



UIN SUSKA RIAU

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PHASE CHANGE MATERIAL DARI KOMPOSIT  
MINYAK JELANTAH DAN ASAM STEARAT SEBAGAI PENDINGIN PANEL SURYA  
TERHADAP DAYA OUTPUT YANG DIHASILKAN**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Prodi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

**KEENAN PIRSI ALKAUTSAR**  
**12150512138**

**UIN SUSKA RIAU**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU**

**PEKANBARU**

**2025**

Hak cipta milik UIN Suska Riau  
Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU

## LEMBAR PERSETUJUAN

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta milik Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

### STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PHASE CHANGE MATERIAL DARI KOMPOSIT MINYAK JELANTAH DAN ASAM STEARAT SEBAGAI PENDINGIN PANEL SURYA TERHADAP DAYA OUTPUT YANG DIHASILKAN

#### TUGAS AKHIR

oleh:

**KEENAN PIRSI ALKAUTSAR**  
**12150512138**

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro  
di Pekanbaru, pada tanggal 11 Juli 2025

Ketua Prodi Teknik Elektro

**Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T.**  
NIP. 19721021 200604 2 001

Pembimbing

**Marhama Jelita, S.Pd., M.Sc**  
NIP. 19851101 202521 2 004

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

ii



AnyScanner



## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PHASE CHANGE MATERIAL DARI KOMPOSIT MINYAK JELANTAH DAN ASAM STEARAT SEBAGAI PENDINGIN PANEL SURYA TERHADAP DAYA OUTPUT YANG DIHASILKAN

#### TUGAS AKHIR

oleh:

**KEENAN PIRSI ALKAUTSAR**

**12150512138**

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

di Pekanbaru, pada tanggal 11 Juli 2025

Pekanbaru, 11 Juli 2025

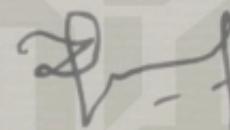
Mengesahkan,

Dekan



**Yuslenita Muda, M.Si.**  
NIP. 19770103 200710 2 001

Ketua Prodi Teknik Elektro



**Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T.**  
NIP. 19721021 200604 2 001

**DEWAN PENGUJI :**

Ketua : **Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T.**

Sekretaris : **Marhama Jelita, S.Pd., M.Sc.**

Anggota 1 : **Dr. H. Kunaifi, ST., PgDipEnSt., M.Sc.**

Anggota 2 : **Nanda Putri Miefthawati, B.Sc., M.Sc.**

**Dian Mursyitah**  
**Marhama Jelita**  
**Dr. H. Kunaifi**  
**Nanda Putri Miefthawati**

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau**



UIN SUSKA RIAU

## LEMBAR ATAS HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dan terbuka untuk umum dengan ketentuan hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan, dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

© Hak Cipta  
Sultan Syarif Kasim Riau  
Hak Cipta  
Sul  
penulis  
hanya  
menyebutkan  
sumbernya.  
S  
U  
N  
S  
U  
K  
A  
R  
I  
A  
U

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU

Saya yang betanda tangan dibawah ini :  
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

## LEMBAR PERNYATAAN

Nama : Keenan Pirsi Alkautsar  
NIM : 12150512138  
Tempat/Tgl. Lahir : Pekanbaru, 01 November 2002  
Program Studi : Teknik Elektro  
Fakultas : Sains dan Teknologi  
Judul Tugas Akhir :

### STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PHASE CHANGE MATERIAL DARI KOMPOSIT MINYAK JELANTAH DAN ASAM STEARAT SEBAGAI PENDINGIN PANEL SURYA TERHADAP DAYA OUTPUT YANG DIHASILKAN

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulis Artikel dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
2. Semua kutipan pada Karya Tulis saya ini sudah disebutkan sumbernya.
3. Oleh karena itu Artikel saya ini sah, saya nyatakan bebas dari plagiasi.
4. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam Artikel saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 17 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



**KEENAN PIRSI ALKAUTSAR**  
**NIM. 12150512138**

v

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



## LEMBAR PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan kekuatan-Nya, karya sederhana ini kupersembahkan untuk:

### Ayah dan Ibu tercinta

Sumber keteguhan dan ketulusan yang tak pernah padam. Terima kasih atas cinta yang tak bersyarat, doa-doa yang tak terdengar namun selalu terasa, serta setiap peluh dan pengorbanan yang mengiringi setiap langkahku.

**'Dan rendahkanlah dirimu terhadap mereka berdua dengan penuh kasih sayang dan ucapkanlah: 'Wahai Tuhanaku, kasihanilah mereka keduanya sebagaimana mereka telah mendidikku waktu kecil.'"**

(QS. Al-Isra: 24)

### Saudara-Saudariku Tersayang,

Yang menjadi bagian dari rumah, tawa, dan semangatku dalam setiap proses perjuanganku

### Para Dosen dan Pembimbing,

Yang telah dengan sabar menuntun, memberi ilmu, dan menanamkan nilai-nilai keilmuan serta integritas sepanjang perjalanan akademik ini.

### Rekan Seperjuangan dan Sahabat Sejati,

Yang hadir bukan hanya sebagai teman diskusi, tetapi juga sebagai penguat saat badai datang dan penawar lelah di tengah perjalanan.

### Almamaterku, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau,

Tempat di mana aku tumbuh, belajar, dan bermimpi lebih besar.

Karya ini bukanlah akhir, melainkan jejak awal dari perjalanan yang lebih luas. Semoga bermanfaat, menjadi amal jariyah, dan membuka jalan untuk karya-karya selanjutnya.

Pekanbaru, Juli 2025

Keenan Pirsi Alkautsar



UIN SUSKA RIAU

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PHASE CHANGE MATERIAL DARI KOMPOSIT  
MINYAK JELANTAH DAN ASAM STEARAT SEBAGAI PENDINGIN PANEL SURYA  
TERHADAP DAYA OUTPUT YANG DIHASILKAN**

Hak cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa ~~referensi dan menyebutkan sumber~~

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**KEENAN PIRSI ALKAUTSAR**  
**12150512138**

Tanggal Sidang : 11 Juli 2025

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jalan Soebrantas No.155 Pekanbaru

### **ABSTRAK**

Kinerja panel surya menurun akibat peningkatan suhu permukaan saat terkena sinar matahari langsung. Salah satu solusi untuk mengatasinya adalah sistem pendinginan pasif berbasis *Phase Change Material* (PCM). Penelitian ini menggunakan PCM dari campuran minyak jelantah dan asam stearat untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap daya output panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Phase Change Material (PCM) berpengaruh positif terhadap peningkatan kinerja panel surya. Panel dengan PCM cenderung menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan panel tanpa PCM, terutama pada kondisi intensitas cahaya tinggi. Selisih daya yang diamati melebihi batas toleransi alat ukur, sehingga perbedaan tersebut bukan disebabkan oleh kesalahan pengukuran, melainkan merupakan efek nyata dari keberadaan PCM sebagai sistem pendinginan pasif panel surya.

**Kata Kunci:** Panel Surya, *Phase Change Material* (PCM), Minyak Jelantah, Asam Stearat, Pendingin Pasif, Daya Output, Selisih Daya.

**UIN SUSKA RIAU**



UIN SUSKA RIAU

**EXPERIMENTAL STUDY OF PHASE CHANGE MATERIAL FROM USED  
COOKING OIL AND STEARIC ACID AS A COOLING SYSTEM FOR SOLAR  
PANEL OUTPUT POWER  
IMPROVEMENT**

**KEENAN PIRSI ALKAUTSAR**  
**12150512138**

*Date of final exam : 11 July 2025*

*Department of Electrical Engineering*

*Faculty of Science and Technology*

*State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau*

*Jalan Soebrantas No.155 Pekanbaru*

**ABSTRACT**

*The performance of solar panels decreases due to the rise in surface temperature when exposed to direct sunlight. One solution to address this issue is the use of a passive cooling system based on Phase Change Material (PCM). This study utilizes PCM made from a mixture of used cooking oil and stearic acid to evaluate its effect on the output power of solar panels. The results show that the use of PCM has a positive impact on improving the performance of solar panels. Panels equipped with PCM tend to produce higher power output compared to those without PCM, especially under high light intensity conditions. The observed power differences exceed the measurement instrument's tolerance range, indicating that the variation is not caused by measurement error, but is a real effect of PCM as a passive cooling system for solar panels.*

**Keywords:** Solar Panel, Phase Change Material (PCM), Used Cooking Oil, Stearic Acid, Passive Cooling, Power Output, Power Difference.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah Subhanahu Wata'ala yang telah memberikan kesempatan dan kesehatan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat beserta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan alam, pembawa cahaya bagi kehidupan manusia yakni nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wasallam, yang telah membawa dunia ini dari zaman jahiliah hingga zaman yang penuh dengan cahaya ilmu dan peradaban.

Penulisan Tugas Akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada program Sarjana S1 di UIN SUSKA Riau dengan membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir. Atas karunia Allah Subhanahu Wata'ala, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul

### **“STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PHASE CHANGE MATERIAL DARI KOMPOSIT MINYAK JELANTAH DAN ASAM STEARAT SEBAGAI PENDINGIN PANEL SURYA TERHADAP DAYA OUTPUT YANG DIHASILKAN”.**

Penyelesaian penelitian ini tentunya tidak terlepas dari do'a, dukungan, serta bantuan dari berbagai pihak yang dengan tulus telah memberikan ilmu, motivasi, dan kesempatan kepada penulis. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan terima kasih, penulis ingin menyampaikan rasa syukur dan apresiasi kepada:

1. Allah Subhanahu Wata'ala, dengan rahmat-Nya, telah memberikan segala yang terbaik dan, melalui hidayah-Nya, memberikan petunjuk yang memudahkan penulis dalam menyusun laporan ini dengan lancar.
2. Ayahanda tercinta, Sapirman Koto yang telah menjadi sosok teladan dalam memberikan semangat, inspirasi, serta nilai-nilai kehidupan yang berharga.
3. Ibunda tercinta, Susi Kamelia, yang selalu memberikan kasih sayang, do'a yang tiada henti, serta dukungan baik secara moril maupun materiil, yang menjadi sumber kekuatan atau penyemangat bagi penulis dalam menyelesaikan studi ini.



- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
4. Saudara dan saudari kandung penulis Galang Putra Sapirman, Aina Leticia Anasasic, Alif Alfarisi Rasyid, dan Basithita Anasasic yang telah memberikan motivasi dalam menyelesaikan tugas akhir.
5. Prof. Dr. Hj. Leny Nofianti, MS., SE., AK, CA. selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
6. Dr. Yuslenita Muda, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya yang telah memberikan dalam proses akademik penulis.
7. Dr. Zulfatri Aini ST.,MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
8. Sutoyo, S.T., M.T., selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau.
9. Marhama Jelita, S.Pd., M.Sc., selaku dosen pembimbing, yang telah menyumbangkan banyak waktu dan pemikirannya dengan penuh keikhlasan. Beliau memberikan penjelasan dan masukan yang sangat bermanfaat, sehingga penulis dapat lebih memahami dan menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Dukungan dan bimbingan beliau sangat berarti bagi penulis dalam proses ini.
10. Dr. Kunaifi, ST., PgDipEnst, M.Sc., selaku dosen penguji 1 yang telah memberikan masukan dan saran dalam proses penyusunan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik.
11. Nanda Putri Miefthawati, B.Sc., M.Sc., selaku dosen penguji 2 yang telah memberikan masukan dan saran berharga dalam proses penyusunan Laporan Tugas Akhir ini hingga terselesaikan dengan baik.
12. Putut Son Maria, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama perkuliahan dari awal semester hingga akhir semester.
13. Bapak Helmi, selaku teknisi laboratorium Fakultas Sains dan Teknologi untuk prodi Teknik Elektro yang telah memberikan arahan dan bimbingan dalam penggunaan peralatan untuk mendukung penelitian penulis.
14. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
15. Teman-Teman seperjuangan dalam Konsentrasi Energi 2021 serta teman-teman teknik elektro angkatan 2021 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini serta teman-teman penulis

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan dorongan, motivasi dan curahan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini sesuai dengan prosedur yang berlaku di Jurusan Teknik Elektro. Tanpa dorongan dan kontribusi dari berbagai pihak, tugas ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah meluangkan waktu dan tenaga. Semoga segala kebaikan yang diberikan mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah Subhanahu Wata'ala. Penulis berharap bahwa Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, baik bagi diri sendiri maupun bagi pembaca secara umum.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Kesempurnaan hanya milik Allah Subhanahu Wata'ala, sementara segala keterbatasan dalam penulisan ini berasal dari penulis sendiri. Oleh sebab itu, penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran yang membangun demi perbaikan serta penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Pekanbaru, 07 Juli 2025  
Penulis

**Keenan Pirsy Alkautsar**  
**NIM.1215051238**



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PERSETUJUAN.....</b>	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	iii
<b>LEMBAR ATAS HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL.....</b>	iv
<b>LEMBAR PERNYATAAN .....</b>	v
<b>LEMBAR PERSEMBAHAN .....</b>	vi
<b>ABSTRAK .....</b>	vii
<b>ABSTRACT .....</b>	viii
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	ix
<b>DAFTAR ISI .....</b>	xii
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	xvi
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	xvi
<b>DAFTAR RUMUS .....</b>	xviii
<b>DAFTAR LAMBANG/NOTASI.....</b>	xix
<b>DAFTAR SINGKATAN .....</b>	xx
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	I-1
1.1    Latar Belakang .....	I-1
1.2    Rumusan Masalah .....	I-4
1.3    Tujuan Penelitian .....	I-4
1.4    Batasan Penelitian .....	I-5
1.5    Manfaat Penelitian.....	I-5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	II-1
2.1    Penelitian Terkait .....	II-1
2.2    Teori Fotovoltaik.....	II-3
2.3    Sel Surya.....	II-4
2.4    Jenis-Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya .....	II-5
2.4.1    Grid-connected PV systems .....	II-5
2.4.2    Stand-alone PV systems.....	II-6
2.4.3    Hybrid PV Systems .....	II-7
2.5    Komponen Utama Sistem Panel Surya.....	II-7
2.5.1    Sel Surya.....	II-7
2.5.2    Charge Controller .....	II-8
2.5.3    Baterai .....	II-9



2.5.4	Inverter .....	II-10
2.5.5	Beban .....	II-10
2.6	Faktor Pengoperasian Panel Surya .....	II-12
2.6.1	Karakteristik Panel Surya terhadap Temperatur .....	II-12
2.6.2	Karakteristik Panel Surya terhadap Intensitas Cahaya .....	II-13
2.6.3	Orientasi Panel Surya .....	II-13
2.6.4	Posisi Matahari dan Penentuan Sudut Kemiringan Panel Surya .....	II-13
2.6.5	Kecepatan Angin .....	II-14
2.6.6	<i>Shading</i> atau Bayangan .....	II-14
2.7	Parameter Utama Kinerja Sel Surya .....	II-15
2.7.1	<i>Short Circuit Density (Jsc)</i> .....	II-15
2.7.2	<i>Open-Circuit Voltage (Voc)</i> .....	II-15
2.7.3	<i>Fill Factor (FF)</i> .....	II-15
2.7.4	<i>Hukum Ohm</i> .....	II-16
2.8	Kalor .....	II-17
2.8.1	Perpindahan Kalor secara Konduksi .....	II-17
2.8.2	Perpindahan Kalor secara Konveksi .....	II-17
2.8.3	Perpindahan Kalor secara Radiasi .....	II-17
2.8.4	Kalor Jenis ( <i>Specific Heat Capacity</i> ) .....	II-18
2.8.5	Kalor Laten .....	II-18
2.9	Teknologi Pendinginan Panel Surya .....	II-18
2.10	<i>Phase Change Material (PCM)</i> .....	II-19
2.11	Standar Mutu Minyak Goreng .....	II-22
2.11.1	Perubahan Warna dan Bau .....	II-22
2.11.2	Kadar Air dalam Minyak Goreng .....	II-23
2.11.3	Kadar Asam Lemak Bebas pada Minyak Goreng .....	II-23
2.11.4	Bilangan Peroksida .....	II-24
2.12	Sistem Alat Ukur pada PLTS .....	II-24
2.12.1	Perangkat <i>Hardware</i> untuk <i>Monitoring</i> Sistem PLTS .....	II-24
2.12.2	Perangkat <i>Software</i> untuk <i>Monitoring</i> Sistem PLTS .....	II-26
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>III-1</b>
3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian .....	III-1
3.2	Perencanaan Penelitian .....	III-2

3.2.1	Identifikasi Masalah .....	III-2
3.2.2	Penentuan Judul .....	III-2
3.2.3	Rumusan Masalah .....	III-2
3.2.4	Tujuan Penelitian.....	III-2
3.2.5	Batasan Penelitian .....	III-2
3.3	Kajian Literatur .....	III-2
3.4	Pengumpulan Data .....	III-3
3.5	Mengonfigurasi Sistem Panel Surya Beserta Alat Ukur.....	III-6
3.5.1	Pengujian Awal Alat Ukur (Referensi Kalibrasi).....	III-6
3.5.2	Konfigurasi Rangkaian Sistem Panel Surya .....	III-6
3.5.3	Pengujian Panel Surya Tanpa Pendingin .....	III-9
3.6	Mengetahui Kadar ALB pada Minyak Jelantah.....	III-10
3.7	Menentukan Rasio Campuran PCM.....	III-11
3.7.1	Pembuatan Sampel .....	III-11
3.7.2	Proses Pencampuran.....	III-12
3.7.3	Penentuan Titik Leleh.....	III-12
3.8	Mengintegrasikan PCM dan Aluminium <i>Foil</i> ke Panel Surya .....	III-13
3.9	Analisis Hasil dan Pembahasan .....	III-14
3.9.1	Metode Pengujian .....	III-15
3.9.2	Parameter yang Diukur.....	III-15
3.9.3	Waktu Pengambilan Data dan Kondisi Pengujian .....	III-15
3.10	Kesimpulan dan Saran.....	III-16
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>IV-1</b>
4.1	Hasil Pengujian Awal Sistem Panel Surya.....	IV-1
4.1.1	Pengujian Referensi Awal Sistem Pengukuran Panel Surya .....	IV-1
4.1.2	Pengujian Awal Sistem Pengukuran Panel Surya.....	IV-2
4.2	Hasil Pengujian Kadar ALB pada Minyak Jelantah.....	IV-8
4.2.1	Tujuan Pengujian .....	IV-8
4.2.2	Penentuan kadar Asam Lemak Bebas pada Minyak Jelantah .....	IV-8
4.2.3	Data Hasil Pengujian.....	IV-8
4.2.4	Perhitungan Kadar ALB.....	IV-9
4.3	Hasil Uji Titik Leleh PCM Komposit Minyak Jelantah dan Asam Stearat .....	IV-9
4.3.1	Tujuan Pengujian .....	IV-9



4.3.2	Data Komposisi dan Persiapan Sampel .....	IV-10
4.3.3	Data Hasil Pengukuran Titik Leleh .....	IV-10
4.4	Integrasi PCM ke Panel Surya .....	IV-11
4.5	Hasil Pengujian Panel Surya dengan dan Tanpa PCM .....	IV-13
4.5.1	Pengujian Pertama 6 Juli 2025 .....	IV-13
4.5.2	Pengujian Kedua 8 Juli 2025 .....	IV-17
	<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>IV-21</b>

5.1.	Kesimpulan .....	V-1
5.2.	Saran .....	V-1

## **DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN A**

**LAMPIRAN B**

**LAMPIRAN C**

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Jenis-Jenis Sel Surya dan Inovasi Terbaru .....	II-5
Gambar 2.2 Skema Sistem PLTS <i>On-Grid</i> .....	II-6
Gambar 2.3 Sistem PLTS <i>Off-Grid</i> .....	II-7
Gambar 2.4 Skema PLTS <i>Hybrid</i> .....	II-7
Gambar 2.5 Sel Surya (A) dan Modul Surya (B) .....	II-8
Gambar 2.6 <i>Microinverters</i> (A); <i>String Inverters</i> ; <i>Central Inverters</i> (C).....	II-10
Gambar 2.7 Pengaruh Suhu terhadap Tegangan dan Arus Output Panel Surya (I-V) ..	II-12
Gambar 2.8 Pengaruh Suhu terhadap Daya Output Panel Surya (P-V) .....	II-12
Gambar 2.9 Hubungan Intensitas Cahaya Matahari dan Daya Keluaran Panel Surya..	II-13
Gambar 2.10 Variasi Sudut Deklinasi Matahari .....	II-14
Gambar 2. 11 Mekanisme Kerja PCM .....	II-19
Gambar 2.12 Klasifikasi <i>Phase Change Material</i> .....	II-21
Gambar 2.13 Kurva Standar <i>Heating</i> .....	II-22
Gambar 2.14 Modul ESP 32 .....	II-24
Gambar 2.15 Sensor BH1750 .....	II-25
Gambar 2.16 DHT22 .....	II-25
Gambar 2.17 LCD I2C.....	II-26
Gambar 2.18 Voltampere Meter 4 Digit DC.....	II-26
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	III-1
Gambar 3.2 Sistem Panel Surya yang akan Diterapkan .....	III-7
Gambar 3.3 Skema <i>Wiring</i> Sistem Alat Ukur .....	III-8
Gambar 3. 4 Skema Blok Diagram Sistem Alat Ukur .....	III-8
Gambar 4.1 Hasil Ukur Tegangan dan Arus pada Kedua Voltampere Meter 1 dan 2 ..	IV-1
Gambar 4.2 Pola Perubahan Selisih Daya Antar Panel dengan Kondisi Tanpa PCM ..	IV-4
Gambar 4.3 Proses Integrasi Aluminium Foil (A) dan PCM (B).....	IV-12
Gambar 4.4 Selisih Output Daya Panel Surya pada Dua Kondisi Pengujian .....	IV-15
Gambar 4.5 Selisih Daya dengan PCM dan Tanpa PCM 3 Kondisi .....	IV-20

