeban berdasarkan data *Lampiran 8* yang meliputi nilai rata-rata, minimum, dan maksimum. Nilai te rsebut diperoleh dari hasil pengolahan data selama empat hari pengujian dengan empat konfigurasi pertukaran sensor INA219 dan resistor beban. Statistik ini digunakan untuk memberikan gambaran umum mengenai hasil pengukuran arus keluaran panel surya.



Gambar 4. 9 Grafik perbandingan arus rangkaian tertutup (Imp) panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink

Berdasarkan data *Lampiran 8* Gambar 4.9 menunjukkan perubahan arus keluaran (Imp) panel surya tanpa pendingin dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink selama periode pengujian berbeban. Grafik memperlihatkan pola perubahan arus berdasarkan hasil rata-rata pengukuran pada setiap waktu pengamatan.

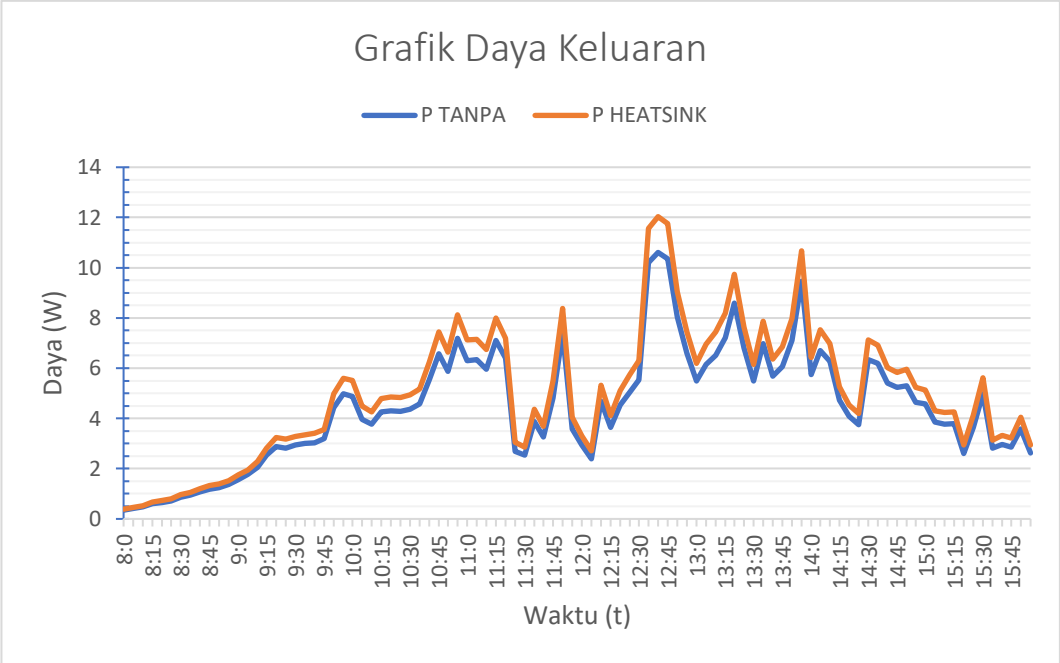
4.2.5 Hasil Pengujian Daya Keluaran Panel Surya

Pengujian daya keluaran panel surya dilakukan untuk memperoleh data daya yang dihasilkan panel surya pada kondisi berbeban. Pengambilan data dilakukan selama empat hari dengan interval pencatatan setiap 5 menit. Selama pengujian diterapkan empat konfigurasi pertukaran sensor INA219 dan resistor beban untuk meminimalkan pengaruh perbedaan karakteristik instrumen terhadap hasil pengukuran, sehingga data yang disajikan merupakan nilai rata-rata dari seluruh konfigurasi pengujian berbeban.

Tabel 4. 5 Statistik Daya keluaran Panel surya

Parameter	Panel Tanpa	Panel Heatsink
Rata-rata (W)	4,45	5,02
Minimum (W)	0,35	0,39
Maksimum (W)	10,61	12,03

Tabel 4.5 menyajikan hasil statistik daya keluaran panel surya selama pengujian berbeban berdasarkan data *Lampiran 8* yang meliputi nilai rata-rata, minimum, dan maksimum. Nilai tersebut diperoleh dari hasil pengolahan data selama empat hari pengujian dengan empat konfigurasi pertukaran sensor INA219 dan resistor beban. Statistik ini digunakan sebagai ringkasan hasil pengukuran daya keluaran panel surya sebelum dilakukan pembahasan lebih lanjut.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan daya keluaran panel surya tanpa heatsink dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink

Berdasarkan data *Lampiran 8* Gambar 4.10 menunjukkan perubahan daya keluaran panel surya tanpa pendingin dan panel surya dengan pendingin pasif heatsink selama periode pengujian berbeban. Grafik menyajikan pola perubahan daya berdasarkan hasil rata-rata pengukuran pada setiap waktu pengamatan..

4.3 Pembahasan Hasil Penelitian

Pembahasan hasil penelitian dilakukan untuk menjawab rumusan masalah berdasarkan hasil pengujian yang telah disajikan pada subbab sebelumnya. Pembahasan difokuskan pada analisis pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap suhu kerja panel surya monokristalin 20 WP, serta pengaruh penurunan suhu tersebut terhadap karakteristik listrik panel surya yang meliputi tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc), tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp), arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp), dan daya keluaran panel surya.

4.3.1 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Suhu Panel Surya

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.1, panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink memiliki suhu rata-rata sebesar 41,65°C,

sedangkan panel surya tanpa pendingin memiliki suhu rata-rata sebesar 43,61°C. Penggunaan pendingin pasif heatsink menghasilkan penurunan suhu rata-rata sebesar 1,96°C atau sekitar 4,49% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Selain itu, suhu maksimum panel surya dengan pendingin pasif heatsink sebesar 49,49°C, lebih rendah dibandingkan panel surya tanpa pendingin yang mencapai 52,67°C. Sementara itu, suhu minimum yang diperoleh kedua panel relatif tidak berbeda, yaitu 29,30°C pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink dan 29,97°C pada panel surya tanpa pendingin. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink berpengaruh terhadap penurunan suhu kerja panel surya selama pengujian berlangsung.

Penurunan suhu tersebut terjadi karena heatsink berfungsi sebagai media pelepasan panas dari permukaan belakang panel surya ke lingkungan. Panas yang dihasilkan oleh sel surya dihantarkan menuju heatsink melalui mekanisme konduksi, kemudian dilepaskan ke udara melalui proses konveksi alami. Keberadaan sirip-sirip pada heatsink memperbesar luas permukaan perpindahan panas sehingga laju pelepasan kalor ke udara menjadi lebih efektif dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Dengan demikian, akumulasi panas pada panel dapat dikurangi sehingga suhu kerja panel surya dapat dipertahankan pada nilai yang lebih rendah.

Penurunan suhu rata-rata sebesar 1,96°C menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink memberikan pengaruh terhadap kondisi termal panel surya selama pengujian. Kondisi termal tersebut diperkirakan memengaruhi karakteristik listrik panel surya, karena temperatur kerja panel merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya. Oleh karena itu, hubungan antara penurunan suhu dengan perubahan karakteristik listrik panel surya akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.3.2 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.2, panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink memiliki nilai rata-rata tegangan rangkaian terbuka (Open Circuit Voltage/Voc) sebesar 23,69 V, sedangkan panel surya tanpa pendingin memiliki nilai rata-rata sebesar 23,50 V. Penggunaan pendingin pasif

heatsink menghasilkan peningkatan nilai rata-rata Voc sebesar 0,19 V atau sekitar 0,81% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Selain itu, nilai maksimum Voc pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink mencapai 24,75 V, sedangkan pada panel surya tanpa pendingin sebesar 24,57 V. Sementara itu, nilai minimum Voc pada kedua panel relatif hampir sama, yaitu 20,39 V pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink dan 20,37 V pada panel surya tanpa pendingin.

Peningkatan nilai Voc menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink memberikan pengaruh terhadap karakteristik tegangan rangkaian terbuka panel surya. Pada kondisi tanpa beban, nilai Voc merupakan salah satu parameter yang sensitif terhadap perubahan temperatur sel surya. Secara umum, temperatur kerja panel yang lebih rendah cenderung menghasilkan nilai Voc yang lebih tinggi, sedangkan peningkatan temperatur menyebabkan nilai Voc menurun. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink memiliki nilai Voc yang lebih tinggi dibandingkan panel surya tanpa pendingin.

Secara keseluruhan, penggunaan pendingin pasif heatsink meningkatkan nilai rata-rata Voc sebesar 0,19 V atau sekitar 0,81% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Peningkatan tegangan rangkaian terbuka tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik tegangan panel surya pada kondisi tanpa beban. Namun, karena panel surya pada umumnya beroperasi dalam kondisi berbeban, diperlukan analisis lebih lanjut terhadap tegangan kerja panel (Voltage at Maximum Power/Vmp), yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

4.3.3 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Tegangan Keluaran (Vmp)

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.3, panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink memiliki nilai rata-rata tegangan keluaran (Voltage at Maximum Power/Vmp) sebesar 7,46 V, sedangkan panel surya tanpa pendingin memiliki nilai rata-rata sebesar 7,38 V. Penggunaan pendingin pasif heatsink menghasilkan peningkatan nilai rata-rata Vmp sebesar 0,08 V atau sekitar 1,08% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Selain itu, nilai maksimum Vmp pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink mencapai 12,06 V, sedangkan pada panel surya tanpa pendingin sebesar 11,99 V. Sementara itu, nilai minimum

Vmp pada kedua panel relatif tidak berbeda, yaitu 1,94 V pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink dan 1,93 V pada panel surya tanpa pendingin.

Peningkatan nilai Vmp menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink tidak hanya memengaruhi tegangan rangkaian terbuka (Voc), tetapi juga tegangan kerja panel surya pada kondisi berbeban. Selama pengujian, panel surya dengan temperatur kerja yang lebih rendah mampu mempertahankan nilai tegangan keluaran yang lebih tinggi dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan temperatur berpengaruh terhadap kemampuan panel dalam menghasilkan tegangan saat menyalurkan daya ke beban.

Perbedaan peningkatan Vmp dibandingkan Voc dipengaruhi oleh kondisi operasi panel surya. Pengukuran Voc dilakukan pada kondisi tanpa beban, sedangkan Vmp diperoleh ketika panel bekerja pada titik daya maksimum dengan beban yang terhubung. Pada kondisi tersebut, tegangan keluaran dipengaruhi oleh temperatur sel surya serta karakteristik beban yang digunakan selama pengujian. Oleh karena itu, meskipun peningkatan Vmp tidak terlalu besar, nilai tersebut menunjukkan bahwa pendingin pasif heatsink tetap memberikan pengaruh terhadap tegangan kerja panel surya.

Secara keseluruhan, penggunaan pendingin pasif heatsink meningkatkan nilai rata-rata Vmp sebesar 0,08 V atau sekitar 1,08% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Peningkatan tegangan kerja ini menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan daya keluaran panel surya. Namun, besarnya daya yang dihasilkan tidak hanya dipengaruhi oleh tegangan, tetapi juga oleh arus keluaran panel surya. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya difokuskan pada pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp).

4.3.4 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Arus Keluaran (Imp)

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.4, panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink memiliki nilai rata-rata arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp) sebesar 0,53 A, sedangkan panel surya tanpa pendingin memiliki nilai rata-rata sebesar 0,48 A. Penggunaan pendingin pasif heatsink menghasilkan peningkatan nilai rata-rata Imp sebesar 0,05 A atau sekitar 10,42% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Selain itu, nilai maksimum Imp

pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink mencapai 0,87 A, sedangkan pada panel surya tanpa pendingin sebesar 0,78 A. Sementara itu, nilai minimum Imp pada kedua panel relatif tidak berbeda, yaitu 0,14 A pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink dan 0,12 A pada panel surya tanpa pendingin.

Peningkatan nilai Imp menunjukkan bahwa panel surya dengan pendingin pasif heatsink mampu menghasilkan arus keluaran yang lebih besar selama pengujian berbeban. Pada kondisi pengujian yang sama, panel surya dengan temperatur kerja yang lebih rendah menghasilkan nilai arus rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penurunan temperatur kerja panel berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan panel dalam menyalurkan arus ke beban.

Selain dipengaruhi oleh temperatur kerja panel, besarnya arus keluaran juga dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang diterima panel surya. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan dua panel surya yang diuji secara bersamaan serta menerapkan pertukaran sensor dan beban pada setiap konfigurasi pengujian untuk meminimalkan pengaruh perbedaan kondisi pengujian. Dengan pendekatan tersebut, perbedaan nilai Imp yang diperoleh lebih merepresentasikan pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap kinerja panel surya.

Secara keseluruhan, penggunaan pendingin pasif heatsink meningkatkan nilai rata-rata Imp sebesar 0,05 A atau sekitar 10,42% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Peningkatan arus keluaran tersebut, bersama dengan peningkatan tegangan kerja (Vmp), berkontribusi terhadap peningkatan daya keluaran panel surya. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya difokuskan pada pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap daya keluaran panel surya sebagai parameter utama dalam penelitian ini.

4.3.5 Pengaruh Pendingin Pasif Heatsink terhadap Daya Keluaran Panel Surya

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4.5, panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink memiliki nilai rata-rata daya keluaran sebesar 5,02 W, sedangkan panel surya tanpa pendingin memiliki nilai rata-rata sebesar 4,45 W. Penggunaan pendingin pasif heatsink menghasilkan peningkatan daya keluaran rata-rata sebesar 0,57 W atau sekitar 12,81% dibandingkan panel

surya tanpa pendingin. Selain itu, daya keluaran maksimum pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink mencapai 12,03 W, sedangkan pada panel surya tanpa pendingin sebesar 10,61 W. Sementara itu, daya keluaran minimum pada kedua panel relatif tidak berbeda, yaitu 0,39 W pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink dan 0,35 W pada panel surya tanpa pendingin.

Peningkatan daya keluaran tersebut merupakan hasil dari peningkatan tegangan kerja (Voltage at Maximum Power/Vmp) dan arus keluaran (Current at Maximum Power/Imp) pada panel surya yang menggunakan pendingin pasif heatsink. Selama pengujian, panel surya dengan temperatur kerja yang lebih rendah mampu mempertahankan nilai Vmp dan Imp yang lebih tinggi dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Kondisi tersebut menyebabkan daya listrik yang dihasilkan panel surya dengan pendingin pasif heatsink lebih besar dibandingkan panel surya tanpa pendingin.