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

<b>Table</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 2.1 Material Semikonduktor Beserta <i>Bandgap</i> .....	II-4
Tabel 2.2 Keunggulan dan Kelemahan pada Jenis-Jenis Baterai .....	II-9
Tabel 3.1 Spesifikasi Panel Surya.....	III-3
Tabel 3.2 Spesifikasi BH 1750 .....	III-3
Tabel 3.3 Spesifikasi ESP32.....	III-4
Tabel 3.4 Spesifikasi DHT22 .....	III-5
Tabel 3.5 Spesifikasi LCD I2C.....	III-5
Tabel 3.7 <i>Wiring</i> Sistem Alat Ukur .....	III-9
Tabel 4.1 Hasil Ukur Kedua Voltampere Meter pada Beban Resistor .....	IV-2
Tabel 4.2 Hasil Voltampere Meter pada Panel - 1 Juli 2025 (Tanpa Pendingin).....	IV-3
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Daya Voltampere Meter Tanpa Pendingin- 1 Juli 2025 ....	IV-3
Tabel 4.4 Rentang Toleransi Tegangan, Arus, dan Daya pada 11.10 WIB (1 Juli). ....	IV-6
Tabel 4.5 Rentang Daya Berdasarkan Toleransi Pengukuran Tanpa PCM .....	IV-7
Tabel 4.6 Data Hasil Titrasi ALB Minyak Jelantah .....	IV-9
Tabel 4.7 Komposisi Campuran PCM .....	IV-10
Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Titik Leleh PCM .....	IV-10
Tabel 4.9 Hasil Uji Panel Surya Pendingin dan Tanpa Pendingin ( 6 Juli 2025).....	IV-13
Tabel 4.10 Perbandingan Daya Panel Surya dengan dan tanpa PCM (6 Juli 2025).....	IV-14
Tabel 4.11 Tabel Perbandingan Rata-Rata Daya Panel Surya – 6 Juli 2025 .....	IV-14
Tabel 4.12 Rentang Tegangan, Arus, dan Daya pada 11.10 WIB (6 Juli) .....	IV-16
Tabel 4.13 Rentang Daya dengan Toleransi Pengukuran Tanpa dan dengan PCM .....	IV-17
Tabel 4.14 Hasil Uji Panel Surya Pendingin dan Tanpa Pendingin (8 Juli 2025).....	IV-18
Tabel 4.15 Perbandingan Daya Panel Surya dengan dan tanpa PCM (8 Juli 2025).....	IV-18
Tabel 4.16 Tabel Perbandingan Rata-Rata Daya Panel Surya – 8 Juli 2025 .....	IV-20
Tabel 4.17 Hasil Rentang Tegangan, Arus, dan Daya pada 11.10 WIB - 8 Juli .....	IV-21
Tabel 4.18 Rentang Pengukuran Daya Tanpa dan dengan PCM - 8 Juli 2025 .....	IV-21



UIN SUSKA RIAU

**Hak Cipta Dilindungi Hukum Undang**  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta Milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

## DAFTAR RUMUS

- Persamaan Hukum Ohm  
Persamaan Turunan Hukum Ohm  
Persamaan Daya  
Persamaan Kadar ALB



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
Ampere  
Ampere-jam  
Elektronvolt  
Gigabyte  
Kilojoule per kilogram  
Kilobita  
Miliampere  
Miliampere per sentimeter persegi  
Megabyte  
Megahertz  
Mililiter  
Milimeter  
Milivolt  
Mikrovolt  
Nanometer  
Parts per million  
Revolutions per minute  
Sekon  
Volt  
Watt per meter-kelvin  
Derajat celsius  
Theta

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## DAFTAR LAMBANG/NOTASI



Hak Cipta milik UIN Suska Riau  
Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

## DAFTAR SINGKATAN

- : *Alternating Current* (Arus Bolak-Balik)  
: *Analog to Digital Converter*  
: *Boron Nitride*  
: *Cadmium Telluride*  
: *Central Processing Unit*  
: *Digital to Analog Converter*  
: *Direct Current*  
: *Digital Input/Output*  
: *Expanded Graphite*  
: Energi dan Sumber Daya Mineral  
: *Ground*  
: *General Purpose Input/Output*  
: *Inter-Integrated Circuit*  
: Megahertz  
: *Printed Circuit Board*  
: *Phase Change Material*  
: Pembangkit Listrik Tenaga Surya  
: *Polycrystalline Silicon*  
: *Pulse Width Modulation*  
: *Solar Charge Controller*  
: *Serial Clock Line*  
: *Serial Data Line*  
: *System Management Bus*  
: *Serial Peripheral Interface*  
: *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*  
: *Universal Serial Bus*  
: *Voltage Common Collector* (Tegangan Catu Daya)  
: *Wireless Fidelity*  
: *Wi-Fi Protected Access*  
: Lintang Utara  
: Bujur Timur

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sedangkan atau seluruh karya tulis ini tanpa memperantaukan dan menyertakan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Indonesia, yang terletak di kawasan tropis dengan paparan sinar matahari yang melimpah sepanjang tahun, memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi surya. Dari data yang diperoleh bahwa potensi energi surya Indonesia diperkirakan mencapai 3.294 (GW), namun demikian untuk sementara pemanfaatannya baru sekitar 0,3 GW atau 0,01 % [1]. Pemerintah Indonesia juga telah aktif mendukung pengembangan energi surya dengan memberikan insentif dan regulasi yang mempermudah masyarakat dan industri untuk mengadopsi teknologi ini, seperti Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang pembangkit listrik tenaga surya atap [2]. Dengan adanya regulasi ini, implementasi energi surya diharapkan meningkat di berbagai sektor, baik untuk kebutuhan rumah tangga, perkantoran, maupun industri.

Meskipun energi surya menawarkan potensi besar, pengoptimalan kinerja panel surya masih menghadapi beberapa tantangan, terutama terkait pengaruh suhu terhadap kinerjanya, yakni daya listrik yang dihasilkan. Berdasarkan hasil studi yang telah dilakukan bahwa efisiensi sel surya mengalami penurunan dari 19,63% pada suhu 0°C dan menjadi 13,73% pada suhu 50°C. Dengan demikian, efisiensinya menurun sebesar 5,9% seiring dengan peningkatan suhu dari 0°C hingga 50°C [3]. Selain itu, terdapat penelitian yang dilakukan oleh [4] bahwa arus keluaran panel surya meningkat saat suhu dan radiasi matahari naik, tetapi efisiensi daya menurun karena tegangan turun pada suhu tinggi. Panel memiliki koefisien temperatur negatif terhadap daya yang dihasilkan. Penelitian yang dilakukan oleh [5] bahwa suhu tinggi menurunkan tegangan rangkaian terbuka (Voc) akibat menurunnya efisiensi material semikonduktor, dengan degradasi tertinggi pada panel silikon amorf hingga 92% dalam 2 tahun, penurunan efisiensi sebesar 0,65%–0,08% per °C pada panel poli dan monokristalin, serta penurunan Voc sekitar 2,5 mV/°C pada panel CdTe. Mengingat Indonesia memiliki suhu lingkungan yang sering mencapai 30–35°C bahkan lebih tinggi di beberapa wilayah, masalah ini menjadi kendala utama dalam mencapai efisiensi maksimum dalam penggunaan panel surya.

Peningkatan suhu pada panel surya disebabkan oleh serapan panas dari radiasi matahari yang berdampak tidak semuanya diubah menjadi energi listrik. Hal ini terjadi karena spektrum cahaya matahari mempengaruhi energi foton yang diterima oleh sel surya.

[6]. Spektrum matahari mencakup berbagai panjang gelombang, mulai dari ultraviolet (UV)

hingga inframerah dalam rentang 280 nm hingga 2500 nm, dengan sekitar 52% energi

berasal dari wilayah inframerah (>780 nm) dan 45% dari cahaya tampak (390-780 nm) [6].

Energi foton bergantung pada panjang gelombangnya, di mana foton dengan panjang

gelombang lebih pendek memiliki energi foton yang lebih tinggi. Namun, material

semikonduktor dalam panel surya hanya dapat menyerap foton dengan energi yang sesuai

dengan energi celah pitanya. Foton dengan energi di bawah *bandgap* tidak memiliki cukup

energi untuk menghasilkan eksitasi elektron, sementara foton dengan energi di atas *bandgap*

mengalami *thermalization loss*, di mana kelebihan energinya dilepaskan dalam bentuk panas

[7]. Akumulasi panas ini menyebabkan kenaikan suhu pada permukaan panel, yang semakin

diperburuk oleh faktor lingkungan seperti suhu udara sekitar, intensitas radiasi matahari, dan

aliran pendinginan yang kurang optimal [8].

Untuk mengatasi dampak kenaikan suhu pada panel surya, salah satu solusi yang bisa

digunakan adalah pendinginan aktif, yaitu metode yang membutuhkan energi tambahan dari

luar untuk menurunkan suhu panel agar kinerjanya optimal. Seperti pada penelitian [9] yang

menggunakan penyemprotan air dengan bantuan pompa DC dan juga pengontrol suhu air

menggunakan *peltier* dan *fan*, serta hasilnya terbukti mampu meningkatkan daya keluaran

panel surya hingga 30,19% dengan menjaga suhu panel di bawah 40 °C. Pada penelitian [10]

dibuat sistem pendingin otomatis menggunakan pompa DC 12V dan pipa kapiler tembaga

di bagian belakang panel surya untuk mengalirkan air, dengan hasil daya rata-rata meningkat

dari 5,13 watt menjadi 6,15 watt, dan suhu panel turun dari 57,74 °C menjadi 50,39 °C.

Selain pendinginan aktif, ada juga pendinginan pasif yang tidak butuh energi

tambahan dari luar, sehingga lebih sederhana dan lebih hemat, salah satunya adalah

penggunaan *Phase Change Material* (PCM). PCM merupakan bahan yang bekerja dengan

menyerap panas saat terjadi perubahan fase dari padat ke cair. Pada penelitian [11],

dibandingkan tiga jenis PCM (*soy wax*, parafin, dan *beeswax*) untuk panel surya 50 Wp, dan

hasilnya menunjukkan *beeswax* paling efektif, menurunkan suhu rata-rata menjadi 42,6°C,

dan suhu maksimum turun dari 60,7°C menjadi 52,5°C. Sementara itu, penelitian [12] dan

[13] juga mengkaji aplikasi PCM, namun pada objek yang berbeda. Penelitian [12]

menggunakan PCM-parafin dengan kombinasi aluminium foil untuk mendinginkan modul

baterai lithium-ion serta hasilnya dapat menurunkan suhu hingga 36,2°C, atau 20% lebih

rendah dibandingkan konveksi paksa. Sementara itu, penelitian [13] mengembangkan PCM

dari asam stearat yang dicampur HDPE dan *carbon fiber*, dan hasilnya membuat

konduktivitas panas meningkat 2,22 kali dibandingkan asam stearat murni, sehingga lebih

baik dalam menyerap dan melepaskan panas.

Melalui berbagai hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa PCM memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi termal suatu sistem, terutama jika dikombinasikan dengan bahan lain untuk mengatasi keterbatasan sifat fisiknya. Namun, sebagian besar bahan PCM komersial seperti *beeswax*, parafin, dan asam stearat relatif tergolong mahal. Hal ini mendorong pencarian alternatif yang lebih murah dan ramah lingkungan. Salah satu bahan yang berpotensi digunakan sebagai PCM alternatif adalah minyak jelantah. Minyak jelantah merupakan limbah rumah tangga yang mudah ditemukan dan memiliki sifat termal yang mendukung, seperti kalor laten pelelehan sebesar 97,7 kJ/kg dan konduktivitas termal 0,155 W/m·K, yang hampir setara dengan minyak kelapa sebagai PCM alami [14]. Meski demikian, minyak jelantah memiliki beberapa kelemahan jika diaplikasikan sebagai pendingin panel surya, seperti mudah bocor saat dalam fase cair dan konduktivitas termalnya masih rendah.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, diperlukan zat tambahan untuk mengatasi keterbatasan minyak jelantah, seperti dicampur dengan asam stearat. Asam stearat memiliki titik leleh yang stabil, tidak mudah menguap, serta kompatibel bila dicampurkan dengan bahan organik seperti minyak. Dengan pencampuran ini, diharapkan performa termal minyak jelantah dapat meningkat dan lebih layak digunakan sebagai PCM dalam sistem pendinginan pasif.

Selain itu, untuk mendukung pemanfaatan minyak jelantah sebagai PCM, perlu diketahui sifat kimianya, terutama kandungan asam lemak bebas yang memengaruhi kestabilan termal dan perubahan fasanya. Berdasarkan penelitian [14], hasil uji *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) menunjukkan bahwa PCO (minyak segar) membeku antara 3,2°C–0,6°C dan mencair pada 5,2°C–6,1°C, sedangkan WPCO (minyak bekas) membeku pada 3,4°C–0,6°C dan mencair kembali pada 5,2°C–7,0°C. Perbedaan ini menunjukkan adanya *thermal hysteresis*, yaitu selisih suhu antara pembekuan dan peleburan yang umum terjadi pada bahan campuran seperti minyak, yang tersusun dari berbagai senyawa asam lemak dan zat terlarut lainnya [14]. Variasi jenis dan konsentrasi asam lemak bebas akibat pemakaian ulang turut memengaruhi perbedaan karakteristik termal tersebut. Oleh karena itu, dilakukan pengujian kadar asam lemak bebas hanya sebagai informasi tambahan untuk memperjelas parameter minyak jelantah yang digunakan.

Berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang lebih banyak menggunakan bahan PCM organik komersial seperti parafin dan *beeswax*, maka pada penelitian ini dikembangkan alternatif PCM dari bahan limbah, yaitu minyak jelantah yang dicampur dengan asam stearat, untuk menilai potensi penggunaannya sebagai pendingin pasif pada panel surya.

Merujuk pada permasalahan peningkatan suhu yang dapat menurunkan efisiensi panel surya, penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem panel surya lengkap dengan alat ukur untuk mengetahui tegangan, arus, intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban udara. Setelah diperoleh rasio campuran dengan titik leleh tertinggi, material PCM tersebut kemudian ditempatkan di bagian belakang panel surya, dilapisi aluminium foil untuk membantu distribusi panas. Pengaruh penggunaan PCM dievaluasi melalui perbandingan daya output antara panel dengan dan tanpa PCM, dengan mempertimbangkan pula rentang toleransi alat ukur untuk memastikan bahwa perbedaan daya yang terjadi benar-benar disebabkan oleh pengaruh material pendingin tersebut. Merujuk pada latar belakang, penelitian ini mengangkat judul **“Studi Eksperimental Pengaruh Phase Change Material dari Komposit Minyak Jelantah dan Asam Stearat sebagai Pendingin Panel Surya terhadap Daya Output yang Dihasilkan”**.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana konfigurasi sistem panel surya dengan sistem pengukurannya?
2. Berapa kadar asam lemak bebas (ALB) pada minyak jelantah yang digunakan ?  
3. Bagaimana menentukan rasio campuran minyak jelantah dan asam stearat dengan titik leleh tinggi yang optimal sebagai pendingin panel surya ?  
4. Bagaimana mengintegrasikan PCM ke panel surya serta pengaruhnya terhadap daya keluaran dibandingkan dengan sistem tanpa PCM?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengonfigurasi sistem panel surya dengan sistem pengukurannya.
2. Mengetahui kadar asam lemak bebas pada minyak jelantah sebagai indikator sifat minyak jelantah yang digunakan.
3. Menentukan rasio campuran minyak jelantah dan asam stearat dengan titik leleh tinggi yang optimal sebagai pendingin panel surya.
4. Mengintegrasikan PCM ke dalam sistem panel surya serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap daya keluaran dibandingkan dengan sistem tanpa PCM.

#### Batasan Penelitian

© Hak cipta milik UIN Suska Riau  
Penelitian ini berfokus untuk mengetahui perbedaan daya output antara panel surya yang menggunakan pendingin PCM dan yang tidak. Sensor BH1750 serta DHT22 digunakan sebagai data pendukung untuk memantau kondisi intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban udara yang dapat memengaruhi performa panel. Pengaruh kecepatan angin dan *soiling* pada penelitian ini diabaikan.

Pengambilan data pengujian daya output panel surya dilakukan di lingkungan terbuka (*outdoor*) dengan memastikan kondisi cuaca tidak mendung, baik saat cerah maupun berawan.

Penelitian ini menggunakan sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya dalam satuan lux, sehingga tidak merepresentasikan langsung intensitas radiasi matahari seperti pada solar power meter.

#### Manfaat Penelitian

1. Manfaat bagi mahasiswa yakni dapat meningkatkan keterampilannya dalam eksperimen laboratorium, analisis data, dan penyusunan laporan ilmiah, serta menambah wawasan dalam penerapan teknologi pendinginan panel surya berbasis *Phase Change Material* (PCM).
2. Manfaat bagi para peneliti yakni mendapatkan referensi baru dalam pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan PCM, serta membantu dalam pengembangan teknologi pendinginan panel surya.

Manfaat bagi dosen yakni dapat digunakan sebagai bahan ajar dalam mata kuliah energi terbarukan atau termal, serta menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut yang dapat dipublikasikan atau dijadikan proyek kolaborasi dengan industri.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### Penelitian Terkait

Kajian literatur penting dilakukan sebelum melakukan penelitian untuk memperoleh referensi yang relevan dalam mendukung penelitian. Sumber referensi dapat berupa buku, jurnal, prosiding, ataupun website resmi yang bereputasi terpercaya. Hasil dari kajian ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan langkah eksperimen yang tepat dan memastikan penerapan PCM berdasarkan literatur yang tersedia.

Penelitian [14] bertujuan untuk menganalisis potensi minyak jelantah sebagai material penyimpanan energi termal dengan menentukan sifat termalnya. Metode penelitian yang digunakan meliputi penentuan komposisi senyawa PCM menggunakan *Gas Chromatography (GC) Agilent 7890 b*, analisa perubahan fase menggunakan metode *T-history*, pengukuran kapasitas panas menggunakan *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* tipe 214 *Polyma Brand NETZCSH*, serta pengukuran konduktivitas termal menggunakan *TCi Thermal Conductivity Analyzer Brand C-Therm*. Hasil penelitian menunjukkan adanya perubahan jenis dan komposisi asam lemak dalam minyak selama proses penggorengan, seperti peningkatan kandungan metil arakidat dari 10,71% menjadi 45,68% pada minyak jelantah kelapa sawit. Selain itu, minyak jelantah kelapa memiliki panas laten pelelehan sebesar 97,7 kJ/kg dan konduktivitas termal 0,153 W/m.K, yang menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi penyimpanan energi termal.

Penelitian [12] bertujuan untuk meningkatkan sistem manajemen termal pada modul kapasitor lithium-ion (LiC) dengan menggunakan PCM berbasis parafin. Metode yang digunakan mencakup simulasi dan eksperimen untuk membandingkan konveksi paksa (tanpa PCM), PCM murni, dan PCM yang dikombinasikan dengan aluminium *foil* (PCM-Al) guna meningkatkan konduktivitas termal. Hasilnya menunjukkan bahwa PCM-Al mampu menurunkan suhu maksimum modul hingga 36,2°C, dibandingkan 41,6°C pada PCM murni dan lebih tinggi lagi pada konveksi paksa. Secara persentase, PCM-Al mampu menurunkan suhu hingga 20% dibandingkan konveksi paksa dan 13% dibandingkan PCM murni, dengan ketebalan optimal 7 mm untuk keseimbangan antara performa, biaya, dan berat sistem.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tanpa mendapat izin dan menyebutkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Penelitian [13] bertujuan untuk mengembangkan *Composite Phase Change Material* (PCM) dengan mengenkapsulasi asam stearat ke dalam *high-density polyethylene* (HDPE) untuk mencegah kebocoran, serta menambahkan serat karbon guna meningkatkan konduktivitas termal. Metode pencampurannya adalah impregnasi leleh, di mana asam stearat dilarutkan dengan etanol untuk mempercepat larutan dan dicampur dengan HDPE cair pada 180°C, lalu serat karbon ditambahkan ke dalam campuran dan diaduk pada 1000 rpm sebelum didinginkan. Hasil penelitian menunjukkan distribusi asam stearat yang baik tanpa kebocoran, struktur kristal stabil, dan konduktivitas termal meningkat 2,22 kali dibanding asam stearat murni. Dengan titik leleh 68,48°C, panas laten 140,17 kJ/kg, serta stabilitas termal yang baik, material ini berpotensi untuk aplikasi penyimpanan panas.

Penelitian [15] bertujuan untuk mengembangkan material perubahan fase (PCM) berbasis asam stearat dan asam behenat dengan tambahan boron nitrida dan *expanded graphite* guna meningkatkan konduktivitas termal dan stabilitas bentuk untuk penyimpanan panas tenaga surya. Metode yang digunakan meliputi pencampuran asam stearat dan asam behenat menggunakan *magnetic stirring* pada suhu 120 °C, diikuti dengan ultrasonikasi pada suhu 70–100 °C setelah penambahan boron nitrida dan *expanded graphite* secara bertahap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material komposit dengan 15% boron nitrida dan 20% *expanded graphite* memiliki konduktivitas termal 6.990 W/m·K, entalpi peleburan 132.35 J/g pada 65.21°C, serta stabilitas termal dan kimia yang baik setelah 100 siklus tanpa risiko kebocoran fase cair.

Penelitian [16] bertujuan mengembangkan PCM berbasis asam stearat dengan serat karbon untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan panas tenaga surya. Asam stearat dipilih karena stabil, tidak beracun, dan memiliki suhu transisi 68–70°C serta kalor laten 229,4 J/g, sementara serat karbon meningkatkan konduktivitas termal. Menggunakan metode *melt-compounding*, asam stearat dilelehkan pada 90°C, lalu dicampur dengan serat karbon (2,5–10% massa) dan *ethyl cellulose* (10%), kemudian diaduk selama 30 menit. Hasil karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X-ray Diffraction* (XRD), dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) menunjukkan PCM ini stabil secara termal, memiliki kalor laten besar, serta konduktivitas termal lebih tinggi, sehingga mempercepat perpindahan panas dalam sistem penyimpanan panas tenaga surya.

Penelitian [12] mengembangkan sistem pendinginan untuk modul *dual-cell LiC* menggunakan PCM parafin dan aluminium *mesh grid foil*. Pengujian dimulai dengan strategi *zero-PCM*, lalu PCM dilelehkan dan dituangkan ke *casing PVC* sebagai isolator. Untuk meningkatkan konduktivitas termal, tiga lapisan aluminium *foil* (0,036 kg) dengan rasio 10% terhadap PCM dibungkus rapat di sekitar modul. Selain itu, dua jenis PCM dengan titik leleh berbeda diuji untuk stabilitas suhu. Hasilnya, PCM-Al (PCM dengan aluminium *foil*) lebih efektif dibandingkan *forced-convection* (tanpa PCM) dan PCM murni menurunkan suhu maksimum hingga 36,2°C. Ketebalan 7 mm terbukti paling optimal, menurunkan suhu 4,8°C dibandingkan 10 mm dengan biaya lebih rendah. Penggunaan *dual-PCM* juga meningkatkan penyerapan panas, menurunkan suhu lebih dari 2°C dibandingkan PCM tunggal.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa PCM berbasis minyak jelantah dan asam stearat memiliki potensi dalam penyimpanan energi termal, sementara penambahan material dengan konduktivitas tinggi, seperti serat karbon dan aluminium dapat meningkatkan efisiensinya. Beberapa studi juga membuktikan bahwa PCM dapat digunakan untuk sistem pendinginan panel surya untuk meningkatkan efisiensinya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan PCM organik berbasis minyak jelantah dan asam stearat dengan aluminium *foil* yang diharapkan sebagai peningkat konduktivitas termalnya dalam penerapan pendingin panel surya.