Hasil pembahasan pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink menurunkan suhu rata-rata panel surya sebesar 1,96°C atau sekitar 4,49%, diikuti dengan peningkatan nilai rata-rata Voc sebesar 0,19 V (0,81%), peningkatan Vmp sebesar 0,08 V (1,08%), serta peningkatan Imp sebesar 0,05 A (10,42%). Perubahan pada parameter-parameter tersebut berkontribusi terhadap peningkatan daya keluaran panel surya selama pengujian. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara penurunan temperatur kerja panel surya dengan peningkatan karakteristik listrik yang dihasilkan.

Secara keseluruhan, penggunaan pendingin pasif heatsink meningkatkan daya keluaran rata-rata panel surya sebesar 0,57 W atau sekitar 12,81% dibandingkan panel surya tanpa pendingin. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pendingin pasif heatsink memberikan pengaruh positif terhadap kinerja panel surya monokristalin 20 WP pada kondisi pengujian yang dilakukan. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap optimasi daya keluaran panel surya telah tercapai berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh penggunaan pendingin pasif heatsink terhadap kinerja panel surya monokristalin 20 WP dengan sistem pengukuran berbasis ESP32, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penggunaan pendingin pasif heatsink mampu menurunkan suhu kerja panel surya monokristalin 20 WP. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya dengan pendingin pasif heatsink memiliki suhu rata-rata sebesar 41,65°C, sedangkan panel surya tanpa pendingin memiliki suhu rata-rata sebesar 43,61°C, sehingga terjadi penurunan suhu sebesar 1,96°C atau sekitar 4,49%.
2. Penggunaan pendingin pasif heatsink meningkatkan karakteristik listrik panel surya pada seluruh parameter yang diukur. Nilai rata-rata tegangan rangkaian terbuka (Voc) meningkat dari 23,50 V menjadi 23,69 V atau sebesar 0,19 V (0,81%). Nilai rata-rata tegangan kerja (Vmp) meningkat dari 7,38 V menjadi 7,46 V atau sebesar 0,08 V (1,08%). Selain itu, nilai rata-rata arus keluaran (Imp) meningkat dari 0,48 A menjadi 0,53 A atau sebesar 0,05 A (10,42%).
3. Penggunaan pendingin pasif heatsink mampu meningkatkan daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya rata-rata meningkat dari 4,45 W pada panel surya tanpa pendingin menjadi 5,02 W pada panel surya dengan pendingin pasif heatsink, sehingga terjadi peningkatan daya sebesar 0,57 W atau sekitar 12,81%. Dengan demikian, penggunaan pendingin pasif heatsink memberikan pengaruh positif terhadap optimasi daya keluaran panel surya monokristalin 20 WP pada kondisi pengujian yang dilakukan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Menggunakan panel surya dengan kapasitas yang lebih besar untuk mengetahui efektivitas pendingin pasif heatsink pada berbagai tingkat daya panel surya.

2. Mengembangkan desain pendingin pasif heatsink dengan variasi dimensi, jumlah sirip, maupun jenis material untuk memperoleh kemampuan pelepasan panas yang lebih optimal.
3. Menambahkan sensor intensitas radiasi matahari (irradiance sensor) sehingga hubungan antara intensitas penyinaran, temperatur panel, dan daya keluaran dapat dianalisis dengan lebih komprehensif.
4. Melakukan pengujian pada kondisi cuaca dan musim yang berbeda agar diperoleh data yang lebih bervariasi serta dapat menggambarkan kinerja pendingin pasif heatsink pada berbagai kondisi operasi.
5. Membandingkan metode pendinginan pasif heatsink dengan metode pendinginan lainnya, seperti pendinginan aktif atau penggunaan Phase Change Material (PCM), untuk mengetahui metode yang paling efektif dalam meningkatkan daya keluaran panel surya.

DAFTAR PUSTAKA

Agyekum, E. B., Praveenkumar, S., & Alwan, N. T. (2021). Effect of dual surface cooling of solar PV panel on the efficiency of the module: Experimental investigation. Heliyon, 7, e07920. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07920

Al-Masalha, I., Masuri, S. U. B., Badran, O., Mohd Ariffin, M. K. A., Abu Talib, A. R., & Alfaqs, F. (2023). Theoretical and experimental study on the performance of photovoltaic using porous media cooling under indoor condition. International Journal of Renewable Energy Development, 12(2), 313–327. https://doi.org/10.14710/ijred.2023.47686

Choifin, M., Perdana, D., & Ningsih, W. L. (2025). Efektivitas penambahan heat sink aluminium pada panel surya untuk optimalisasi pemanfaatan energi terbarukan. Jurnal Ilmiah Momentum, 21(2), 21–27.

Elminshawy, N. A. S., El-Damhogi, D. G., Ibrahim, I. A., Elminshawy, A., & Osama, A. (2022). Assessment of floating photovoltaic productivity with fins-assisted passive cooling. Applied Energy, 325, 119810. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119810

Efendi, M. S., & Nofendri, Y. (2024). *Pengaruh Pendinginan terhadap Daya Keluaran dan Efisiensi Sistem Panel Surya*. *3*, 67–73.

Evalina, N., Susilo, J., Amiruddin, A., & Harahap, P. (2024). Perancangan sistem monitoring suhu dan getaran pada bearing motor induksi berbasis HMI. RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro, 6(2), 135–139. https://doi.org/10.30596/rele.v6i1.17197

Green, M. A., Bothe, K., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Siefer, G., Hao, X., & Kopidakis, N. (2023). *Solar cell efficiency tables (version 62)*. *May*, 651–663. https://doi.org/10.1002/pip.3726

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

Hudis, S. V., & Chereches, N. C. (2021). *applied sciences Enhancement of PV Panel Power Production by Passive Cooling Using Heat Sinks with Perforated Fins*.

Ibrahim, A., Raafat, M., Abd, R., Monem, E. L., Muhammad, K., & Ibrahim, A. (2023). A comprehensive study for - Al 2 O 3 nanofluid cooling effect on the electrical and thermal properties of polycrystalline solar panels in outdoor conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(49), 106838–106859. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25928-3

Irwanto, M., Sihombing, P., & Pasaribu, F. I. (2022). Analysis of solar radiation against solar panel 50 WP. Journal of Electronics, Telecommunication, Electrical, and Physics Sciences (ETAPs), 1(2), 32–40.

Masalha, I., Badran, O., & Alahmer, A. (2025). *Performance Enhancement of Photovoltaic Panels Using Natural Porous Media for Thermal Cooling Management*. 1–32.

Mesin, J. T., Sains, F., & Belitung, U. B. (2024). *36 Forestico , Abraham Sahat Salano , dkk . ; Pengaruh Pendinginan Panel Surya Terhadap Efisiensi Daya Keluaran 37 Aris , M . Zainul , dkk ; Pengaruh Variasi Temperatur Torefaksi terhadap Karakteristik dan Nilai Kalor Dari Produk Briket Arang Enceng Gondok*. *10*(1), 36–40.

Munazzar, S., & Saputra, R. (2026). *Implementation of DS18B20 Temperature Sensor In Esp32 And I2C LCD Based Iot Monitoring System For Mechatronics*. *5*(1), 5–13.

Muqorrobin, Z. P., Nawawi, A., Ardani, A. A., & Setia, S. P. (2024). *Off-grid Solar System Monitoring Based on ESP-32 and INA219 in Pesanggrahan Gordomulyo*. *1*(2), 26–37. https://doi.org/10.26740/vubeta.v1i2.34859

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.

Novitasari, A. J., Dionova, B. W., Jaenul, A., & Irsyad, M. (2025). *OPTIMIZATION OF PHOTOVOLTAIC COOLING SYSTEM PERFORMANCE : A COMPARISON REVIEW OF ACTIVE , PASSIVE AND COMBINED METHODS*. *3*, 149–158. https://doi.org/10.14710/transmisi.27.3.149-158

Raza, S., Farooq, A., Shehzad, M. S., Hussain, W., Abbas, Z., & Im, I. (2026). *A CFD analysis of photovoltaic panel cooling : a review*.

Shaik, F., Lingala, S. S., & Veeraboina, P. (2023). *Effect of various parameters on*

the performance of solar PV power plant : a review and the experimental study.

Technology, I., & Science, C. (2024). *No Title*. *7*, 550–556.

Yulia, D., Julian, J., Wahyuni, F., & Daris, R. (2023). *Comparative analysis of solar panel output power with variations of Heatsink type cooling systems*. *8*(2), 113–126. https://doi.org/10.22219/jemmme.v8i2.30152

Krstic, M., Pantic, L., Djordjevic, S., Radonjic, I., Begovic, V., Radovanovic, B., & Mancic, M. (2024). Passive cooling of photovoltaic panel by aluminum heat sinks and numerical simulation. Ain Shams Engineering Journal, 15, 102330. https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102330

Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K. J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. Science of the Total Environment, 754, 141989. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989

Ramkiran, B., Sundarabalan, C. K., & Sudhakar, K. (2021). Sustainable passive cooling strategy for PV module: A comparative analysis. Case Studies in Thermal Engineering, 27, 101317. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101317

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.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Raw Data Voc dan Suhu Tanggal 19 Juli 2026

Waktu	Voc Tanpa	Voc Heatsink	T Tanpa	T Heatsink
19/7-08:00	19,67	19,72	24,88	24,94
19/7-08:05	19,66	19,71	24,94	25
19/7-08:10	19,58	19,63	24,94	25
19/7-08:15	19,66	19,71	24,94	25
19/7-08:20	19,67	19,72	24,88	24,94
19/7-08:25	19,61	19,66	24,88	24,94
19/7-08:30	24,05	24,21	31	29
19/7-08:35	24,11	24,30	33,88	31,81
19/7-08:40	24,09	24,26	34,81	32,81
19/7-08:45	24,16	24,34	35,50	33,44
19/7-08:50	24,10	24,30	36,56	34,19
19/7-08:55	24,02	24,22	37,44	34,75
19/7-09:00	24,08	24,28	37,88	34,88
19/7-09:05	24,10	24,30	38,19	35,13
19/7-09:10	24,15	24,38	38,94	35,44
19/7-09:15	24,14	24,38	39,69	35,81
19/7-09:20	24,04	24,27	40,31	36,56
19/7-09:25	24,19	24,44	41,31	37,38
19/7-09:30	24,27	24,55	42,81	38,50
19/7-09:35	24,23	24,60	46,31	41,38
19/7-09:40	24,11	24,52	49,50	43,06
19/7-09:45	24,08	24,45	51	44,69
19/7-09:50	23,98	24,34	52,44	46,19
19/7-09:55	23,91	24,28	54,44	47,19
19/7-10:00	23,96	24,30	55,44	48,06
19/7-10:05	23,92	24,31	55,69	47,75
19/7-10:10	23,96	24,24	54,75	49,44
19/7-10:15	23,96	24,30	55,31	48,31
19/7-10:20	23,99	24,38	55,94	47,56
19/7-10:25	23,90	24,32	57,19	49,13
19/7-10:30	23,84	24,30	58,13	49,31
19/7-10:35	23,84	24,27	58,94	51
19/7-10:40	23,82	24,18	59,06	53,13
19/7-10:45	23,76	24,18	60,19	54,63
19/7-10:50	23,79	24,27	61,88	53,69
19/7-10:55	23,64	24,10	62,25	53,81
19/7-11:00	22,81	23,18	59,63	51,31

19/7-11:05	23,21	23,35	52,81	46,19
19/7-11:10	23,75	23,89	49,50	44,63
19/7-11:15	24,16	24,47	52,13	47,50
19/7-11:20	22,88	23,15	53,19	48,06
19/7-11:25	23,20	23,25	48	45
19/7-11:30	23,81	23,82	43,94	43,31
19/7-11:35	23,40	23,58	46,19	45,38
19/7-11:40	23,87	24,01	46	44,75
19/7-11:45	24,16	24,52	50,56	48,75
19/7-11:50	23,85	24,27	56,13	52,88
19/7-11:55	23,40	23,66	54,94	51,13
19/7-12:00	23,35	23,55	52,69	49,44
19/7-12:05	23,49	23,56	47,25	45,25
19/7-12:10	23,10	23,12	44	42,69
19/7-12:15	23,02	23,04	41,31	40,25
19/7-12:20	22,75	22,76	39,19	38,31
19/7-12:25	22,60	22,59	37,50	37,19
19/7-12:30	22,59	22,60	36,13	35,75
19/7-12:35	22,74	22,76	35,44	35
19/7-12:40	22,80	22,85	35,25	34,81
19/7-12:45	22,88	22,92	34,88	34,56
19/7-12:50	22,26	22,30	34,75	34,44
19/7-12:55	21,79	21,80	34,31	33,81
19/7-13:00	21,58	21,61	33,75	33,19
19/7-13:05	21,67	21,70	33,38	32,81
19/7-13:10	21,29	21,28	32,81	32,56
19/7-13:15	21,07	21,06	32,38	32,06
19/7-13:20	21,43	21,43	32,06	31,75
19/7-13:25	22,12	22,10	30,31	30,06
19/7-13:30	21,68	21,66	29,13	29,13
19/7-13:35	22,17	22,18	28,50	28,63
19/7-13:40	22,68	22,71	28,81	28,63
19/7-13:45	22,66	22,70	28,50	27,63
19/7-13:50	23,13	23,18	28,63	27,56
19/7-13:55	23,46	23,52	28,38	27,25
19/7-14:00	23,73	23,81	29	27,75
19/7-14:05	23,72	23,82	29,63	28,13
19/7-14:10	23,84	23,94	30,19	28,81
19/7-14:15	24,06	24,14	30,25	29,19
19/7-14:20	24,12	24,21	30,75	29,44
19/7-14:25	24,22	24,32	31	29,88
19/7-14:30	24,32	24,44	32	30,63
19/7-14:35	24,99	25,22	34,88	33,63

19/7-14:40	24,74	25,02	39,25	38,25
19/7-14:45	24,70	24,94	39,63	37,88
19/7-14:50	24,77	25,07	42	39,75
19/7-14:55	24,23	24,54	44,13	41,44
19/7-15:00	24,49	24,85	45,75	43,38
19/7-15:05	24,22	24,59	48,69	45,94
19/7-15:10	24,16	24,49	49,19	47,25
19/7-15:15	24,16	24,44	49,69	48
19/7-15:20	23,80	23,98	47,81	46,63
19/7-15:25	24,38	24,56	46,25	45,88
19/7-15:30	24,09	24,36	48,81	48,31
19/7-15:35	24,10	24,36	49,13	48,25
19/7-15:40	23,98	24,25	49,44	48,38
19/7-15:45	23,95	24,13	48,56	47,63
19/7-15:50	23,70	23,84	45,81	45,38
19/7-15:55	23,88	23,97	42,88	42,50

Lampiran 2 : Raw Data Voc dan Suhu Tanggal 20 Juli 2026

Waktu	Voc Tanpa	Voc Heatsink	T Tanpa	T Heatsink
20/7-08:00	21,58	21,61	33,75	33,19
20/7-08:05	21,67	21,70	33,38	32,81
20/7-08:10	21,29	21,28	32,81	32,56
20/7-08:15	21,07	21,06	32,38	32,06
20/7-08:20	21,43	21,43	32,06	31,75
20/7-08:25	22,12	22,10	30,31	30,06
20/7-08:30	21,68	21,66	29,13	29,13
20/7-08:35	22,17	22,18	28,50	28,63
20/7-08:40	22,68	22,71	28,81	28,63
20/7-08:45	22,66	22,70	28,50	27,63
20/7-08:50	23,77	23,88	35,25	34
20/7-08:55	23,84	23,96	36,06	34,94
20/7-09:00	23,95	24,08	36,94	35,88
20/7-09:05	23,99	24,14	38,06	36,31
20/7-09:10	24	24,17	39,19	37,13
20/7-09:15	24,10	24,28	40,44	38,31
20/7-09:20	24,08	24,28	41,81	39,69
20/7-09:25	24,10	24,30	42,88	41,13
20/7-09:30	24,02	24,24	44,25	41,13
20/7-09:35	23,85	24,04	45,31	42,25
20/7-09:40	23,96	24,12	44,75	42,25
20/7-09:45	24,02	24,19	44,19	40,81

20/7-09:50	23,95	24,14	44,75	41,31
20/7-09:55	23,95	24,12	44,44	42,31
20/7-10:00	23,81	23,91	43,06	41,50
20/7-10:05	23,84	23,96	43,13	40,75
20/7-10:10	23,78	23,89	42,56	40,75
20/7-10:15	23,92	24,04	42,94	41
20/7-10:20	23,98	24,16	44	41,50
20/7-10:25	23,62	23,79	44,63	41,88
20/7-10:30	23,94	24,05	43,13	40,88
20/7-10:35	23,74	23,87	42,38	40,44
20/7-10:40	23,86	23,97	41,94	40,50
20/7-10:45	23,80	23,93	41,94	40,81
20/7-10:50	23,75	23,89	42,63	40,56
20/7-10:55	24,08	24,23	42,25	40,81
20/7-11:00	23,93	24,11	43,56	41,50
20/7-11:05	24,00	24,19	44,31	42,50
20/7-11:10	23,92	24,10	45,19	43,56
20/7-11:15	23,82	23,97	45,06	43,50
20/7-11:20	23,84	23,98	44,38	42,81
20/7-11:25	24,05	24,22	44	41,44
20/7-11:30	24,17	24,39	44,94	41,75
20/7-11:35	24,06	24,31	46,06	43,88
20/7-11:40	24,07	24,35	48,13	45,63
20/7-11:45	24,12	24,43	50,13	46,31
20/7-11:50	23,99	24,30	51,19	48,06
20/7-11:55	24,02	24,36	53,06	49,75
20/7-12:00	23,79	24,16	55,38	50,63
20/7-12:05	23,49	23,74	52,75	47,69
20/7-12:10	23,78	23,96	49,31	45,06
20/7-12:15	23,77	23,91	47,13	44,31
20/7-12:20	23,67	23,80	45,44	43,06
20/7-12:25	23,54	23,63	43,56	42,31
20/7-12:30	23,85	23,97	42,81	41,81
20/7-12:35	23,94	24,09	42,94	41,75
20/7-12:40	24,36	24,60	45,13	43,25
20/7-12:45	23,92	24,30	49,69	46,38
20/7-12:50	23,94	24,43	55,13	50,94
20/7-12:55	23,20	23,76	60,69	54,38
20/7-13:00	23,03	23,22	54,88	50,19
20/7-13:05	23,64	23,75	49,75	45,44
20/7-13:10	24,20	24,39	48,38	45,31
20/7-13:15	23,86	24,20	51,63	47,75
20/7-13:20	23,96	24,23	51,88	48,44

20/7-13:25	24,01	24,42	54,50	51,50
20/7-13:30	23,96	24,32	56,19	52,81
20/7-13:35	23,58	23,76	52,94	49,88
20/7-13:40	23,94	24,11	50,06	48
20/7-13:45	23,60	23,78	49,44	48,06
20/7-13:50	23,94	24,23	50,81	49,13
20/7-13:55	23,82	24,03	50,19	48,19
20/7-14:00	24,45	24,68	48,88	47,13
20/7-14:05	24,05	24,42	52,81	50,94
20/7-14:10	23,27	23,59	53,50	51
20/7-14:15	24,07	24,21	48,50	46
20/7-14:20	24,40	24,71	48,63	47
20/7-14:25	23,91	24,23	50,44	47,94
20/7-14:30	22,85	23,01	47,19	44,94
20/7-14:35	24,15	24,28	44,13	42,94
20/7-14:40	24,16	24,35	45,06	43,94
20/7-14:45	24,01	24,26	47	45,94
20/7-14:50	23,34	23,50	44,94	43,38
20/7-14:55	23,66	23,78	41,69	40,25
20/7-15:00	24,19	24,36	41,19	39,94
20/7-15:05	24,30	24,59	44,13	42,88
20/7-15:10	24,08	24,48	48,56	46,81
20/7-15:15	23,97	24,32	51,25	49,06
20/7-15:20	23,24	23,52	50,75	48,44
20/7-15:25	24,17	24,36	47,56	46
20/7-15:30	23,98	24,19	47,75	46,50
20/7-15:35	24,18	24,42	48,19	47,19
20/7-15:40	24,08	24,38	49,75	48,25
20/7-15:45	23,54	23,80	49,06	47,19
20/7-15:50	24,12	24,39	49,06	47,25
20/7-15:55	24,13	24,39	49,19	47,56

Lampiran 3 : Raw Data Vmp, Imp, Daya dan Suhu Tanggal 14 Juli 2026

Waktu	V Tanpa	V Heatsink	I Tanpa	I Heatsink	P Tanpa	P Heatsink	T Tanpa	T Heatsink
08:00	1,16	1,16	0,07	0,08	0,08	0,09	27,13	26,38
08:05	1,24	1,25	0,08	0,09	0,10	0,11	27,25	26,44
08:10	1,33	1,33	0,09	0,09	0,12	0,12	27,44	26,56
8:15	1,46	1,46	0,09	0,10	0,13	0,15	27,56	26,56
8:20	1,66	1,66	0,11	0,12	0,18	0,20	27,75	26,75
8:25	1,87	1,87	0,12	0,13	0,22	0,24	28,19	27,00
8:30	2,19	2,20	0,14	0,15	0,31	0,33	28,69	27,44
8:35	2,48	2,48	0,16	0,17	0,40	0,42	29,06	27,81

8:40	2,65	2,67	0,17	0,19	0,45	0,51	29,63	28,00
8:45	2,81	2,82	0,18	0,20	0,51	0,56	30,00	28,13
8:50	3,00	3,01	0,19	0,21	0,57	0,63	30,25	28,25
8:55	3,20	3,22	0,21	0,23	0,67	0,74	30,63	28,56
09:00	3,60	3,63	0,23	0,25	0,83	0,91	31,19	29,06
09:05	4,14	4,17	0,27	0,29	1,12	1,21	32,06	29,75
9:10	4,31	4,34	0,28	0,30	1,21	1,30	32,88	30,44
9:15	4,33	4,36	0,28	0,30	1,21	1,31	33,63	30,81
9:20	4,52	4,55	0,29	0,32	1,31	1,46	34,06	31,31
9:25	4,88	4,91	0,31	0,34	1,51	1,67	34,56	31,94
9:30	5,40	5,44	0,35	0,38	1,89	2,07	35,56	32,81
9:35	5,72	5,76	0,37	0,40	2,12	2,30	36,50	33,75
9:40	5,58	5,62	0,36	0,39	2,01	2,19	37,44	34,75
9:45	5,57	5,61	0,36	0,39	2,01	2,19	37,63	35,00
9:50	5,56	5,60	0,36	0,39	2,00	2,18	38,00	36,00
9:55	5,56	5,60	0,36	0,39	2,00	2,18	38,31	36,75
10:00	5,78	5,82	0,37	0,41	2,14	2,39	38,75	37,19
10:05	6,05	6,11	0,39	0,43	2,36	2,63	39,00	37,00
10:10	6,23	6,28	0,40	0,44	2,49	2,76	39,63	37,69
10:15	6,89	6,95	0,44	0,49	3,03	3,41	40,25	38,81
10:20	7,25	7,32	0,47	0,51	3,41	3,73	41,31	39,81
10:25	7,32	7,38	0,47	0,52	3,44	3,84	42,31	40,19
10:30	7,44	7,50	0,48	0,53	3,57	3,98	43,25	40,75
10:35	7,36	7,43	0,47	0,52	3,46	3,86	43,88	41,44
10:40	7,08	7,15	0,46	0,50	3,26	3,58	43,88	41,38
10:45	7,02	7,11	0,45	0,50	3,16	3,56	43,75	41,63
10:50	7,35	7,46	0,47	0,52	3,45	3,88	43,63	41,81
10:55	7,36	7,46	0,47	0,52	3,46	3,88	43,38	41,94
11:00	7,19	7,28	0,46	0,51	3,31	3,71	43,75	42,00
11:05	6,98	7,06	0,45	0,49	3,14	3,46	43,81	42,06
11:10	6,92	7,00	0,45	0,49	3,11	3,43	43,00	41,75
11:15	7,09	7,14	0,46	0,50	3,26	3,57	43,06	41,69
11:20	7,11	7,17	0,46	0,50	3,27	3,59	42,94	41,31
11:25	7,28	7,35	0,47	0,52	3,42	3,82	42,94	41,50
11:30	7,26	7,33	0,47	0,52	3,41	3,81	42,88	41,31
11:35	7,03	7,09	0,45	0,50	3,16	3,55	42,88	41,06
11:40	5,80	5,85	0,37	0,41	2,15	2,40	42,25	39,75
11:45	6,09	6,15	0,39	0,43	2,38	2,64	40,56	39,06
11:50	6,49	6,57	0,42	0,46	2,73	3,02	42,25	40,44
11:55	4,82	4,87	0,31	0,34	1,49	1,66	41,31	40,19
12:00	4,16	4,19	0,27	0,29	1,12	1,22	40,13	39,06
12:05	4,57	4,60	0,29	0,32	1,33	1,47	39,75	38,56
12:10	5,62	5,66	0,36	0,40	2,02	2,26	40,06	38,56

12:15	6,09	6,15	0,39	0,43	2,38	2,64	40,56	39,06
12:20	6,42	6,49	0,41	0,46	2,63	2,99	41,00	39,50
12:25	5,31	5,37	0,34	0,38	1,81	2,04	40,94	39,25
12:30	4,94	4,99	0,32	0,35	1,58	1,75	40,69	39,00
12:35	5,62	5,66	0,36	0,40	2,02	2,26	40,06	38,56
12:40	4,90	4,93	0,32	0,34	1,57	1,68	39,88	38,63
12:45	5,46	5,50	0,35	0,39	1,91	2,15	40,44	39,19
12:50	6,58	6,64	0,42	0,47	2,76	3,12	41,44	39,75
12:55	7,10	7,18	0,46	0,50	3,27	3,59	42,31	40,19
13:00	7,03	7,09	0,45	0,50	3,16	3,55	42,88	41,06
13:05	6,44	6,51	0,41	0,46	2,64	2,99	43,31	41,31
13:10	6,33	6,40	0,41	0,45	2,60	2,88	43,31	41,38
13:15	6,15	6,21	0,40	0,43	2,46	2,67	43,25	41,06
13:20	6,80	6,88	0,44	0,48	2,99	3,30	43,31	41,56
13:25	7,11	7,20	0,46	0,51	3,27	3,67	43,00	41,75
13:30	7,76	7,86	0,50	0,55	3,88	4,32	43,69	42,19
13:35	5,28	5,33	0,34	0,37	1,80	1,97	43,13	41,63
13:40	4,84	4,89	0,31	0,34	1,50	1,66	41,94	40,75
13:45	4,81	4,85	0,31	0,34	1,49	1,65	41,63	40,13
13:50	4,69	4,73	0,30	0,33	1,41	1,56	41,56	40,00
13:55	4,11	4,14	0,26	0,29	1,07	1,20	41,13	39,63
14:00	4,59	4,64	0,29	0,32	1,33	1,48	40,38	38,94
14:05	6,20	6,27	0,40	0,44	2,48	2,76	40,94	39,63
14:10	5,31	5,37	0,34	0,38	1,81	2,04	41,94	40,50
14:15	6,16	6,24	0,40	0,44	2,46	2,75	41,75	40,25
14:20	6,30	6,38	0,41	0,45	2,58	2,87	42,25	40,69
14:25	5,10	5,15	0,33	0,36	1,68	1,85	42,81	40,94
14:30	7,75	7,85	0,50	0,55	3,88	4,32	42,38	40,94
14:35	7,19	7,28	0,46	0,51	3,31	3,71	43,06	41,75
14:40	6,82	6,89	0,44	0,48	3,00	3,31	43,63	42,81
14:45	8,73	8,85	0,56	0,62	4,89	5,49	44,13	42,44
14:50	9,77	9,92	0,63	0,70	6,16	6,94	46,38	44,69
14:55	8,10	8,21	0,52	0,58	4,21	4,76	47,25	46,13
15:00	7,25	7,35	0,47	0,52	3,41	3,82	46,56	44,75
15:05	6,52	6,60	0,42	0,47	2,74	3,10	45,31	44,25
15:10	5,99	6,06	0,39	0,43	2,34	2,61	44,00	43,50
15:15	5,24	5,30	0,34	0,37	1,78	1,96	42,81	42,63
15:20	5,11	5,16	0,33	0,36	1,69	1,86	42,06	41,94
15:25	5,28	5,35	0,34	0,38	1,80	2,03	41,94	41,88
15:30	5,52	5,60	0,36	0,40	1,99	2,24	41,00	41,63
15:35	5,63	5,72	0,36	0,40	2,03	2,29	41,31	41,50
15:40	5,22	5,30	0,34	0,37	1,77	1,96	41,63	41,19
15:45	5,10	5,17	0,33	0,36	1,68	1,86	41,25	40,94

15:50	4,75	4,82	0,31	0,34	1,47	1,64	41,31	40,81
15:55	6,17	6,28	0,40	0,44	2,47	2,76	41,94	41,31