## 2.2 Teori Fotovoltaik

Efek fotovoltaik ditemukan oleh Alexandre-Edmund Becquerel pada tahun 1839 ketika ia mengamati bahwa tegangan listrik dapat dihasilkan dalam sel elektrolit yang terkena cahaya. Penemuan ini menjadi dasar bagi teknologi sel surya. Pada tahun 1870, efek fotovoltaik pertama kali dipelajari pada bahan padat seperti selenium, meskipun efisiensinya masih sangat rendah. Perkembangan lebih lanjut terjadi pada tahun 1940-an hingga 1950-an dengan ditemukannya metode Czochralski, yang digunakan untuk produksi kristal silikon murni dan meningkatkan efisiensi sel surya hingga 11% [17].

Secara umum, setiap atom dalam bahan fotovoltaik terdiri dari inti bermuatan positif yang dikelilingi oleh elektron bermuatan negatif. Ketika foton cahaya matahari mengenai atom tersebut, energinya dapat diserap oleh elektron sehingga elektron tersebut dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Energi minimum yang dibutuhkan agar elektron dapat berpindah disebut sebagai energi *bandgap* (Eg). Jika energi foton lebih kecil dari energi bandgap, maka elektron tidak akan dapat berpindah ke pita konduksi [5].

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis inti tanpa mendapat izin dan menyebutkan sumber.
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## 2.2 Teori Fotovoltaik

Efek fotovoltaik ditemukan oleh Alexandre-Edmund Becquerel pada tahun 1839 ketika ia mengamati bahwa tegangan listrik dapat dihasilkan dalam sel elektrolit yang terkena cahaya. Penemuan ini menjadi dasar bagi teknologi sel surya. Pada tahun 1870, efek fotovoltaik pertama kali dipelajari pada bahan padat seperti selenium, meskipun efisiensinya masih sangat rendah. Perkembangan lebih lanjut terjadi pada tahun 1940-an hingga 1950-an dengan ditemukannya metode Czochralski, yang digunakan untuk produksi kristal silikon murni dan meningkatkan efisiensi sel surya hingga 11% [17].

Secara umum, setiap atom dalam bahan fotovoltaik terdiri dari inti bermuatan positif yang dikelilingi oleh elektron bermuatan negatif. Ketika foton cahaya matahari mengenai atom tersebut, energinya dapat diserap oleh elektron sehingga elektron tersebut dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Energi minimum yang dibutuhkan agar elektron dapat berpindah disebut sebagai energi *bandgap* (Eg). Jika energi foton lebih kecil dari energi bandgap, maka elektron tidak akan dapat berpindah ke pita konduksi [5].

Silikon adalah bahan yang paling umum digunakan dalam pembuatan panel surya, tetapi ada juga material lain. Setiap bahan memiliki nilai energi *bandgap* yang berbeda, yang memengaruhi kemampuannya dalam menyerap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi listrik [5]. Berikut energi *bandgap* dari beberapa bahan semikonduktor yang digunakan dalam teknologi fotovoltaik:

Tabel 2.1 Material Semikonduktor Beserta *Bandgap* [5]

Material Semikonduktor	Singkatan	Energi <i>Bandgap</i> (eV)
Germanium	Ge	0.66
Tembaga Indium Diselenida	CuInSe <sub>2</sub>	1.02
Silikon Kristal	c-Si	1.12
Indium Fosfida	InP	1.35
Galium Arsenida	GaAs	1.42
Kadmium Telurida	CdTe	1.46
Silikon Amorf	a-Si	1.75
Kadmium Sulfida	CdS	2.4

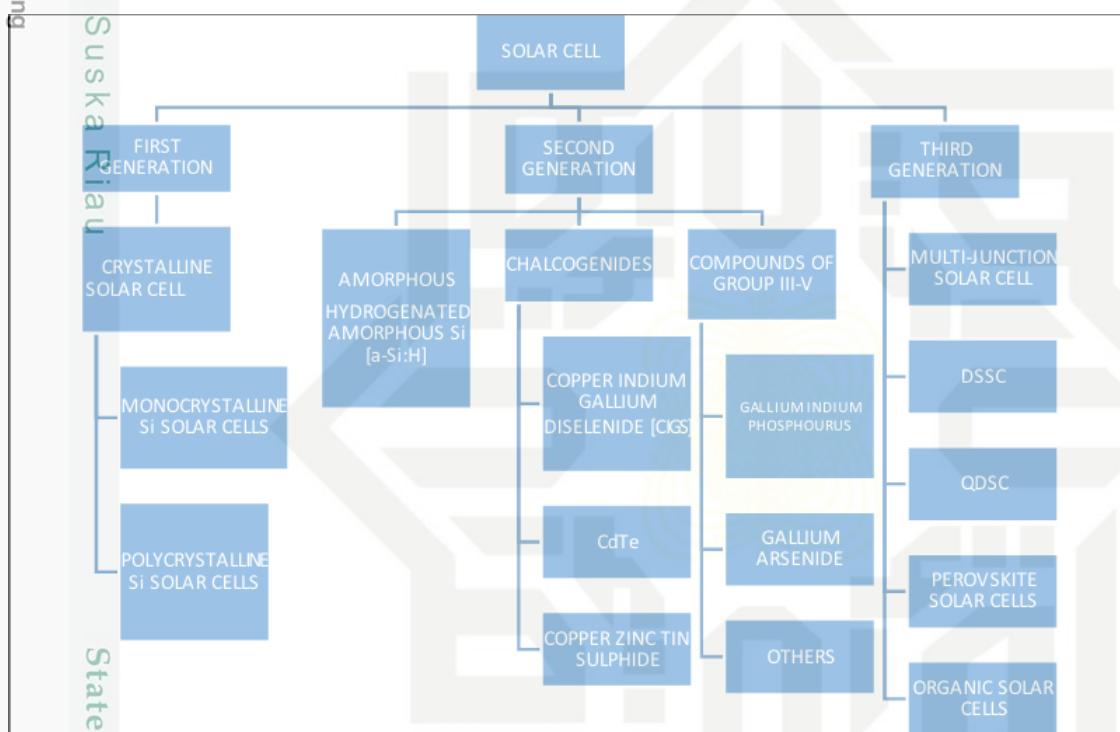
### 2.3 Sel Surya

Sel surya pada dasarnya adalah sebuah sambungan PN yang bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaik. Ketika cahaya matahari mengenai sel surya, foton dengan energi yang cukup akan diserap, menghasilkan pasangan *elektron-hole* yang menciptakan tegangan listrik searah (DC) [17].

Baik sel surya anorganik maupun organik memerlukan pemisahan elektron dan *hole* sebelum terjadi rekombinasi. Pada sel surya anorganik, pemisahan muatan terjadi karena adanya potensial bawaan di sambungan PN. Efisiensi sel surya ini bergantung pada kemampuan pembawa muatan minoritas yang dihasilkan oleh cahaya untuk mencapai sambungan PN sebelum mengalami rekombinasi dengan pembawa muatan mayoritas di dalam material [17].

Sel surya diklasifikasikan berdasarkan material yang digunakan. Sel surya berbasis silikon terdiri dari sel surya kristal tunggal, polikristalin, dan amorf. Teknologi sel surya film tipis menggunakan material seperti amorf silikon (a-Si), kadmium sulfida (CdS), kadmium telurida (CdTe), serta tembaga indium galium diselenida (CIGS). Teknologi sel surya generasi ketiga mencakup konsep yang lebih canggih untuk meningkatkan efisiensi konversi energi matahari, seperti *Quantum Dot Solar Cell*, *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), dan *Tandem Solar Cell* [17].

Selain sel surya anorganik, teknologi panel surya yang terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan daya tahannya adalah sel surya organik dengan menggunakan teknologi yang khusus yang fleksibel dan murah, tetapi masih kurang efisien dan cepat rusak jika terpapar sinar matahari terlalu lama. Sementara itu, sel surya tandem menggabungkan dua jenis bahan untuk menangkap lebih banyak cahaya matahari, sehingga lebih efisien. Salah satu inovasi terbaru adalah sel surya perovskite, yang bisa dipadukan dengan teknologi organik untuk meningkatkan efisiensi hingga lebih dari 22% [17]. Jenis-jenis sel surya ini akan dijelaskan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Jenis-Jenis Sel Surya dan Inovasi Terbaru [17]

Jenis-Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

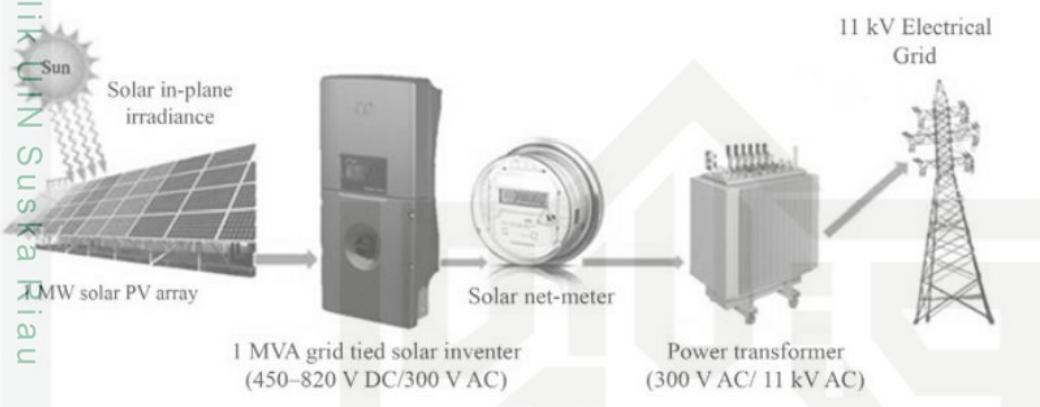
Secara umum, sistem tenaga surya atau *Photovoltaic (PV) systems* dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu *grid-connected PV systems*, *stand-alone PV systems*, dan *hybrid PV systems*.

### 2.4.1 *Grid-connected PV systems*

Sistem PV yang terhubung ke jaringan listrik disebut *grid-connected PV system* atau *on-grid PV system*. Sistem ini dirancang untuk langsung memasok energi listrik ke jaringan listrik tanpa menggunakan baterai sebagai penyimpanan. Energi yang dihasilkan oleh panel surya digunakan terlebih dahulu oleh pengguna, dan jika ada kelebihan daya, energi tersebut akan dikirim ke jaringan listrik umum.

**© Hak cipta milik UIN Suska Riau**  
Hak Cipta Dendungi Lindungi Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, seperti modul PV yang mengubah sinar matahari menjadi listrik, inverter yang mengubah arus searah (DC) dari panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan jaringan listrik, transformator untuk menyesuaikan tegangan listrik, serta *utility meter* yang mengukur jumlah listrik yang dikirim ke atau diterima dari jaringan. Skema dari sistem *on-grid PV System* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema Sistem PLTS *On-Grid* [18]

#### 2.4.2 *Stand-alone PV systems*

*Stand-alone PV system* adalah sistem pembangkit listrik tenaga surya yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik umum. Sistem ini digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik di lokasi tertentu, di mana energi yang dihasilkan langsung dikonsumsi atau disimpan dalam baterai untuk digunakan saat tidak ada sinar matahari [18].