Lampiran 4 : Raw Data Vmp, Imp, Daya, dan Suhu Tanggal 16 Juli 2026

Waktu	V Tanpa	V Heatsink	I Tanpa	I Heatsink	P Tanpa	P Heatsink	T Tanpa	T Heatsink
08:00	1,87	1,87	0,12	0,13	0,22	0,24	30,19	29,56
08:05	2,27	2,29	0,14	0,16	0,32	0,37	30,88	30,19
08:10	2,48	2,51	0,16	0,18	0,40	0,45	31,44	30,81
8:15	2,97	3,00	0,19	0,21	0,56	0,63	32,31	31,50
8:20	3,12	3,15	0,20	0,22	0,62	0,69	33,50	32,38
8:25	3,12	3,15	0,20	0,22	0,62	0,69	34,56	33,19
8:30	3,07	3,10	0,20	0,22	0,61	0,68	34,88	33,63
8:35	3,12	3,15	0,20	0,22	0,62	0,69	34,81	33,88
8:40	3,32	3,35	0,21	0,24	0,70	0,80	34,81	34,06
8:45	3,43	3,46	0,22	0,24	0,75	0,83	35,13	34,00
8:50	3,52	3,56	0,23	0,25	0,81	0,89	35,25	34,13
8:55	3,64	3,67	0,23	0,26	0,84	0,95	35,81	34,69
09:00	3,97	4,01	0,26	0,28	1,03	1,12	36,25	35,00
09:05	4,65	4,69	0,30	0,33	1,40	1,55	36,88	35,50
9:10	5,84	5,90	0,38	0,42	2,22	2,48	38,31	36,75
9:15	7,36	7,45	0,47	0,53	3,46	3,95	40,50	38,44
9:20	7,62	7,73	0,49	0,55	3,73	4,25	42,81	39,75
9:25	6,82	6,91	0,44	0,49	3,00	3,39	43,94	41,06
9:30	6,20	6,28	0,40	0,44	2,48	2,76	43,44	41,38
9:35	5,83	5,89	0,38	0,42	2,22	2,47	43,06	41,06
9:40	5,74	5,81	0,37	0,41	2,12	2,38	42,31	40,44
9:45	6,48	6,56	0,42	0,46	2,72	3,02	42,63	40,44
9:50	10,20	10,36	0,66	0,74	6,73	7,67	43,94	41,75
9:55	11,61	11,76	0,75	0,84	8,71	9,88	46,06	43,38
10:00	10,72	10,90	0,69	0,78	7,40	8,50	48,63	45,13
10:05	7,62	7,75	0,49	0,55	3,73	4,26	48,19	45,44
10:10	5,75	5,82	0,37	0,41	2,13	2,39	45,00	42,50
10:15	6,45	6,53	0,42	0,46	2,71	3,00	43,38	41,06
10:20	5,35	5,43	0,34	0,39	1,82	2,12	43,25	41,38
10:25	4,91	4,97	0,32	0,35	1,57	1,74	42,31	40,81
10:30	4,53	4,58	0,29	0,33	1,31	1,51	41,25	39,88
10:35	4,12	4,17	0,27	0,30	1,11	1,25	40,44	38,50
10:40	8,93	9,07	0,58	0,65	5,18	5,90	41,19	39,38
10:45	12,13	12,30	0,79	0,88	9,58	10,82	45,25	43,06
10:50	9,33	9,52	0,60	0,68	5,60	6,47	50,13	47,31
10:55	12,58	12,74	0,82	0,91	10,32	11,59	51,38	47,38
11:00	8,97	9,16	0,58	0,65	5,20	5,95	50,88	47,75

11:05	9,06	9,23	0,59	0,65	5,35	6,00	50,31	47,81
11:10	7,35	7,48	0,47	0,53	3,45	3,96	48,88	46,69
11:15	12,10	12,27	0,79	0,87	9,56	10,67	49,44	47,44
11:20	11,65	11,84	0,76	0,84	8,85	9,95	51,88	50,50
11:25	8,26	8,44	0,53	0,60	4,38	5,06	51,75	50,56
11:30	6,97	7,11	0,45	0,50	3,14	3,56	49,38	48,56
11:35	10,31	10,52	0,67	0,74	6,91	7,78	47,69	47,63
11:40	8,32	8,49	0,54	0,60	4,49	5,09	48,19	46,06
11:45	8,70	8,88	0,56	0,63	4,87	5,59	48,56	46,31
11:50	8,49	8,67	0,55	0,61	4,67	5,29	48,38	45,69
11:55	8,62	8,80	0,56	0,62	4,83	5,46	48,06	45,13
12:00	9,65	9,86	0,63	0,69	6,08	6,80	48,50	45,94
12:05	7,36	7,51	0,48	0,53	3,53	3,98	48,56	46,69
12:10	10,83	11,04	0,70	0,78	7,58	8,61	48,69	46,63
12:15	11,46	11,65	0,74	0,83	8,48	9,67	50,00	48,31
12:20	8,45	8,62	0,55	0,61	4,65	5,26	49,56	48,06
12:25	10,70	10,89	0,69	0,77	7,38	8,39	50,13	48,88
12:30	9,34	9,52	0,60	0,67	5,60	6,38	51,19	48,75
12:35	10,40	10,59	0,67	0,75	6,97	7,94	51,63	48,81
12:40	11,45	11,63	0,74	0,82	8,47	9,54	51,19	49,06
12:45	11,51	11,70	0,75	0,83	8,63	9,71	52,13	49,44
12:50	6,91	7,05	0,45	0,49	3,11	3,45	51,69	48,25
12:55	9,01	9,20	0,58	0,65	5,23	5,98	49,13	46,19
13:00	8,08	8,25	0,52	0,58	4,20	4,79	49,50	46,56
13:05	8,21	8,39	0,53	0,59	4,35	4,95	48,00	44,94
13:10	8,72	8,92	0,56	0,63	4,88	5,62	48,38	45,50
13:15	10,61	10,84	0,69	0,77	7,32	8,35	48,25	45,44
13:20	13,85	14,05	0,90	1,00	12,47	14,05	50,56	47,88
13:25	11,64	11,84	0,76	0,84	8,85	9,95	53,88	51,00
13:30	6,96	7,12	0,45	0,50	3,13	3,56	52,38	48,56
13:35	12,94	13,14	0,84	0,93	10,87	12,22	49,06	45,56
13:40	10,29	10,51	0,67	0,74	6,89	7,78	51,69	48,19
13:45	7,74	7,92	0,50	0,56	3,87	4,44	50,31	46,31
13:50	8,10	8,29	0,52	0,58	4,21	4,81	50,13	46,56
13:55	10,39	10,64	0,67	0,75	6,96	7,98	50,44	47,25
14:00	10,95	11,19	0,71	0,79	7,77	8,84	51,69	48,00
14:05	13,41	13,64	0,87	0,97	11,67	13,23	53,38	49,50
14:10	12,57	12,81	0,82	0,90	10,31	11,53	54,69	50,25
14:15	6,87	7,09	0,45	0,50	3,09	3,55	55,44	51,38
14:20	4,24	4,32	0,27	0,30	1,14	1,30	48,94	45,13
14:25	5,13	5,25	0,33	0,37	1,69	1,94	48,69	45,44
14:30	12,84	13,08	0,83	0,93	10,66	12,16	49,19	46,56
14:35	12,91	13,16	0,84	0,93	10,84	12,24	52,63	49,00

14:40	11,57	11,83	0,75	0,83	8,68	9,82	53,25	48,81
14:45	9,98	10,23	0,65	0,72	6,49	7,37	50,06	45,88
14:50	10,03	10,28	0,65	0,72	6,52	7,40	50,13	46,63
14:55	10,22	10,48	0,66	0,74	6,75	7,76	50,81	47,44
15:00	9,74	10,00	0,63	0,70	6,14	7,00	52,13	48,19
15:05	8,09	8,29	0,52	0,58	4,21	4,81	51,31	46,88
15:10	8,08	8,29	0,52	0,58	4,20	4,81	50,38	46,56
15:15	7,54	7,73	0,49	0,54	3,69	4,17	48,63	45,44
15:20	7,65	7,85	0,49	0,55	3,75	4,32	47,56	44,38
15:25	8,41	8,64	0,54	0,61	4,54	5,27	46,56	43,00
15:30	6,30	6,46	0,41	0,46	2,58	2,97	45,13	42,00
15:35	5,57	5,71	0,36	0,40	2,01	2,28	44,38	41,50
15:40	6,69	6,88	0,43	0,48	2,88	3,30	44,00	41,31
15:45	7,49	7,72	0,48	0,54	3,60	4,17	43,69	40,94
15:50	7,44	7,67	0,48	0,54	3,57	4,14	44,13	41,44
15:55	6,03	6,20	0,39	0,43	2,35	2,67	44,25	41,50

Lampiran 5 : Raw Data Vmp, Imp, Daya, dan Suhu Tanggal 17 Juli 2026

Waktu	V Tanpa	V Heatsink	I Tanpa	I Heatsink	P Tanpa	P Heatsink	T Tanpa	T Heatsink
08:00	0,62	0,64	0,04	0,04	0,02	0,03	27,88	27,56
08:05	0,56	0,58	0,04	0,04	0,02	0,02	27,88	27,63
08:10	0,42	0,43	0,03	0,03	0,01	0,01	27,88	27,63
8:15	0,53	0,54	0,04	0,03	0,02	0,02	27,94	27,69
8:20	0,56	0,57	0,04	0,04	0,02	0,02	28,00	27,75
8:25	0,58	0,60	0,04	0,04	0,02	0,02	28,13	27,88
8:30	0,60	0,61	0,04	0,04	0,02	0,02	28,19	27,81
8:35	0,56	0,57	0,04	0,04	0,02	0,02	27,94	27,69
8:40	0,47	0,49	0,03	0,03	0,01	0,01	27,50	27,38
8:45	0,91	0,92	0,06	0,06	0,05	0,06	27,31	27,13
8:50	0,74	0,76	0,05	0,05	0,04	0,04	27,31	27,13
8:55	1,44	1,47	0,10	0,09	0,14	0,13	27,38	27,19
09:00	1,86	1,89	0,13	0,12	0,24	0,23	28,00	27,69
09:05	1,99	2,02	0,14	0,13	0,28	0,26	28,69	28,19
9:10	3,11	3,16	0,21	0,20	0,65	0,63	29,50	29,00
9:15	3,78	3,85	0,26	0,25	0,98	0,96	31,13	30,31
9:20	3,96	3,97	0,25	0,28	0,99	1,11	32,13	30,94
9:25	4,09	4,09	0,26	0,29	1,06	1,19	32,69	31,50
9:30	4,21	4,21	0,27	0,30	1,14	1,26	32,94	31,50
9:35	4,34	4,34	0,28	0,31	1,22	1,35	33,44	32,13
9:40	4,48	4,49	0,29	0,32	1,30	1,44	34,31	32,94
9:45	4,67	4,67	0,30	0,33	1,40	1,54	34,50	33,13
9:50	4,81	4,82	0,31	0,34	1,49	1,64	34,69	33,81

9:55	4,82	4,82	0,31	0,34	1,49	1,64	35,13	34,56
10:00	4,67	4,67	0,30	0,33	1,40	1,54	35,44	34,75
10:05	5,00	5,00	0,32	0,36	1,60	1,80	35,94	35,44
10:10	5,36	5,37	0,34	0,39	1,82	2,09	36,50	36,06
10:15	5,58	5,59	0,36	0,40	2,01	2,24	37,00	36,63
10:20	5,47	5,47	0,35	0,39	1,91	2,13	37,75	37,38
10:25	5,73	5,74	0,37	0,41	2,12	2,35	38,25	37,69
10:30	6,29	6,30	0,40	0,45	2,52	2,84	38,44	37,88
10:35	6,47	6,47	0,41	0,47	2,65	3,04	39,06	38,38
10:40	6,10	6,11	0,39	0,44	2,38	2,69	39,56	38,81
10:45	5,76	5,76	0,37	0,42	2,13	2,42	39,38	38,63
10:50	6,35	6,35	0,41	0,46	2,60	2,92	39,56	38,69
10:55	6,91	6,91	0,44	0,50	3,04	3,46	40,19	39,44
11:00	7,95	7,95	0,51	0,57	4,05	4,53	40,94	40,00
11:05	7,77	7,77	0,50	0,56	3,89	4,35	42,31	41,06
11:10	7,88	7,88	0,51	0,57	4,02	4,49	43,00	41,63
11:15	5,67	5,69	0,36	0,41	2,04	2,33	43,25	41,75
11:20	5,35	5,35	0,34	0,39	1,82	2,09	42,25	41,25
11:25	5,59	5,60	0,36	0,40	2,01	2,24	40,88	40,06
11:30	5,73	5,74	0,37	0,41	2,12	2,35	40,69	39,38
11:35	8,30	8,29	0,53	0,60	4,40	4,97	41,63	40,19
11:40	9,13	9,12	0,58	0,66	5,30	6,02	43,25	41,63
11:45	12,77	12,79	0,82	0,94	10,47	12,02	46,13	44,19
11:50	8,71	8,69	0,56	0,64	4,88	5,56	47,44	44,88
11:55	9,38	9,36	0,60	0,69	5,63	6,46	46,44	44,31
12:00	7,17	7,17	0,46	0,52	3,30	3,73	45,13	43,75
12:05	7,37	7,36	0,47	0,54	3,46	3,97	44,06	43,19
12:10	11,09	11,08	0,71	0,81	7,87	8,97	45,13	43,81
12:15	6,36	6,38	0,41	0,46	2,61	2,93	46,63	44,88
12:20	12,20	12,23	0,79	0,89	9,64	10,88	46,56	44,56
12:25	12,41	12,41	0,80	0,91	9,93	11,29	48,44	46,00
12:30	13,30	13,31	0,86	0,98	11,44	13,04	50,50	47,50
12:35	15,66	15,72	1,02	1,16	15,97	18,24	53,38	49,63
12:40	15,85	15,91	1,03	1,17	16,33	18,61	55,81	52,38
12:45	15,70	15,77	1,02	1,16	16,01	18,29	56,56	52,94
12:50	12,25	12,24	0,79	0,90	9,68	11,02	58,06	54,63
12:55	15,64	15,69	1,01	1,14	15,80	17,89	58,69	54,69
13:00	14,39	14,39	0,93	1,05	13,38	15,11	57,06	53,88
13:05	15,56	15,58	1,01	1,14	15,72	17,76	58,38	55,06
13:10	16,36	16,42	1,06	1,21	17,34	19,87	59,81	57,00
13:15	16,66	16,74	1,08	1,23	17,99	20,59	60,44	56,75
13:20	16,45	16,58	1,07	1,21	17,60	20,06	60,50	57,13
13:25	12,90	12,96	0,84	0,94	10,84	12,18	58,44	55,44

13:30	4,38	4,38	0,28	0,32	1,23	1,40	50,94	49,25
13:35	5,23	5,20	0,33	0,38	1,73	1,98	46,44	45,31
13:40	4,03	4,04	0,26	0,29	1,05	1,17	42,81	42,56
13:45	8,99	8,93	0,57	0,66	5,12	5,89	41,44	40,75
13:50	11,46	11,43	0,74	0,84	8,48	9,60	42,31	41,25
13:55	15,78	15,79	1,02	1,16	16,10	18,32	44,44	42,81
14:00	3,71	3,72	0,24	0,27	0,89	1,00	45,44	43,31
14:05	2,87	2,87	0,18	0,21	0,52	0,60	42,06	40,31
14:10	3,72	3,74	0,24	0,27	0,89	1,01	39,44	38,44
14:15	3,44	3,45	0,22	0,25	0,76	0,86	39,31	38,19
14:20	3,03	3,04	0,19	0,22	0,58	0,67	38,38	37,44
14:25	3,33	3,34	0,21	0,24	0,70	0,80	38,06	36,94
14:30	2,94	2,94	0,19	0,21	0,56	0,62	37,88	36,81
14:35	2,42	2,44	0,16	0,18	0,39	0,44	36,75	35,81
14:40	1,70	1,71	0,11	0,12	0,19	0,21	35,88	35,13
14:45	1,68	1,68	0,11	0,12	0,18	0,20	35,06	34,44
14:50	1,75	1,77	0,11	0,13	0,19	0,23	34,50	33,81
14:55	2,06	2,07	0,13	0,15	0,27	0,31	34,25	33,56
15:00	3,70	3,70	0,24	0,27	0,89	1,00	35,06	34,19
15:05	3,67	3,69	0,24	0,27	0,88	1,00	36,75	35,50
15:10	3,36	3,36	0,21	0,24	0,71	0,81	36,81	35,44
15:15	6,76	6,70	0,43	0,49	2,91	3,28	38,38	37,56
15:20	4,00	4,00	0,26	0,29	1,04	1,16	38,81	37,75
15:25	4,43	4,41	0,28	0,32	1,24	1,41	37,50	36,31
15:30	11,75	11,65	0,75	0,86	8,81	10,02	41,06	40,31
15:35	4,30	4,29	0,28	0,31	1,20	1,33	41,13	39,81
15:40	4,92	4,90	0,32	0,36	1,57	1,76	39,75	38,75
15:45	3,67	3,65	0,23	0,27	0,84	0,99	41,44	40,31
15:50	8,35	8,24	0,53	0,61	4,43	5,03	39,50	38,25
15:55	4,56	4,53	0,29	0,33	1,32	1,49	41,56	40,88

Lampiran 6 : Raw Data Vmp, Imp, Daya, dan Suhu Tanggal 23 Juli 2026

Waktu	V Tanpa	V Heatsink	I Tanpa	I Heatsink	P Tanpa	P Heatsink	T Tanpa	T Heatsink
08:00	4,07	4,10	0,26	0,29	1,06	1,19	34,69	33,69
08:05	4,32	4,36	0,28	0,31	1,21	1,35	35,69	34,31
08:10	4,62	4,67	0,30	0,33	1,39	1,54	36,44	34,94
8:15	5,12	5,17	0,33	0,37	1,69	1,91	37,44	35,81
8:20	5,28	5,34	0,34	0,38	1,80	2,03	38,56	36,69
8:25	5,59	5,66	0,36	0,40	2,01	2,26	39,19	37,38
8:30	6,21	6,29	0,40	0,45	2,48	2,83	40,13	37,88
8:35	6,51	6,60	0,42	0,47	2,73	3,10	40,94	38,88
8:40	6,91	7,01	0,45	0,50	3,11	3,51	41,69	39,44

8:45	7,26	7,37	0,47	0,52	3,41	3,83	42,88	40,31
8:50	7,41	7,52	0,48	0,53	3,56	3,99	44,00	41,06
8:55	7,63	7,74	0,50	0,55	3,82	4,26	43,94	41,44
09:00	8,00	8,14	0,52	0,58	4,16	4,72	44,56	42,00
09:05	8,10	8,23	0,53	0,58	4,29	4,77	45,75	42,88
9:10	7,99	8,12	0,52	0,58	4,15	4,71	47,19	43,81
9:15	8,29	8,42	0,54	0,60	4,48	5,05	48,00	44,25
9:20	9,13	9,28	0,60	0,66	5,48	6,12	47,81	44,06
9:25	9,34	9,48	0,61	0,68	5,70	6,45	48,00	44,88
9:30	9,73	9,91	0,64	0,71	6,23	7,04	48,94	45,56
9:35	9,95	10,11	0,65	0,72	6,47	7,28	49,25	45,56
9:40	10,10	10,27	0,66	0,74	6,67	7,60	49,13	46,00
9:45	10,09	10,27	0,66	0,73	6,66	7,50	49,50	45,13
9:50	10,68	10,85	0,70	0,78	7,48	8,46	50,25	46,50
9:55	10,84	11,01	0,71	0,79	7,70	8,70	50,81	45,94
10:00	11,42	11,57	0,75	0,83	8,57	9,60	52,25	46,56
10:05	11,18	11,35	0,73	0,82	8,16	9,31	52,44	47,50
10:10	11,51	11,66	0,75	0,84	8,63	9,79	53,00	48,50
10:15	11,92	12,06	0,78	0,87	9,30	10,49	53,31	48,88
10:20	12,40	12,53	0,81	0,91	10,04	11,40	53,69	49,19
10:25	12,38	12,52	0,81	0,91	10,03	11,39	54,31	49,31
10:30	12,41	12,54	0,81	0,91	10,05	11,41	53,81	50,19
10:35	13,04	13,16	0,85	0,95	11,08	12,50	54,19	50,56
10:40	13,19	13,32	0,86	0,96	11,34	12,79	55,56	51,19
10:45	13,29	13,38	0,86	0,97	11,43	12,98	56,13	51,25
10:50	13,47	13,59	0,88	0,98	11,85	13,32	56,56	52,50
10:55	13,55	13,67	0,88	0,99	11,92	13,53	57,50	50,75
11:00	13,91	14,06	0,91	1,02	12,66	14,34	51,38	46,63
11:05	14,09	14,20	0,92	1,04	12,96	14,77	53,88	49,19
11:10	14,24	14,34	0,93	1,05	13,24	15,06	57,13	50,88
11:15	14,42	14,51	0,94	1,06	13,55	15,38	58,44	52,19
11:20	13,39	13,41	0,87	0,98	11,65	13,14	58,44	52,75
11:25	3,78	3,84	0,25	0,27	0,95	1,04	53,25	48,13
11:30	4,77	4,83	0,31	0,35	1,48	1,69	47,56	45,13
11:35	4,00	4,05	0,26	0,29	1,04	1,17	47,69	46,13
11:40	4,11	4,12	0,27	0,30	1,11	1,24	46,25	44,56
11:45	4,89	4,93	0,32	0,35	1,56	1,73	48,50	46,69
11:50	16,33	16,40	1,06	1,20	17,31	19,68	50,69	49,31
11:55	5,97	6,05	0,39	0,43	2,33	2,60	50,13	47,88
12:00	4,50	4,54	0,29	0,33	1,31	1,50	47,94	45,56
12:05	4,38	4,45	0,29	0,32	1,27	1,42	45,19	43,81
12:10	4,36	4,43	0,28	0,32	1,22	1,42	43,75	42,81
12:15	4,06	4,12	0,27	0,29	1,10	1,19	43,31	42,00

12:20	4,29	4,34	0,28	0,31	1,20	1,35	42,56	41,13
12:25	4,09	4,13	0,27	0,30	1,10	1,24	42,69	41,00
12:30	7,37	7,47	0,48	0,54	3,54	4,03	42,25	40,63
12:35	15,57	15,65	1,02	1,14	15,88	17,84	48,25	46,13
12:40	15,75	15,78	1,02	1,16	16,07	18,30	54,56	51,31
12:45	15,13	15,19	0,98	1,11	14,83	16,86	59,63	54,81
12:50	15,95	16,00	1,04	1,16	16,59	18,56	59,50	55,31
12:55	5,61	5,70	0,37	0,41	2,08	2,34	54,38	51,31
13:00	4,26	4,32	0,28	0,31	1,19	1,34	48,44	46,94
13:05	5,39	5,47	0,35	0,39	1,89	2,13	43,63	43,06
13:10	4,36	4,43	0,28	0,32	1,22	1,42	42,13	41,13
13:15	3,98	4,03	0,26	0,29	1,03	1,17	40,06	39,00
13:20	4,50	4,56	0,29	0,33	1,31	1,50	39,44	38,19
13:25	8,10	8,23	0,53	0,58	4,29	4,77	45,75	42,88
13:30	14,44	14,58	0,95	1,05	13,72	15,31	45,75	44,00
13:35	14,42	14,57	0,94	1,05	13,55	15,30	49,69	47,63
13:40	14,27	14,42	0,93	1,03	13,27	14,85	51,56	49,38
13:45	14,53	14,70	0,95	1,05	13,80	15,44	52,50	50,56
13:50	14,76	14,92	0,97	1,07	14,32	15,96	52,94	51,25
13:55	14,42	14,59	0,95	1,04	13,70	15,17	52,88	51,13
14:00	14,10	14,27	0,92	1,01	12,97	14,41	53,00	50,88
14:05	13,61	13,79	0,89	0,98	12,11	13,51	51,88	49,88
14:10	13,56	13,75	0,89	0,97	12,07	13,34	53,56	51,06
14:15	13,86	14,02	0,91	0,99	12,61	13,88	54,13	51,31
14:20	13,50	13,68	0,89	0,97	12,02	13,27	53,31	52,13
14:25	12,89	13,09	0,85	0,93	10,96	12,17	53,00	52,13
14:30	12,51	12,71	0,82	0,90	10,26	11,44	52,75	52,13
14:35	12,44	12,64	0,82	0,89	10,20	11,25	51,88	51,69
14:40	12,19	12,41	0,80	0,87	9,75	10,80	51,19	50,25
14:45	11,90	12,12	0,79	0,85	9,40	10,30	50,31	49,81
14:50	11,23	11,48	0,74	0,81	8,31	9,30	49,13	48,44
14:55	10,51	10,77	0,70	0,75	7,36	8,08	48,88	47,69
15:00	10,91	11,17	0,72	0,78	7,86	8,71	48,38	46,94
15:05	10,65	10,91	0,71	0,76	7,56	8,29	47,44	45,88
15:10	10,91	11,18	0,72	0,78	7,86	8,72	47,44	46,19
15:15	10,16	10,41	0,67	0,73	6,81	7,60	47,56	46,75
15:20	7,78	7,97	0,51	0,56	3,97	4,46	45,94	44,94
15:25	10,29	10,54	0,68	0,74	7,00	7,80	46,06	45,63
15:30	9,90	10,15	0,66	0,71	6,53	7,21	47,06	46,25
15:35	9,51	9,75	0,63	0,68	5,99	6,63	47,06	45,94
15:40	9,26	9,48	0,61	0,66	5,65	6,26	47,13	46,00
15:45	8,93	9,15	0,59	0,64	5,27	5,86	46,25	44,69
15:50	8,56	8,79	0,57	0,61	4,88	5,36	45,31	43,94

15:55	8,08	8,29	0,54	0,58	4,36	4,81	45,31	44,38

Lampiran 7 : Rata - rata Voc dan Suhu dalam 2 hari

Waktu	$\overline{Voc}$ **Tanpa**	$\overline{Voc}$ **Heatsink**	$\overline{T}$ **Tanpa**	$\overline{T}$ **Heatsink**
08:00	20,63	20,67	29,32	29,07
08:05	20,67	20,71	29,16	28,91
8:10	20,44	20,46	28,88	28,78
8:15	20,37	20,39	28,66	28,53
8:20	20,55	20,58	28,47	28,35
8:25	20,87	20,88	27,60	27,50
8:30	22,87	22,94	29,83	29,22
8:35	23,14	23,24	31,19	30,22
8:40	23,39	23,49	31,81	30,72
8:45	23,41	23,52	32,00	30,54
8:50	23,94	24,09	35,91	34,10
8:55	23,93	24,09	36,75	34,85
09:00	24,02	24,18	37,41	35,38
09:05	24,05	24,22	38,13	35,72
9:10	24,08	24,28	39,07	36,29
9:15	24,12	24,33	40,07	37,06
9:20	24,06	24,28	41,06	38,13
9:25	24,15	24,37	42,10	39,26
9:30	24,15	24,40	43,53	39,82
9:35	24,04	24,32	45,81	41,82
9:40	24,04	24,32	47,13	42,66
9:45	24,05	24,32	47,60	42,75
9:50	23,97	24,24	48,60	43,75
9:55	23,93	24,20	49,44	44,75
10:00	23,89	24,11	49,25	44,78
10:05	23,88	24,14	49,41	44,25
10:10	23,87	24,07	48,66	45,10
10:15	23,94	24,17	49,13	44,66
10:20	23,99	24,27	49,97	44,53
10:25	23,76	24,06	50,91	45,51
10:30	23,89	24,18	50,63	45,10
10:35	23,79	24,07	50,66	45,72
10:40	23,84	24,08	50,50	46,82
10:45	23,78	24,06	51,07	47,72
10:50	23,77	24,08	52,26	47,13
10:55	23,86	24,17	52,25	47,31
11:00	23,37	23,65	51,60	46,41

11:05	23,61	23,77	48,56	44,35
11:10	23,84	24,00	47,35	44,10
11:15	23,99	24,22	48,60	45,50
11:20	23,36	23,57	48,79	45,44
11:25	23,63	23,74	46,00	43,22
11:30	23,99	24,11	44,44	42,53
11:35	23,73	23,95	46,13	44,63
11:40	23,97	24,18	47,07	45,19
11:45	24,14	24,48	50,35	47,53
11:50	23,92	24,29	53,66	50,47
11:55	23,71	24,01	54,00	50,44
12:00	23,57	23,86	54,04	50,04
12:05	23,49	23,65	50,00	46,47
12:10	23,44	23,54	46,66	43,88
12:15	23,40	23,48	44,22	42,28
12:20	23,21	23,28	42,32	40,69
12:25	23,07	23,11	40,53	39,75
12:30	23,22	23,29	39,47	38,78
12:35	23,34	23,43	39,19	38,38
12:40	23,58	23,73	40,19	39,03
12:45	23,40	23,61	42,29	40,47
12:50	23,10	23,37	44,94	42,69
12:55	22,50	22,78	47,50	44,10
13:00	22,31	22,42	44,32	41,69
13:05	22,66	22,73	41,57	39,13
13:10	22,75	22,84	40,60	38,94
13:15	22,47	22,63	42,01	39,91
13:20	22,70	22,83	41,97	40,10
13:25	23,07	23,26	42,41	40,78
13:30	22,82	22,99	42,66	40,97
13:35	22,88	22,97	40,72	39,26
13:40	23,31	23,41	39,44	38,32
13:45	23,13	23,24	38,97	37,85
13:50	23,54	23,71	39,72	38,35
13:55	23,64	23,78	39,29	37,72
14:0	24,09	24,25	38,94	37,44
14:5	23,89	24,12	41,22	39,54
14:10	23,56	23,77	41,85	39,91
14:15	24,07	24,18	39,38	37,60
14:20	24,26	24,46	39,69	38,22
14:25	24,07	24,28	40,72	38,91
14:30	23,59	23,73	39,60	37,79
14:35	24,57	24,75	39,51	38,29