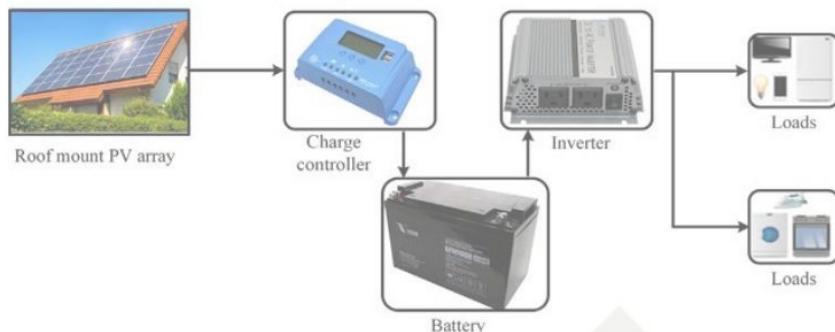
Beberapa contoh penggunaan *stand-alone PV system* adalah lampu jalan tenaga surya, sistem pemompaan air tenaga surya, dan sistem tenaga surya di rumah-rumah yang tidak memiliki akses ke jaringan listrik. Karena tidak bergantung pada jaringan listrik, sistem ini sangat cocok untuk daerah terpencil. Skema dari sistem PLTS *off-grid* ditunjukkan pada Gambar 2.3.

**UIN SUSKA RIAU**

### 2.4.3 Hybrid PV Systems

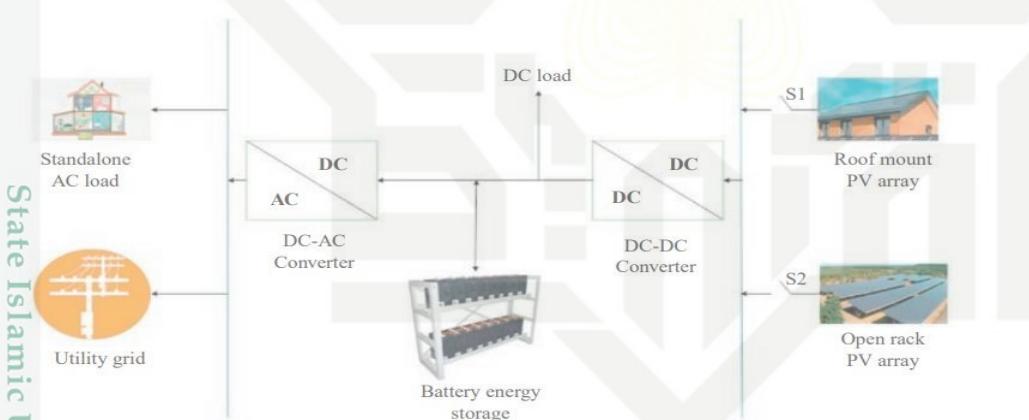
#### © Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa men-tumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.3 Sistem PLTS Off-Grid [18]

*Hybrid PV system* adalah sistem tenaga surya yang menggabungkan fitur dari *grid-connected PV system* dan *stand-alone PV system*. Dalam sistem ini, listrik yang dihasilkan dari panel surya dapat digunakan langsung, disimpan dalam baterai, atau dialirkan ke jaringan listrik umum melalui mekanisme *net metering*. Keunggulan utama dari *hybrid PV system* adalah stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem lainnya karena adanya cadangan energi dalam baterai. Skema sistem PLTS *hybrid* ditunjukkan pada Gambar 2.4 [18].



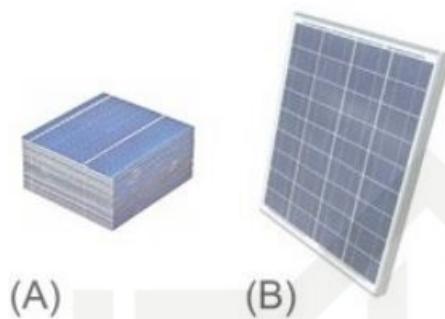
Gambar 2.4 Skema PLTS Hybrid [18]

## 2.5 Komponen Utama Sistem Panel Surya

### 2.5.1 Sel Surya

Sel surya adalah komponen utama dalam sistem fotovoltaik yang berfungsi mengubah energi cahaya menjadi listrik menggunakan efek fotovoltaik. Karena satu sel PV hanya menghasilkan daya kecil, beberapa sel digabungkan sehingga membentuk modul untuk meningkatkan tegangan dan arus sesuai kebutuhan. Modul-modul ini kemudian

dirangkai dalam sistem dengan konfigurasi seri atau paralel agar menghasilkan daya yang lebih besar. Dalam instalasi pembangkit listrik tenaga surya, modul-modul PV dihubungkan dalam bentuk string untuk mencapai tegangan yang sesuai dengan sistem [18]. Bentuk sel surya ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sel Surya (A) dan Modul Surya (B) [18]

### 2.5.2 Charge Controller

Charge controller adalah perangkat elektronik yang berfungsi mengatur arus listrik dari panel surya ke baterai serta dari baterai ke beban. Alat ini mencegah pengisian berlebih (*overcharging*) dan tegangan berlebih yang dapat memperpendek umur baterai. Terdapat dua jenis *charge controller*, yaitu *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT).

PWM adalah teknik yang digunakan untuk mengontrol arus dan tegangan dalam sistem listrik, termasuk dalam pengisian baterai dari panel surya. PWM bekerja dengan cara menyalakan dan mematikan arus dengan cepat dalam suatu siklus waktu tertentu, sehingga dapat mengatur jumlah energi yang dikirim ke baterai [19].

MPPT adalah metode yang digunakan untuk memastikan panel surya bekerja pada titik daya maksimum agar energi yang dihasilkan lebih optimal. MPPT menggunakan algoritma khusus untuk menyesuaikan tegangan dan arus agar panel surya selalu menghasilkan daya tertinggi yang dapat disuplai ke baterai atau beban [19]. Terdapat dua jenis MPPT, yaitu dinamis yang menggunakan motor untuk mengarahkan panel ke posisi terbaik terhadap matahari, dan statis yang mengatur tegangan menggunakan konverter DC-DC tanpa perlu menggerakkan panel. MPPT lebih efisien dibandingkan PWM, terutama dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi, karena mampu menyesuaikan kinerja panel surya agar selalu optimal.

### 2.5.3 Baterai

*Electrochemical energy storage systems* (ECESS) merupakan teknologi yang menyimpan dan mengubah energi kimia menjadi energi listrik serta sebaliknya. Salah satu bentuk ECESS yang paling umum adalah baterai. Baterai adalah perangkat penyimpanan energi yang berfungsi untuk menyimpan dan melepaskan listrik sesuai kebutuhan. Baterai terdiri dari sel elektrokimia yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi kimia.

Baterai terdiri dari beberapa sel yang memiliki komponen utama seperti anoda, katoda, elektrolit, dan separator untuk memastikan aliran ion tetap terkendali. Berdasarkan cara kerjanya, baterai dibagi menjadi beberapa jenis, seperti *primary cells* yang hanya bisa digunakan sekali, *secondary cells* yang dapat diisi ulang, serta *fuel cells* yang menghasilkan listrik melalui reaksi kimia tanpa proses pembakaran langsung. Beberapa jenis baterai yang umum digunakan dalam penyimpanan energi meliputi *Lead-Acid*, *Nickel*, *Sodium-Sulfur*, dan *Lithium*, serta teknologi lain seperti *Flow Batteries* (FB) dan *Fuel Cells* (FC) [20]. Berikut kelebihan dan kekurangan dari sistem penyimpanan energi berbasis elektrokimia ini:

Dalam sistem energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin, baterai berperan penting dalam mengatasi sifat intermiten dari sumber energi tersebut. Energi yang dihasilkan oleh panel surya hanya tersedia pada siang hari dan keadaan tersebut bervariasi sepanjang Waktu. Oleh karena itu, baterai digunakan untuk menyimpan kelebihan energi saat produksi tinggi dan melepaskannya saat permintaan meningkat atau produksi menurun.

Tabel 2.2 Keunggulan dan Kelemahan pada Jenis-Jenis Baterai [20]

ECESS	Keunggulan	Kelemahan	Penggunaan dalam Sistem Energi Terbarukan
<b>LAB (Lead-Acid Battery)</b>	Efisiensi tinggi	Umur pendek	Pembangkit listrik tenaga angin, PLTS
<b>NB (Nickel Battery)</b>	Pengisian cepat	Pengosongan daya tinggi	Pembangkit listrik tenaga angin, PLTS
<b>NASB (Sodium-Sulfur Battery)</b>	Tidak memerlukan perawatan	Biaya produksi tinggi	Pembangkit listrik tenaga angin
<b>LB (Lithium Battery)</b>	Dampak lingkungan terbatas	Risiko <i>overcharging</i>	Pembangkit listrik tenaga angin

ECESS Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang 1. Dilarang menyalin atau seluruh karya tulis ini tanpa izin dan menyebutkan sumber: a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah. b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.	Keunggulan	Kelemahan	Penggunaan dalam Sistem Energi Terbarukan
<b>FB (Flow Battery)</b>	Pengosongan daya rendah	Peralatan Rumit	Pembangkit listrik tenaga angin
<b>FC (Fuel Cell)</b>	Emisi nol	Biaya produksi tinggi	Tidak digunakan

#### 2.5.4 Inverter

Inverter adalah alat yang digunakan untuk mengubah arus listrik searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Dalam sistem tenaga surya, inverter sangat penting karena panel surya menghasilkan listrik dalam bentuk DC, sementara sebagian besar peralatan listrik dan jaringan listrik menggunakan AC. Oleh karena itu, inverter memastikan energi dari panel surya dapat digunakan dengan baik atau disalurkan ke jaringan listrik.

Ada tiga jenis inverter utama dalam sistem tenaga surya yang terhubung ke jaringan, yaitu *microinverter*, *string inverter*, dan *central inverter*. *Microinverter* dipasang pada setiap panel surya secara individu dan mengubah listrik DC menjadi AC langsung dari satu panel.

*String inverter* digunakan untuk menghubungkan beberapa panel surya dalam satu rangkaian (string) sebelum mengubahnya menjadi AC. Sementara itu, *central inverter* memiliki kapasitas lebih besar dan biasanya digunakan pada sistem tenaga surya skala besar, di mana banyak rangkaian panel surya terhubung ke satu inverter utama [18]. Pada Gambar 2.6 ditunjukkan ketiga jenis inverter.



Gambar 2.6 *Microinverters* (A); *String Inverters*; *Central Inverters* (C) [18]

#### 2.5.5 Beban

Dalam sistem tenaga listrik, beban merujuk pada perangkat atau komponen yang menggunakan energi listrik untuk beroperasi. Beban ini memiliki karakteristik kelistrikan yang dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat utamanya menjadi tiga jenis, yaitu: beban resistif, kapasitif, dan induktif [21].

Beban resistif adalah beban yang mengubah energi listrik secara langsung menjadi energi panas tanpa adanya komponen penyimpanan energi seperti medan magnet atau medan listrik. Contoh umum dari beban resistif adalah lampu pijar, pemanas listrik, dan setrika listrik.

Pada beban resistif, arus dan tegangan berada dalam fase yang sama, sehingga faktor daya (*power factor*) idealnya adalah 1. Beban jenis ini cenderung tidak menyebabkan gangguan terhadap sistem kelistrikan karena tidak menghasilkan reaktansi. Beban resistif terdiri dari dua jenis komponen utama, yaitu:

### **Resistor Tetap (*Fixed Resistor*)**

Resistor tetap memiliki nilai hambatan yang tidak berubah-ubah. Komponen ini banyak digunakan dalam peralatan elektronik untuk mengatur arus dan tegangan. Nilainya ditentukan oleh bahan penyusunnya dan ukuran fisik resistor tersebut [21].