14:40	24,45	24,69	42,16	41,10
14:45	24,36	24,60	43,32	41,91
14:50	24,06	24,29	43,47	41,57
14:55	23,95	24,16	42,91	40,85
15:00	24,34	24,61	43,47	41,66
15:05	24,26	24,59	46,41	44,41
15:10	24,12	24,49	48,88	47,03
15:15	24,07	24,38	50,47	48,53
15:20	23,52	23,75	49,28	47,54
15:25	24,28	24,46	46,91	45,94
15:30	24,04	24,28	48,28	47,41
15:35	24,14	24,39	48,66	47,72
15:40	24,03	24,32	49,60	48,32
15:45	23,75	23,97	48,81	47,41
15:50	23,91	24,12	47,44	46,32
15:55	24,01	24,18	46,04	45,03
RATA RATA	23,50	23,69	43,46	41,11
MIN	20,37	20,39	27,60	27,50
MAX	24,57	24,75	54,04	50,47

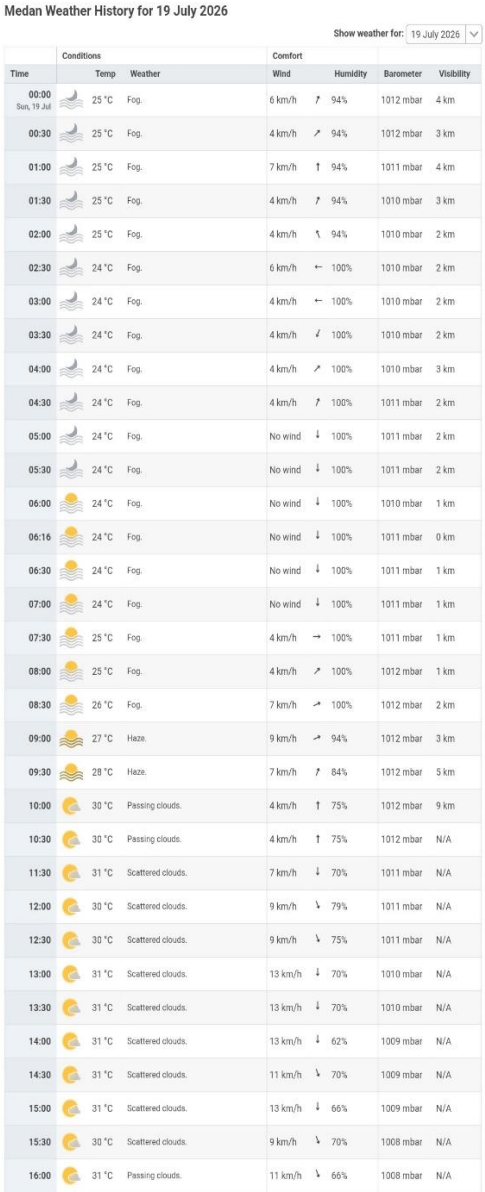
Lampiran 8 : Rata - rata Vmp, Imp, Daya, dan Suhu dalam 4 hari

Waktu	$\bar{V}$ **Tanpa**	$\bar{V}$ **Heatsink**	$\bar{I}$ **Tanpa**	$\bar{I}$ **Heatsink**	$\bar{P}$ **Tanpa**	$\bar{P}$ **Heatsink**	$\bar{T}$ **Tanpa**	$\bar{T}$ **Heatsink**
08:00	1,93	1,94	0,12	0,14	0,35	0,39	29,97	29,30
08:05	2,10	2,12	0,14	0,15	0,41	0,46	30,43	29,64
8:10	2,21	2,24	0,15	0,16	0,48	0,53	30,80	29,99
8:15	2,52	2,54	0,16	0,18	0,60	0,68	31,31	30,39
8:20	2,66	2,68	0,17	0,19	0,66	0,74	31,95	30,89
8:25	2,79	2,82	0,18	0,20	0,72	0,81	32,52	31,36
8:30	3,02	3,05	0,20	0,22	0,86	0,97	32,97	31,69
8:35	3,17	3,20	0,21	0,23	0,94	1,06	33,19	32,07
8:40	3,34	3,38	0,22	0,24	1,07	1,21	33,41	32,22
8:45	3,60	3,64	0,23	0,26	1,18	1,32	33,83	32,39
8:50	3,67	3,71	0,24	0,26	1,24	1,39	34,20	32,64
8:55	3,98	4,03	0,26	0,28	1,37	1,52	34,44	32,97
09:00	4,36	4,42	0,29	0,31	1,57	1,74	35,00	33,44
09:05	4,72	4,78	0,31	0,33	1,77	1,95	35,85	34,08
9:10	5,31	5,38	0,35	0,38	2,06	2,28	36,97	35,00
9:15	5,94	6,02	0,39	0,42	2,53	2,82	38,32	35,95
9:20	6,31	6,38	0,41	0,45	2,88	3,24	39,20	36,52
9:25	6,28	6,35	0,41	0,45	2,82	3,17	39,80	37,35
9:30	6,39	6,46	0,42	0,46	2,93	3,28	40,22	37,81

9:35	6,46	6,53	0,42	0,46	3,00	3,35	40,56	38,13
9:40	6,48	6,55	0,42	0,47	3,02	3,40	40,80	38,53
9:45	6,70	6,78	0,44	0,48	3,20	3,56	41,07	38,43
9:50	7,81	7,91	0,51	0,56	4,43	4,99	41,72	39,52
9:55	8,21	8,30	0,53	0,59	4,97	5,60	42,58	40,16
10:00	8,15	8,24	0,53	0,59	4,88	5,51	43,77	40,91
10:05	7,46	7,55	0,48	0,54	3,96	4,50	43,89	41,35
10:10	7,21	7,28	0,47	0,52	3,77	4,26	43,53	41,19
10:15	7,71	7,78	0,50	0,56	4,26	4,78	43,49	41,35
10:20	7,62	7,69	0,49	0,55	4,30	4,85	44,00	41,94
10:25	7,59	7,65	0,49	0,55	4,29	4,83	44,30	42,00
10:30	7,67	7,73	0,50	0,56	4,36	4,93	44,19	42,18
10:35	7,75	7,81	0,50	0,56	4,58	5,16	44,39	42,22
10:40	8,83	8,91	0,57	0,64	5,54	6,24	45,05	42,69
10:45	9,55	9,64	0,62	0,69	6,58	7,44	46,13	43,64
10:50	9,13	9,23	0,59	0,66	5,88	6,65	47,47	45,08
10:55	10,10	10,20	0,65	0,73	7,18	8,12	48,11	44,88
11:00	9,51	9,61	0,62	0,69	6,31	7,13	46,74	44,10
11:05	9,48	9,57	0,62	0,69	6,33	7,14	47,58	45,03
11:10	9,10	9,18	0,59	0,66	5,96	6,74	48,00	45,24
11:15	9,82	9,90	0,64	0,71	7,10	7,99	48,55	45,77
11:20	9,38	9,44	0,61	0,68	6,40	7,19	48,88	46,45
11:25	6,23	6,31	0,40	0,45	2,69	3,04	47,21	45,06
11:30	6,18	6,25	0,40	0,45	2,54	2,85	45,13	43,60
11:35	7,41	7,49	0,48	0,53	3,88	4,37	44,97	43,75
11:40	6,84	6,90	0,44	0,49	3,26	3,69	44,99	43,00
11:45	8,11	8,19	0,52	0,59	4,82	5,50	45,94	44,06
11:50	10,01	10,08	0,65	0,73	7,40	8,39	47,19	45,08
11:55	7,20	7,27	0,47	0,52	3,57	4,04	46,49	44,38
12:00	6,37	6,44	0,41	0,46	2,95	3,31	45,43	43,58
12:05	5,92	5,98	0,38	0,43	2,40	2,71	44,39	43,06
12:10	7,98	8,05	0,51	0,58	4,67	5,32	44,41	42,95
12:15	6,99	7,08	0,45	0,50	3,64	4,11	45,13	43,56
12:20	7,84	7,92	0,51	0,57	4,53	5,12	44,92	43,31
12:25	8,13	8,20	0,53	0,59	5,06	5,74	45,55	43,78
12:30	8,74	8,82	0,57	0,64	5,54	6,30	46,16	43,97
12:35	11,81	11,91	0,77	0,86	10,21	11,57	48,33	45,78
12:40	11,99	12,06	0,78	0,87	10,61	12,03	50,36	47,85
12:45	11,95	12,04	0,78	0,87	10,35	11,75	52,19	49,10
12:50	10,42	10,48	0,68	0,76	8,03	9,04	52,67	49,49
12:55	9,34	9,44	0,61	0,68	6,59	7,45	51,13	48,10
13:00	8,44	8,51	0,55	0,61	5,49	6,19	49,47	47,11
13:05	8,90	8,99	0,58	0,65	6,15	6,96	48,33	46,09

13:10	8,94	9,04	0,58	0,65	6,51	7,45	48,41	46,25
13:15	9,35	9,46	0,61	0,68	7,20	8,19	48,00	45,56
13:20	10,40	10,52	0,68	0,76	8,59	9,73	48,45	46,19
13:25	9,94	10,06	0,65	0,72	6,81	7,64	50,27	47,77
13:30	8,39	8,49	0,55	0,61	5,49	6,15	48,19	46,00
13:35	9,47	9,56	0,61	0,68	6,99	7,87	47,08	45,03
13:40	8,36	8,47	0,54	0,60	5,68	6,37	47,00	45,22
13:45	9,02	9,10	0,58	0,65	6,07	6,85	46,47	44,44
13:50	9,75	9,84	0,63	0,71	7,10	7,98	46,74	44,77
13:55	11,18	11,29	0,73	0,81	9,46	10,67	47,22	45,21
14:00	8,34	8,46	0,54	0,60	5,74	6,44	47,63	45,28
14:05	9,02	9,14	0,59	0,65	6,69	7,53	47,07	44,83
14:10	8,79	8,92	0,57	0,63	6,27	6,98	47,41	45,06
14:15	7,58	7,70	0,50	0,55	4,73	5,26	47,66	45,28
14:20	6,77	6,86	0,44	0,49	4,08	4,53	45,72	43,85
14:25	6,61	6,71	0,43	0,48	3,76	4,19	45,64	43,86
14:30	9,01	9,15	0,59	0,65	6,34	7,13	45,55	44,11
14:35	8,74	8,88	0,57	0,63	6,18	6,91	46,08	44,56
14:40	8,07	8,21	0,53	0,58	5,40	6,03	45,99	44,25
14:45	8,07	8,22	0,53	0,58	5,24	5,84	44,89	43,14
14:50	8,20	8,36	0,53	0,59	5,29	5,97	45,04	43,39
14:55	7,72	7,88	0,50	0,56	4,65	5,23	45,30	43,71
15:00	7,90	8,06	0,52	0,57	4,57	5,13	45,53	43,52
15:05	7,23	7,37	0,47	0,52	3,85	4,30	45,20	43,13
15:10	7,09	7,22	0,46	0,51	3,77	4,24	44,66	42,92
15:15	7,43	7,54	0,48	0,53	3,80	4,25	44,35	43,10
15:20	6,14	6,25	0,40	0,44	2,61	2,95	43,59	42,25
15:25	7,10	7,24	0,46	0,51	3,64	4,13	43,02	41,71
15:30	8,37	8,47	0,55	0,61	4,98	5,61	43,56	42,55
15:35	6,25	6,37	0,41	0,45	2,81	3,13	43,47	42,19
15:40	6,52	6,64	0,43	0,47	2,97	3,32	43,13	41,81
15:45	6,30	6,42	0,41	0,45	2,85	3,22	43,16	41,72
15:50	7,28	7,38	0,47	0,53	3,59	4,04	42,56	41,11
15:55	6,21	6,33	0,41	0,45	2,63	2,93	43,27	42,02
RATA RATA	7,38	7,46	0,48	0,53	4,45	5,02	43,61	41,65
MIN	1,93	1,94	0,12	0,14	0,35	0,39	29,97	29,30
MAX	11,99	12,06	0,78	0,87	10,61	12,03	52,67	49,49

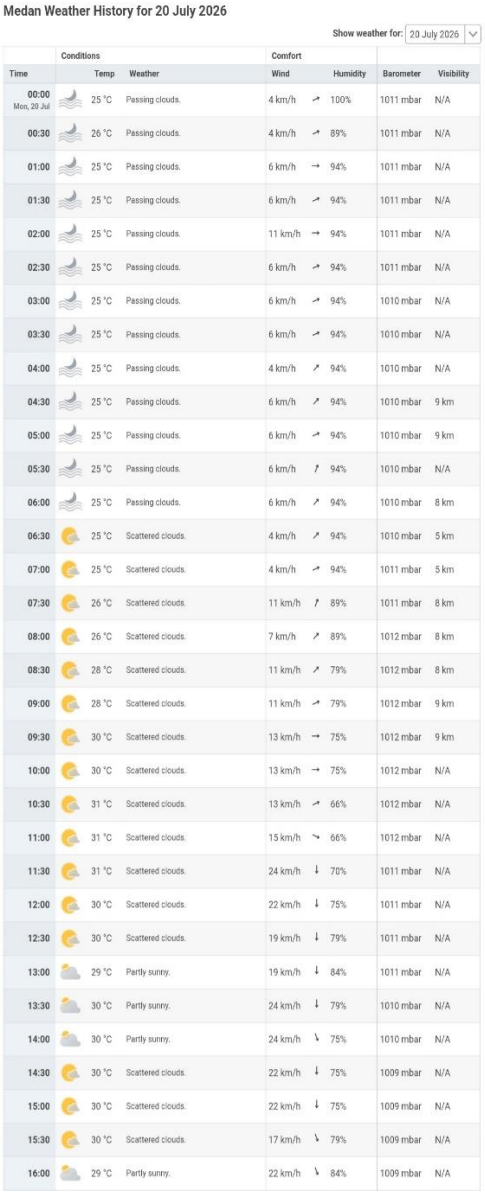
Lampiran 9 : Data cuaca saat pengambilan data pengujian tanpa beban (Voc dan Suhu)