### **2. Resistor Variabel (*Variable Resistor*)**

Resistor variabel memungkinkan nilai hambatannya diubah-ubah sesuai kebutuhan. Contoh yang umum digunakan adalah potensiometer, yang sering dijumpai dalam pengatur volume atau kecerahan pada perangkat elektronik [21].

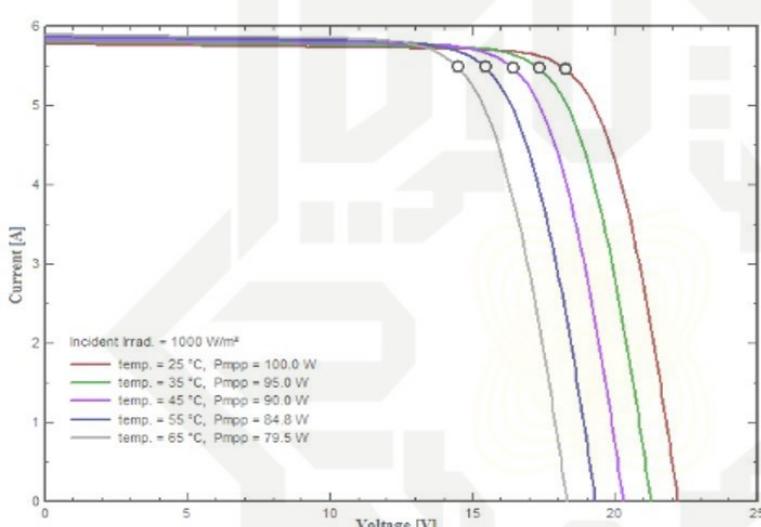
Selain itu, terdapat beban kapasitif yang merupakan beban yang memiliki kemampuan untuk menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Komponen utamanya adalah kapasitor, yang bekerja dengan menyimpan muatan listrik pada dua pelat konduktornya. Beban ini memiliki arus yang mendahului tegangan (*leading current*). Contoh penggunaan beban kapasitif dapat ditemukan dalam sistem koreksi faktor daya (*capacitor bank*) dan beberapa jenis catu daya [21].

Terdapat juga beban induktif yang merupakan beban yang menyimpan energi dalam bentuk medan magnet, biasanya menggunakan lilitan kawat (kumparan). Komponen utamanya adalah induktor. Dalam beban ini, arus tertinggal dari tegangan (*lagging current*). Beban induktif umum ditemukan pada motor listrik, kipas angin, transformator, dan peralatan berbasis elektromagnetik lainnya [21].

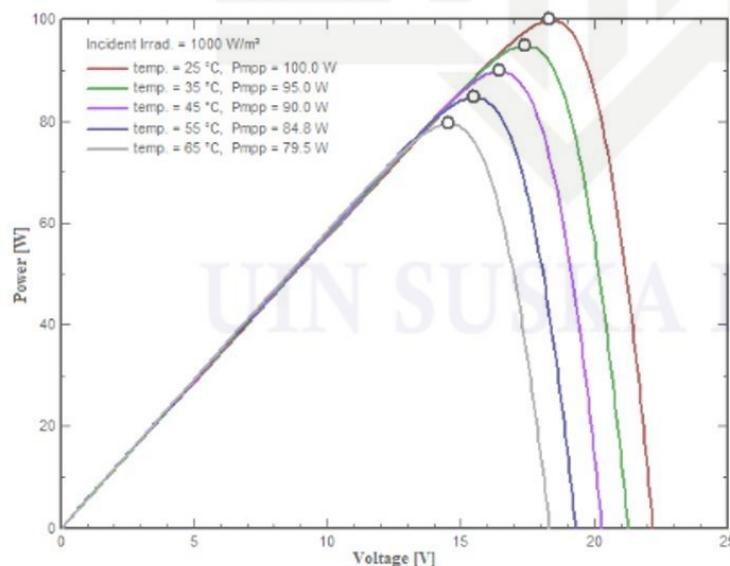
## 2.6 Hak Cipta Dicantongi Indah-Udaya

### 2.6.1 Karakteristik Panel Surya terhadap Temperatur

Terdapat adanya hubungan antara suhu panel fotovoltaik dengan tegangan (Voc) dan daya yang dihasilkan. Saat suhu meningkat di atas 25°C, tegangan dan daya keluaran panel menurun. Penurunan daya sekitar 0,5% per 1°C kenaikan suhu, sehingga efisiensi panel berkurang pada suhu tinggi [22]. Hal ini terjadi karena kenaikan suhu mengurangi energi cahaya (Eg) dari material semikonduktor yang pada akhirnya menurunkan tegangan Voc. Pengaruh suhu terhadap tegangan dan arus output ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan daya output ditunjukkan pada Gambar 2.8.



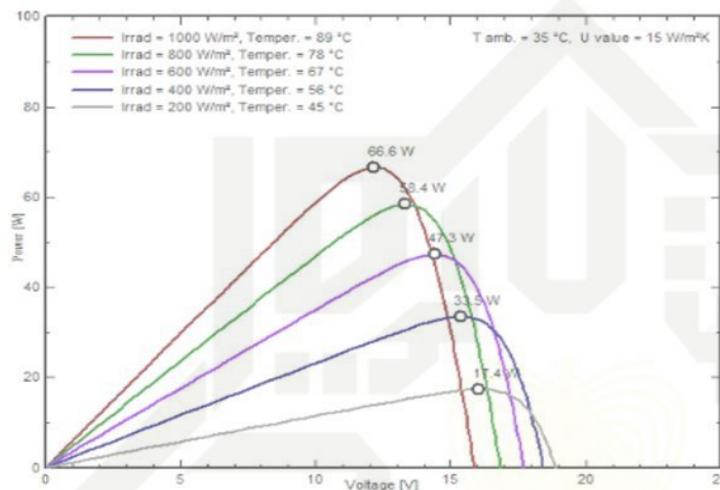
Gambar 2.7 Pengaruh Suhu terhadap Tegangan dan Arus Output Panel Surya (I-V) [22]



Gambar 2.8 Pengaruh Suhu terhadap Daya Output Panel Surya (P-V) [22]

## 2.6.2 Karakteristik Panel Surya terhadap Intensitas Cahaya

Selain hubungan temperatur, Intensitas cahaya matahari berpengaruh langsung terhadap daya keluaran panel fotovoltaik. Jika intensitas cahaya menurun, arus (Isc) yang dihasilkan panel juga berkurang, sehingga daya yang dihasilkan lebih rendah. Akibatnya, titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) juga turun, mengurangi efisiensi panel fotovoltaik. Kurva hubungan antara daya dan intensitas cahaya ditunjukkan pada Gambar 2.9 [22].



Gambar 2.9 Hubungan Intensitas Cahaya Matahari dan Daya Keluaran Panel Surya [22]

## 2.6.3 Orientasi Panel Surya

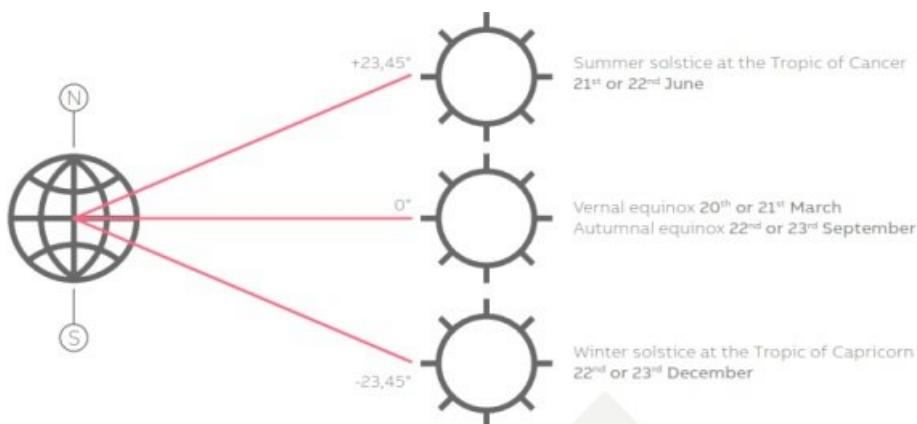
Arah pemasangan panel fotovoltaik sangat penting untuk memaksimalkan energi yang dihasilkan. Jika suatu lokasi berada di belahan bumi utara, panel sebaiknya menghadap ke selatan agar mendapatkan paparan sinar matahari yang optimal. Sebaliknya, jika lokasi berada di belahan bumi selatan, panel perlu diarahkan ke utara untuk hasil yang optimal [22].

## 2.6.4 Posisi Matahari dan Penentuan Sudut Kemiringan Panel Surya

Deklinasi matahari ( $\delta$ ) adalah sudut antara garis ekuator bumi dan posisi matahari yang tampak dari bumi. Nilai ini berubah sepanjang tahun akibat revolusi bumi mengelilingi matahari dengan kisaran antara  $+23,45^\circ$  saat solstis Juni hingga  $-23,45^\circ$  saat solstis Desember. Saat equinox (sekitar 21 Maret dan 23 September), deklinasi bernilai  $0^\circ$ . Perubahan ini menentukan tinggi posisi matahari di langit dan memengaruhi intensitas radiasi yang diterima di suatu lokasi [23], [24]. Variasi sudut deklinasi ditunjukkan pada Gambar 2.10

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Gambar 2.10 Variasi Sudut Deklinasi Matahari [24]

Radiasi yang diterima oleh panel surya dipengaruhi oleh posisi matahari terhadap permukaan bumi, yang berubah sepanjang tahun akibat rotasi dan revolusi bumi. Efisiensi maksimum panel tercapai ketika sudut datang sinar matahari  $90^\circ$ , karena sinar matahari jatuh tegak lurus pada panel. Untuk memperoleh energi maksimal, posisi dan orientasi panel harus disesuaikan agar selalu menghadap matahari dengan sudut datang sinar yang hampir  $90^\circ$ , tergantung garis lintang lokasi dan deklinasi matahari [24].

### 2.6.5 Kecepatan Angin

Angin yang bertiup di sekitar panel fotovoltaik membantu menurunkan suhu panel, menjaga suhunya tetap sekitar  $25^\circ\text{C}$ . Selain pendinginan alami oleh angin, efisiensi panel juga dapat ditingkatkan dengan menambahkan media pendingin di bagian belakang panel. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pelat aluminium berlubang di belakang panel dapat meningkatkan efisiensi konversi energi [22].

### 2.6.6 Shading atau Bayangan

Partial shading adalah kondisi ketika sebagian panel surya terkena bayangan, misalnya karena pohon, bangunan, atau kotoran seperti daun. Akibatnya, meskipun sebagian panel masih terkena sinar matahari, daya listrik yang dihasilkan bisa turun cukup besar. Hal ini terjadi karena panel-panel biasanya dirangkai secara seri, jadi jika satu bagian tertutup bayangan, seluruh rangkaian bisa ikut terpengaruh. Untuk mengatasi masalah ini, biasanya dipasang komponen seperti *bypass diode*, atau digunakan alat tambahan seperti *optimizer* atau *microinverter* agar panel tetap bisa bekerja dengan baik meskipun ada bayangan [25].