Medan Weather History for 19 July 2026

Show weather for: 19 July 2026

Time	Conditions		Comfort			
	Temp	Weather	Wind	Humidity	Barometer	Visibility
00:00 Sun, 19 Jul	25 °C	Fog.	6 km/h	94%	1012 mbar	4 km
00:30	25 °C	Fog.	4 km/h	94%	1012 mbar	3 km
01:00	25 °C	Fog.	7 km/h	94%	1011 mbar	4 km
01:30	25 °C	Fog.	4 km/h	94%	1010 mbar	3 km
02:00	25 °C	Fog.	4 km/h	94%	1010 mbar	2 km
02:30	24 °C	Fog.	6 km/h	100%	1010 mbar	2 km
03:00	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1010 mbar	2 km
03:30	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1010 mbar	2 km
04:00	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1010 mbar	3 km
04:30	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1011 mbar	2 km
05:00	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	2 km
05:30	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	2 km
06:00	24 °C	Fog.	No wind	100%	1010 mbar	1 km
06:16	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	0 km
06:30	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	1 km
07:00	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	1 km
07:30	25 °C	Fog.	4 km/h	100%	1011 mbar	1 km
08:00	25 °C	Fog.	4 km/h	100%	1012 mbar	1 km
08:30	26 °C	Fog.	7 km/h	100%	1012 mbar	2 km
09:00	27 °C	Haze.	9 km/h	94%	1012 mbar	3 km
09:30	28 °C	Haze.	7 km/h	84%	1012 mbar	5 km
10:00	30 °C	Passing clouds.	4 km/h	75%	1012 mbar	9 km
10:30	30 °C	Passing clouds.	4 km/h	75%	1012 mbar	N/A
11:30	31 °C	Scattered clouds.	7 km/h	70%	1011 mbar	N/A
12:00	30 °C	Scattered clouds.	9 km/h	79%	1011 mbar	N/A
12:30	30 °C	Scattered clouds.	9 km/h	75%	1011 mbar	N/A
13:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	70%	1010 mbar	N/A
13:30	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	70%	1010 mbar	N/A
14:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	62%	1009 mbar	N/A
14:30	31 °C	Scattered clouds.	11 km/h	70%	1009 mbar	N/A
15:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	66%	1009 mbar	N/A
15:30	30 °C	Scattered clouds.	9 km/h	70%	1008 mbar	N/A
16:00	31 °C	Passing clouds.	11 km/h	66%	1008 mbar	N/A



Medan Weather History for 20 July 2026

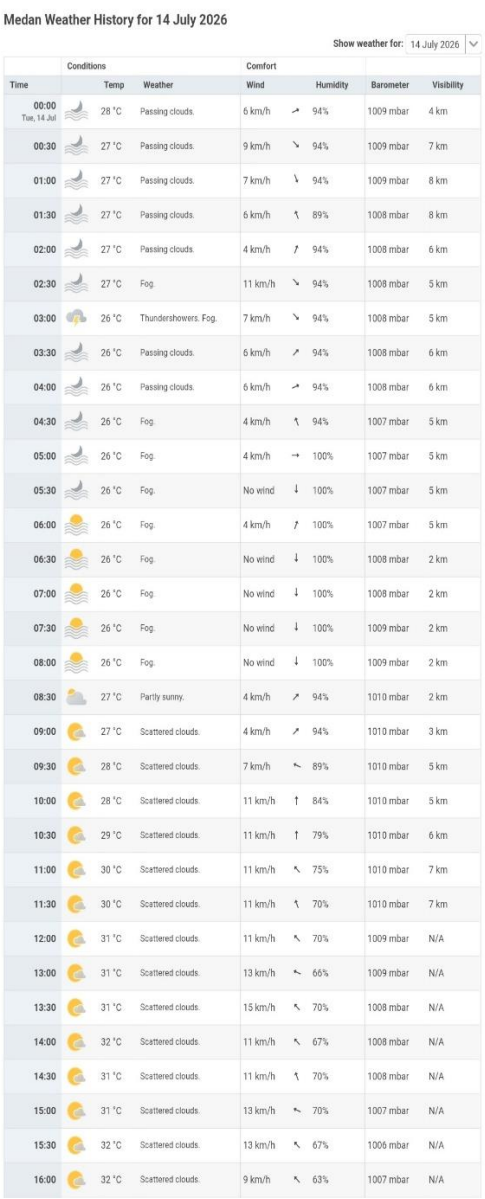
Show weather for: 20 July 2026

Time	Conditions		Comfort			
	Temp	Weather	Wind	Humidity	Barometer	Visibility
00:00 Mon, 20 Jul	25 °C	Passing clouds.	4 km/h	100%	1011 mbar	N/A
00:30	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	89%	1011 mbar	N/A
01:00	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1011 mbar	N/A
01:30	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1011 mbar	N/A
02:00	25 °C	Passing clouds.	11 km/h	94%	1011 mbar	N/A
02:30	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1011 mbar	N/A
03:00	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	N/A
03:30	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	N/A
04:00	25 °C	Passing clouds.	4 km/h	94%	1010 mbar	N/A
04:30	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	9 km
05:00	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	9 km
05:30	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	N/A
06:00	25 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	8 km
06:30	25 °C	Scattered clouds.	4 km/h	94%	1010 mbar	5 km
07:00	25 °C	Scattered clouds.	4 km/h	94%	1011 mbar	5 km
07:30	26 °C	Scattered clouds.	11 km/h	89%	1011 mbar	8 km
08:00	26 °C	Scattered clouds.	7 km/h	89%	1012 mbar	8 km
08:30	28 °C	Scattered clouds.	11 km/h	79%	1012 mbar	8 km
09:00	28 °C	Scattered clouds.	11 km/h	79%	1012 mbar	9 km
09:30	30 °C	Scattered clouds.	13 km/h	75%	1012 mbar	9 km
10:00	30 °C	Scattered clouds.	13 km/h	75%	1012 mbar	N/A
10:30	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	66%	1012 mbar	N/A
11:00	31 °C	Scattered clouds.	15 km/h	66%	1012 mbar	N/A
11:30	31 °C	Scattered clouds.	24 km/h	70%	1011 mbar	N/A
12:00	30 °C	Scattered clouds.	22 km/h	75%	1011 mbar	N/A
12:30	30 °C	Scattered clouds.	19 km/h	79%	1011 mbar	N/A
13:00	29 °C	Partly sunny.	19 km/h	84%	1011 mbar	N/A
13:30	30 °C	Partly sunny.	24 km/h	79%	1010 mbar	N/A
14:00	30 °C	Partly sunny.	24 km/h	75%	1010 mbar	N/A
14:30	30 °C	Scattered clouds.	22 km/h	75%	1009 mbar	N/A
15:00	30 °C	Scattered clouds.	22 km/h	75%	1009 mbar	N/A
15:30	30 °C	Scattered clouds.	17 km/h	79%	1009 mbar	N/A
16:00	29 °C	Partly sunny.	22 km/h	84%	1009 mbar	N/A

Tanggal	Kondisi Cuaca 08:00-16:00	Suhu	Kelembapan	Kecepatan Angin
19 Juli 2026	Kabut, haze, awan lewat, dan Awan tersebar	25-31 °C	62-100%	4-13 km/jam
20 Juli 2026	Awan tersebar dan sebagian cerah	26-31 °C	66-89%	7-24 km/jam

Sumber : Timeanddate.com, Medan Weather History 19-20 Juli 2026

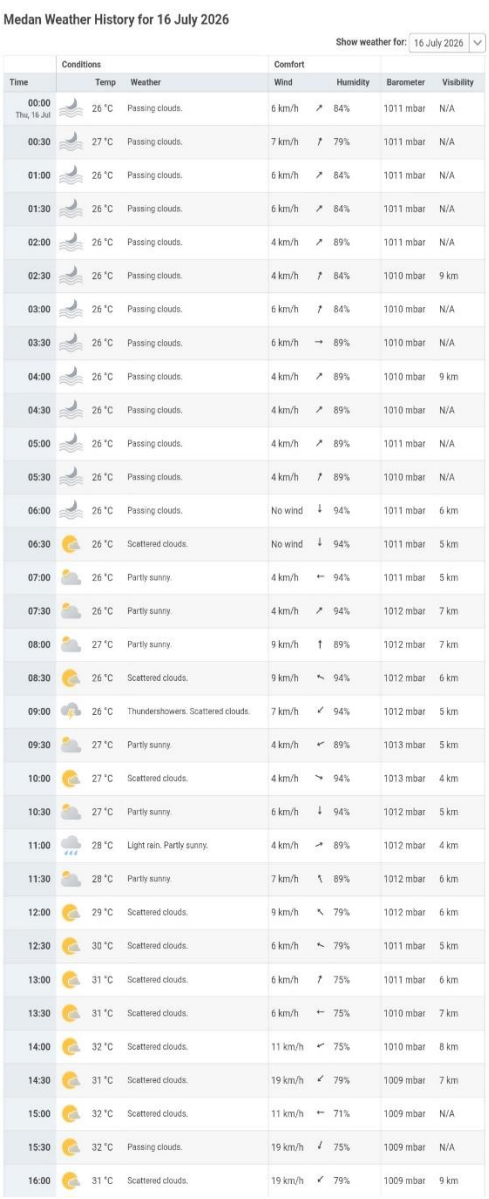
Lampiran 10 : Data cuaca saat pengambilan data pengujian berbeban (Vmp, Imp, Daya, dan Suhu)



Medan Weather History for 14 July 2026

Show weather for: 14 July 2026

Time	Conditions		Comfort				
	Temp	Weather	Wind		Humidity	Barometer	Visibility
00:00 Tue, 14 Jul	28 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	94%	1009 mbar	4 km
00:30	27 °C	Passing clouds.	9 km/h	↘	94%	1009 mbar	7 km
01:00	27 °C	Passing clouds.	7 km/h	↘	94%	1009 mbar	8 km
01:30	27 °C	Passing clouds.	6 km/h	↖	89%	1008 mbar	8 km
02:00	27 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	94%	1008 mbar	6 km
02:30	27 °C	Fog.	11 km/h	↘	94%	1008 mbar	5 km
03:00	26 °C	Thundershowers. Fog.	7 km/h	↘	94%	1008 mbar	5 km
03:30	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	94%	1008 mbar	6 km
04:00	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	94%	1008 mbar	6 km
04:30	26 °C	Fog.	4 km/h	↖	94%	1007 mbar	5 km
05:00	26 °C	Fog.	4 km/h	→	100%	1007 mbar	5 km
05:30	26 °C	Fog.	No wind	↓	100%	1007 mbar	5 km
06:00	26 °C	Fog.	4 km/h	↗	100%	1007 mbar	5 km
06:30	26 °C	Fog.	No wind	↓	100%	1008 mbar	2 km
07:00	26 °C	Fog.	No wind	↓	100%	1008 mbar	2 km
07:30	26 °C	Fog.	No wind	↓	100%	1009 mbar	2 km
08:00	26 °C	Fog.	No wind	↓	100%	1009 mbar	2 km
08:30	27 °C	Partly sunny.	4 km/h	↗	94%	1010 mbar	2 km
09:00	27 °C	Scattered clouds.	4 km/h	↗	94%	1010 mbar	3 km
09:30	28 °C	Scattered clouds.	7 km/h	↖	89%	1010 mbar	5 km
10:00	28 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↑	84%	1010 mbar	5 km
10:30	29 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↑	79%	1010 mbar	6 km
11:00	30 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↖	75%	1010 mbar	7 km
11:30	30 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↖	70%	1010 mbar	7 km
12:00	31 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↖	70%	1009 mbar	N/A
13:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	↖	66%	1009 mbar	N/A
13:30	31 °C	Scattered clouds.	15 km/h	↖	70%	1008 mbar	N/A
14:00	32 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↖	67%	1008 mbar	N/A
14:30	31 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↖	70%	1008 mbar	N/A
15:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	↖	70%	1007 mbar	N/A
15:30	32 °C	Scattered clouds.	13 km/h	↖	67%	1006 mbar	N/A
16:00	32 °C	Scattered clouds.	9 km/h	↖	63%	1007 mbar	N/A



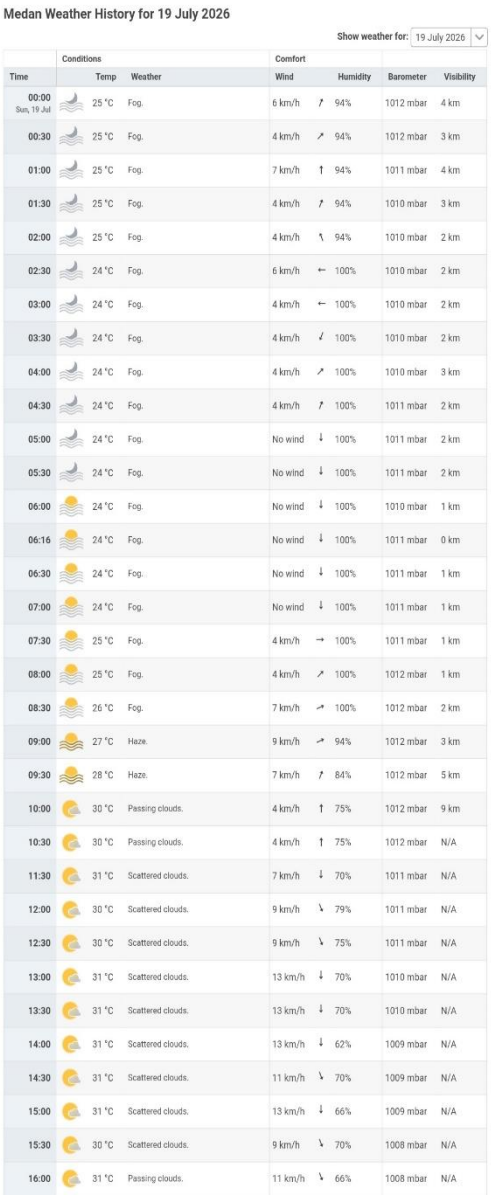
Medan Weather History for 16 July 2026

Show weather for: 16 July 2026

Time	Conditions		Comfort				
	Temp	Weather	Wind		Humidity	Barometer	Visibility
00:00 Thu, 16 Jul	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	84%	1011 mbar	N/A
00:30	27 °C	Passing clouds.	7 km/h	↗	79%	1011 mbar	N/A
01:00	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	84%	1011 mbar	N/A
01:30	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	84%	1011 mbar	N/A
02:00	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	89%	1011 mbar	N/A
02:30	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	84%	1010 mbar	9 km
03:00	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	↗	84%	1010 mbar	N/A
03:30	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	→	89%	1010 mbar	N/A
04:00	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	89%	1010 mbar	9 km
04:30	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	89%	1010 mbar	N/A
05:00	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	89%	1011 mbar	N/A
05:30	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	↗	89%	1010 mbar	N/A
06:00	26 °C	Passing clouds.	No wind	↓	94%	1011 mbar	6 km
06:30	26 °C	Scattered clouds.	No wind	↓	94%	1011 mbar	5 km
07:00	26 °C	Partly sunny.	4 km/h	←	94%	1011 mbar	5 km
07:30	26 °C	Partly sunny.	4 km/h	↗	94%	1012 mbar	7 km
08:00	27 °C	Partly sunny.	9 km/h	↑	89%	1012 mbar	7 km
08:30	26 °C	Scattered clouds.	9 km/h	↖	94%	1012 mbar	6 km
09:00	26 °C	Thundershowers. Scattered clouds.	7 km/h	↙	94%	1012 mbar	5 km
09:30	27 °C	Partly sunny.	4 km/h	↙	89%	1013 mbar	5 km
10:00	27 °C	Scattered clouds.	4 km/h	↘	94%	1013 mbar	4 km
10:30	27 °C	Partly sunny.	6 km/h	↓	94%	1012 mbar	5 km
11:00	28 °C	Light rain. Partly sunny.	4 km/h	↗	89%	1012 mbar	4 km
11:30	28 °C	Partly sunny.	7 km/h	↖	89%	1012 mbar	6 km
12:00	29 °C	Scattered clouds.	9 km/h	↖	79%	1012 mbar	6 km
12:30	30 °C	Scattered clouds.	6 km/h	↖	79%	1011 mbar	5 km
13:00	31 °C	Scattered clouds.	6 km/h	↗	75%	1011 mbar	6 km
13:30	31 °C	Scattered clouds.	6 km/h	←	75%	1010 mbar	7 km
14:00	32 °C	Scattered clouds.	11 km/h	↙	75%	1010 mbar	8 km
14:30	31 °C	Scattered clouds.	19 km/h	↙	79%	1009 mbar	7 km
15:00	32 °C	Scattered clouds.	11 km/h	←	71%	1009 mbar	N/A
15:30	32 °C	Passing clouds.	19 km/h	↓	75%	1009 mbar	N/A
16:00	31 °C	Scattered clouds.	19 km/h	↙	79%	1009 mbar	9 km

Tanggal	Kondisi Cuaca 08:00-16:00	Suhu	Kelembapan	Kecepatan Angin
14 Juli 2026	Kabut, sebagian cerah, awan tersebar	26-32 °C	63-100%	0-15 km/jam
16 Juli 2026	Sebagian cerah, awan tersebar, hujan ringan	26-32 °C	71-94%	4-19 km/jam

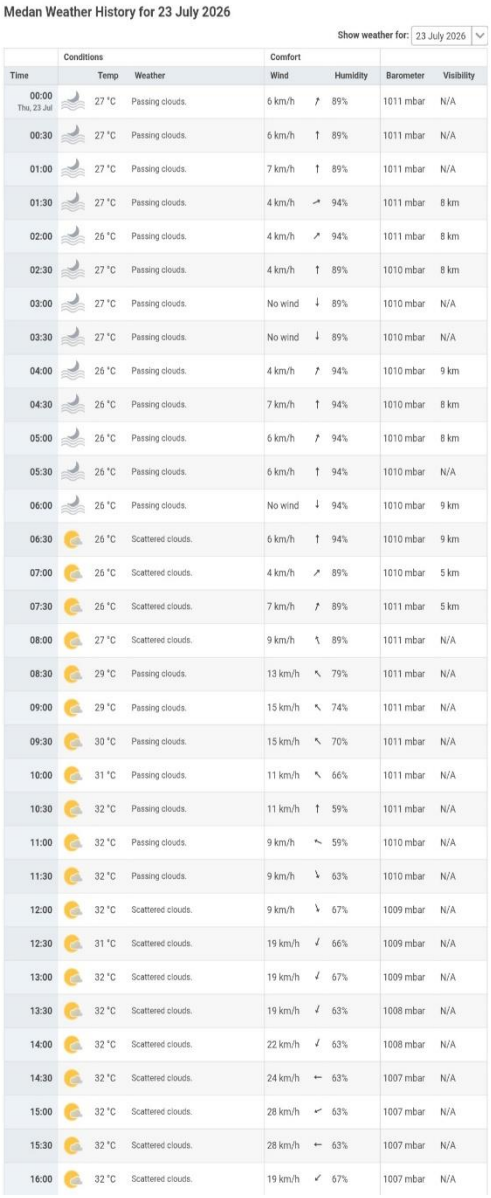
Sumber : Timeanddate.com, Medan Weather History 14,16,17,23 Juli 2026.



Medan Weather History for 19 July 2026

Show weather for: 19 July 2026

Time	Conditions		Comfort			
	Temp	Weather	Wind	Humidity	Barometer	Visibility
00:00 Sun, 19 Jul	25 °C	Fog.	6 km/h	94%	1012 mbar	4 km
00:30	25 °C	Fog.	4 km/h	94%	1012 mbar	3 km
01:00	25 °C	Fog.	7 km/h	94%	1011 mbar	4 km
01:30	25 °C	Fog.	4 km/h	94%	1010 mbar	3 km
02:00	25 °C	Fog.	4 km/h	94%	1010 mbar	2 km
02:30	24 °C	Fog.	6 km/h	100%	1010 mbar	2 km
03:00	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1010 mbar	2 km
03:30	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1010 mbar	2 km
04:00	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1010 mbar	3 km
04:30	24 °C	Fog.	4 km/h	100%	1011 mbar	2 km
05:00	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	2 km
05:30	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	2 km
06:00	24 °C	Fog.	No wind	100%	1010 mbar	1 km
06:16	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	0 km
06:30	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	1 km
07:00	24 °C	Fog.	No wind	100%	1011 mbar	1 km
07:30	25 °C	Fog.	4 km/h	100%	1011 mbar	1 km
08:00	25 °C	Fog.	4 km/h	100%	1012 mbar	1 km
08:30	26 °C	Fog.	7 km/h	100%	1012 mbar	2 km
09:00	27 °C	Haze.	9 km/h	94%	1012 mbar	3 km
09:30	28 °C	Haze.	7 km/h	84%	1012 mbar	5 km
10:00	30 °C	Passing clouds.	4 km/h	75%	1012 mbar	9 km
10:30	30 °C	Passing clouds.	4 km/h	75%	1012 mbar	N/A
11:30	31 °C	Scattered clouds.	7 km/h	70%	1011 mbar	N/A
12:00	30 °C	Scattered clouds.	9 km/h	79%	1011 mbar	N/A
12:30	30 °C	Scattered clouds.	9 km/h	75%	1011 mbar	N/A
13:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	70%	1010 mbar	N/A
13:30	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	70%	1010 mbar	N/A
14:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	62%	1009 mbar	N/A
14:30	31 °C	Scattered clouds.	11 km/h	70%	1009 mbar	N/A
15:00	31 °C	Scattered clouds.	13 km/h	66%	1009 mbar	N/A
15:30	30 °C	Scattered clouds.	9 km/h	70%	1008 mbar	N/A
16:00	31 °C	Passing clouds.	11 km/h	66%	1008 mbar	N/A



Medan Weather History for 23 July 2026

Show weather for: 23 July 2026

Time	Conditions		Comfort			
	Temp	Weather	Wind	Humidity	Barometer	Visibility
00:00 Thu, 23 Jul	27 °C	Passing clouds.	6 km/h	89%	1011 mbar	N/A
00:30	27 °C	Passing clouds.	6 km/h	89%	1011 mbar	N/A
01:00	27 °C	Passing clouds.	7 km/h	89%	1011 mbar	N/A
01:30	27 °C	Passing clouds.	4 km/h	94%	1011 mbar	8 km
02:00	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	94%	1011 mbar	8 km
02:30	27 °C	Passing clouds.	4 km/h	89%	1010 mbar	8 km
03:00	27 °C	Passing clouds.	No wind	89%	1010 mbar	N/A
03:30	27 °C	Passing clouds.	No wind	89%	1010 mbar	N/A
04:00	26 °C	Passing clouds.	4 km/h	94%	1010 mbar	9 km
04:30	26 °C	Passing clouds.	7 km/h	94%	1010 mbar	8 km
05:00	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	8 km
05:30	26 °C	Passing clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	N/A
06:00	26 °C	Passing clouds.	No wind	94%	1010 mbar	9 km
06:30	26 °C	Scattered clouds.	6 km/h	94%	1010 mbar	9 km
07:00	26 °C	Scattered clouds.	4 km/h	89%	1010 mbar	5 km
07:30	26 °C	Scattered clouds.	7 km/h	89%	1011 mbar	5 km
08:00	27 °C	Scattered clouds.	9 km/h	89%	1011 mbar	N/A
08:30	29 °C	Passing clouds.	13 km/h	79%	1011 mbar	N/A
09:00	29 °C	Passing clouds.	15 km/h	74%	1011 mbar	N/A
09:30	30 °C	Passing clouds.	15 km/h	70%	1011 mbar	N/A
10:00	31 °C	Passing clouds.	11 km/h	66%	1011 mbar	N/A
10:30	32 °C	Passing clouds.	11 km/h	59%	1011 mbar	N/A
11:00	32 °C	Passing clouds.	9 km/h	59%	1010 mbar	N/A
11:30	32 °C	Passing clouds.	9 km/h	63%	1010 mbar	N/A
12:00	32 °C	Scattered clouds.	9 km/h	67%	1009 mbar	N/A
12:30	31 °C	Scattered clouds.	19 km/h	66%	1009 mbar	N/A
13:00	32 °C	Scattered clouds.	19 km/h	67%	1009 mbar	N/A
13:30	32 °C	Scattered clouds.	19 km/h	63%	1008 mbar	N/A
14:00	32 °C	Scattered clouds.	22 km/h	63%	1008 mbar	N/A
14:30	32 °C	Scattered clouds.	24 km/h	63%	1007 mbar	N/A
15:00	32 °C	Scattered clouds.	28 km/h	63%	1007 mbar	N/A
15:30	32 °C	Scattered clouds.	28 km/h	63%	1007 mbar	N/A
16:00	32 °C	Scattered clouds.	19 km/h	67%	1007 mbar	N/A

Tanggal	Kondisi Cuaca 08:00-16:00	Suhu	Kelembapan	Kecepatan Angin
17 Juli 2026	Kabut, awan tersebar, berawan, badai petir	26-29 °C	84-100%	4-11 km/jam
23 Juli 2026	Awan lewat dan awan tersebar	27-32 °C	59-89%	9-28 km/jam

Sumber : Timeanddate.com, Medan Weather History 14,16,17,23 Juli 2026.

Lampiran 11 : Surat bimbingan Tugas Akhir

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Ppj/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003
https://fatek.umsu.ac.id fatek@umsu.ac.id umsumedan umsumedan umsumedan umsumedan
UMSU Unggul | Cerdas | Terpercaya
Bila menjawab surat ini agar disebutkan nomor dan tanggalnya

PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN
DOSEN PEMBIMBING

Nomor : 13/II.3AU/UMSU-07/F/2026

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik Elektro Pada Tanggal 06 Januari 2026 dengan ini Menetapkan :

Nama	: GILANG ASIARI
Npm	: 2207220009
Program Studi	: TEKNIK ELEKTRO
Semester	: 7 (TUJUH)
Judul Tugas Akhir	: OPTIMASI DAYA KELUARAN PANEL SURYA MONOKRISTALIN 20 WP MENGGUNAKAN SISTEM PENDINGIN PASIF HEATSINK .
Pembimbing	: NOORLY EVALINA ST.MT

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik ELEKTRO
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 17 Rajab 1447 H
06 Januari 2026 M

Dekan

Ir. Ade Faisal, ST., M.Sc., Ph.D
NIDN: 0123097203

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA (UMSU)
FAKULTAS TEKNIK

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : GILANG ASIARI

NPM : 2207220009

Jurusan : TEKNIK ELEKTRO

Judul Tugas Akhir : OPTIMASI DAYA KELUARAN PANEL SURYA MONOKRISTALIN 20 WP MENGGUNAKAN SISTEM PENDINGIN PASIF HEATSINK

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	6/1 - 2026	Acc Judul. Perbaiki format penulisan, tujuan	
2.	5/2 - 2026.	Perbaiki penulisan rumus	
3	10/2 - 2026	Perbaiki tempat & waktu penelitian	
4	27/2 - 2026	Perbaiki flowchart	
5	2/3 - 2026	Acc Seminar	

Mengetahui
Pembimbing I

2/3 2026 Acc Seminar

Noorly Evalina S.T, M.T

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA (UMSU)
FAKULTAS TEKNIK
LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : GILANG ASIARI
NPM : 2207220009
Jurusan : TEKNIK ELEKTRO
Judul Tugas Akhir : OPTIMASI DAYA KELUARAN PANEL SURYA MONOKRISTALIN 20 WP MENGGUNAKAN PENDINGIN PASIF HEATSINK DENGAN SISTEM PENGUKURAN BERBASIS ESP32

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
	27/7-2026	Perbaiki tabel data pada tabel Bab 4	
	30/7-2026.	Perbaiki analisa dari grafik yang dihasilkan	
	4/8-26	Acc Sidang	

Mengetahui
Pembimbing I

4/8-2026 Acc Sidang

Noorly Evalina S.T, M.T

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA (UMSU)
FAKULTAS TEKNIK
LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : GILANG ASIARI
NPM : 2207220009
Jurusan : TEKNIK ELEKTRO
Judul Tugas Akhir : OPTIMASI DAYA KELUARAN PANEL SURYA MONOKRISTALIN 20 WP MENGGUNAKAN PENDINGIN PASIF HEATSINK DENGAN SISTEM PENGUKURAN BERBASIS ESP32

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
	17/8-2021	Perbaiki temuan ordner dalam proposal	
	20/8-2021	Lanjutkan laporan	
	21/8-2021	Acc Sidang TA	

Mengetahui
Pembimbing I

21/8-2021 Acc

Noorly Evalina S.T, M.T

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Data Pribadi

Nama	: Gilang Asiari
Tempat/Tanggal Lahir	: Tanjung Uban, 22 Desember 2003
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Umur	: 22 Tahun
Agama	: Islam
Status	: Belum Kawin
Tinggi Badan/Berat Badan	: 173 cm / 66 kg
Kewarganegaraan	: Indonesia
Alamat	: JLN. DATUK SYAHBANDAR
No. Hp	: 089653629075
Email	: asiari.id@gmail.com

Data Orang Tua

Nama Ayah	: Suhendri
Agama	: Islam
Kewarganegaraan	: Indonesia
Nama Ibu	: Jubaidah Purba
Agama	: Islam
Kewarganegaraan	: Indonesia
Alamat	: JLN. DATUK SYAHBANDAR

Latar Belakang Pendidikan

RA Al-Islam Alamasri	(2009-2010)
SDN 001 Bintan Utara	(2010-2016)
SMPN 11 Bintan	(2016-2019)
SMKN 1 Bintan Utara	(2019-2022)
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara	(2022-2026)