## 2.7 Parameter Utama Kinerja Sel Surya

### 2.7.1 Short Circuit Density ( $J_{sc}$ )

*Short-circuit current ( $I_{sc}$ )* adalah arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya ketika kedua terminalnya dihubungkan langsung tanpa beban. Besarnya arus ini bergantung pada jumlah foton yang jatuh dan diserap oleh sel surya, yang dipengaruhi oleh spektrum cahaya yang digunakan, biasanya spektrum standar AM1.5. Karena luas permukaan sel surya bisa bervariasi, digunakan kepadatan arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) untuk menggambarkan arus per satuan luas, dengan satuan  $\text{mA/cm}^2$ . Nilai  $J_{sc}$  dipengaruhi oleh seberapa baik sel surya menyerap cahaya dan mengurangi pantulan. Dalam kondisi standar, sel surya kristalin silikon di laboratorium dapat mencapai  $J_{sc}$  lebih dari  $42 \text{ mA/cm}^2$ , sedangkan sel komersial umumnya memiliki  $J_{sc}$  di atas  $35 \text{ mA/cm}^2$  [26].

### 2.7.2 Open-Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )

*Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )* adalah tegangan maksimum yang bisa dihasilkan oleh sel surya saat tidak ada arus yang mengalir, yaitu ketika rangkaianya dalam kondisi terbuka. Tegangan ini terjadi karena cahaya yang diserap sel surya menyebabkan pemisahan muatan listrik, menciptakan perbedaan tegangan antara terminal positif dan negatif. Nilai  $V_{oc}$  bergantung pada seberapa banyak arus yang dihasilkan oleh cahaya serta arus saturasi ( $I_0$ ), yang berkaitan dengan proses rekombinasi muatan di dalam sel. Jika rekombinasi lebih sedikit, maka  $V_{oc}$  akan lebih tinggi. Dalam kondisi standar AM1.5, sel surya kristalin silikon di laboratorium bisa mencapai  $V_{oc}$  hingga  $720 \text{ mV}$ , sedangkan sel surya komersial biasanya mencapai di atas  $600 \text{ mV}$  [26].

### 2.7.3 Fill Factor (FF)

*Fill factor (FF)* adalah ukuran seberapa efisien sel surya dalam mengubah cahaya menjadi listrik. FF menunjukkan seberapa dekat daya maksimum yang dihasilkan sel surya dibandingkan dengan hasil perkalian antara tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) dan arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ). Semakin tinggi FF, semakin baik kualitas sel surya [26].

2.7 Hak Cipta Dihindari  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

#### 2.7.4 **Hukum Ohm**

Hukum Ohm adalah salah satu hukum dasar dalam ilmu kelistrikan yang menggambarkan hubungan antara tegangan, arus, dan hambatan dalam suatu rangkaian listrik. Besar arus listrik yang mengalir dalam suatu penghantar sebanding dengan beda potensial (tegangan) yang diterapkan dan berbanding terbalik dengan hambatannya. Secara matematis, Hukum Ohm dinyatakan dengan rumus:

$$V = I \times R \quad (2.1)$$

Keterangan:

$V$  : Tegangan (Volt)

$I$  : Arus listrik (Ampere)

$R$  : Hambatan/resistansi (Ohm, simbol:  $\Omega$ )

Dari rumus tersebut, kita juga dapat menurunkan dua bentuk lain:

$$I = \frac{V}{R} \quad R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

#### 2.4.2 **Daya Output**

Untuk mengetahui daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik saat proses pengisian baterai, perlu dilakukan perhitungan daya keluaran dari sistem. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan listrik yang dihasilkan oleh panel dengan arus yang mengalir ke baterai [22]. Semakin tinggi tegangan dan arus yang dihasilkan, semakin besar pula daya yang dapat disuplai ke baterai atau beban. Perhitungan daya ini dapat dituliskan dengan rumus berikut:

$$P_{\text{out}} = V \times I \quad (2.3)$$

Keterangan :

$P_{\text{out}}$  : Daya keluaran (Watt)

$V$  : Tegangan listrik (Volt)

$I$  : Arus listrik (Ampere)

### 2.4.3 Efisiensi Konversi

Efisiensi konversi sel surya adalah rasio antara daya maksimum yang dihasilkan dengan daya cahaya yang masuk [26].

## 2.8 Kalor

### 2.8.1 Perpindahan Kalor secara Konduksi

Proses perpindahan kalor melalui suatu material tanpa disertai perpindahan massa disebut konduksi. Fenomena ini terjadi karena adanya perbedaan suhu antara dua permukaan material, di mana energi panas berpindah dari daerah bersuhu lebih tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah. Laju perpindahan kalor melalui konduksi dipengaruhi oleh konduktivitas termal bahan, luas penampang, serta gradien suhu dalam material tersebut [27].

### 2.8.2 Perpindahan Kalor secara Konveksi

Perpindahan kalor secara konveksi terjadi ketika energi panas berpindah melalui fluida yang bergerak, baik dalam bentuk gas maupun cairan. Perpindahan ini terjadi karena adanya perbedaan suhu antara permukaan benda dengan fluida di sekitarnya. Dalam kasus konveksi paksa, perpindahan kalor terjadi akibat pengaruh dari faktor eksternal, seperti kipas atau aliran fluida yang dikendalikan. Laju perpindahan kalor per satuan luas dalam konveksi dapat dihitung menggunakan hukum Newton tentang pendinginan [27].

### 2.8.3 Perpindahan Kalor secara Radiasi

Radiasi adalah perpindahan energi tanpa memerlukan medium, terjadi melalui pancaran gelombang elektromagnetik. Perpindahan kalor melalui radiasi bergantung pada sifat permukaan benda, suhu benda, serta konstanta fisik yang mendukung perpindahan energi ini. Salah satu kasus umum dalam perpindahan kalor radiasi adalah ketika suatu permukaan dengan suhu tinggi memancarkan energi ke lingkungan sekitarnya. Perpindahan kalor radiasi dapat dihitung menggunakan Hukum Stefan-Boltzmann, yang menyatakan bahwa jumlah panas yang dipancarkan oleh suatu benda hitam sebanding dengan pangkat empat suhu absolutnya [27].

## 2.8 Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencaatun dan menyebarkan sumber.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## 2.8.1 Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencaatun dan menyebarkan sumber.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

#### 2.8.4 Kalor Jenis (*Specific Heat Capacity*)

Kalor jenis adalah sifat termal suatu zat yang menunjukkan jumlah energi yang diperlukan untuk meningkatkan suhu satuan massa zat tersebut sebesar satu derajat Celsius atau Kelvin. Dalam termodinamika, panas jenis sangat penting dalam analisis perpindahan energi karena mempengaruhi perubahan energi dalam suatu sistem ketika terjadi perubahan suhu [27].

Terdapat dua jenis panas spesifik yang umum digunakan dalam analisis termal, yaitu panas spesifik pada volume konstan ( $c_v$ ) dan panas spesifik pada tekanan konstan ( $c_p$ ). Panas spesifik pada volume konstan ( $c_v$ ) adalah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu satuan massa suatu zat ketika volumenya dijaga tetap. Sedangkan panas spesifik pada tekanan konstan ( $c_p$ ) adalah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu satuan massa zat tersebut ketika tekanannya dijaga tetap. Untuk zat yang tidak dapat dimampatkan, seperti padatan dan cairan, panas spesifik pada volume konstan dan tekanan konstan memiliki nilai yang hampir sama sehingga dapat diwakili dengan satu simbol, yaitu  $c$  [27].

#### 2.8.5 Kalor Laten

Ketika suatu zat mengalami perubahan fase, seperti dari padat ke cair atau dari cair ke gas, diperlukan energi dalam bentuk kalor untuk mengatasi gaya tarik antarmolekul tanpa menyebabkan perubahan suhu. Energi ini disebut kalor laten. Kalor yang dibutuhkan untuk mengubah zat dari padat menjadi cair disebut kalor lebur, sedangkan kalor yang diperlukan untuk mengubah zat dari cair menjadi gas disebut kalor penguapan. Sementara itu, saat zat berubah dari cair ke padat, proses ini disebut pembekuan, dan kalor yang dilepaskan disebut kalor beku. Besarnya kalor yang terlibat dalam perubahan fase suatu zat bergantung pada jenis zat dan massanya [27].

### 2.9 Teknologi Pendinginan Panel Surya

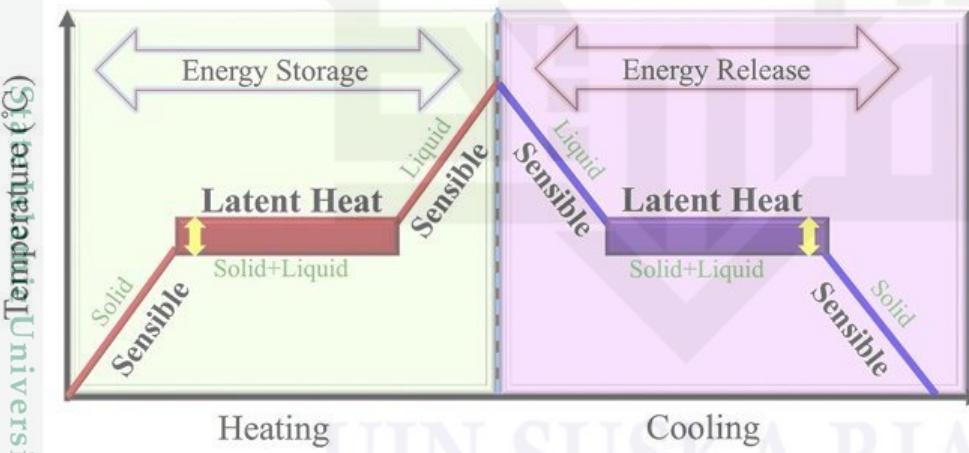
Teknologi pendinginan panel surya terbagi menjadi tiga jenis: pasif, aktif, dan kombinasi keduanya. Pendinginan pasif bekerja tanpa daya tambahan, mengandalkan konveksi udara, radiasi, atau material penyerap panas. Sementara itu, pendinginan aktif memerlukan perangkat tambahan seperti pompa dan sensor untuk mengontrol aliran fluida pendinginan.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi metode aktif dan pasif lebih efektif dalam menjaga efisiensi panel surya. Namun, pendinginan aktif memiliki kelemahan seperti biayanya meningkat untuk mengoperasikannya dan konsumsi energi untuk sirkulasi fluida. Metode ini lebih optimal jika panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan, misalnya pada sistem *Photovoltaic Thermal* (PVT).

Sementara itu, pendinginan pasif lebih hemat energi dan minim biaya operasional. Beberapa teknik seperti ventilasi alami, *Phase Change Material* (PCM), dan pipa panas membantu menurunkan suhu tanpa daya tambahan. Setiap metode memiliki keunggulan dan keterbatasan, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan sistem.

## 2.10 Phase Change Material (PCM)

*Phase Change Material* (PCM) adalah material yang dapat menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi panas dalam jumlah besar selama mengalami perubahan fasa, seperti dari padat ke cair atau sebaliknya. Proses ini memanfaatkan kalor laten, di mana PCM dapat menyerap panas tanpa mengalami peningkatan suhu yang cukup tinggi saat mencair, serta melepaskan panas saat membeku [28]. Mekanisme kerja PCM ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Mekanisme Kerja PCM [28]

### 2.10.1 Jenis – Jenis PCM

PCM dikategorikan berdasarkan komposisi kimianya dan sifat perubahan fasenya. Tiga kategori utama PCM adalah organik, anorganik, dan eutektik. Setiap jenis memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing. Salah satu tantangan utama dalam penggunaan PCM non-logam adalah konduktivitas termal yang rendah, yang dapat

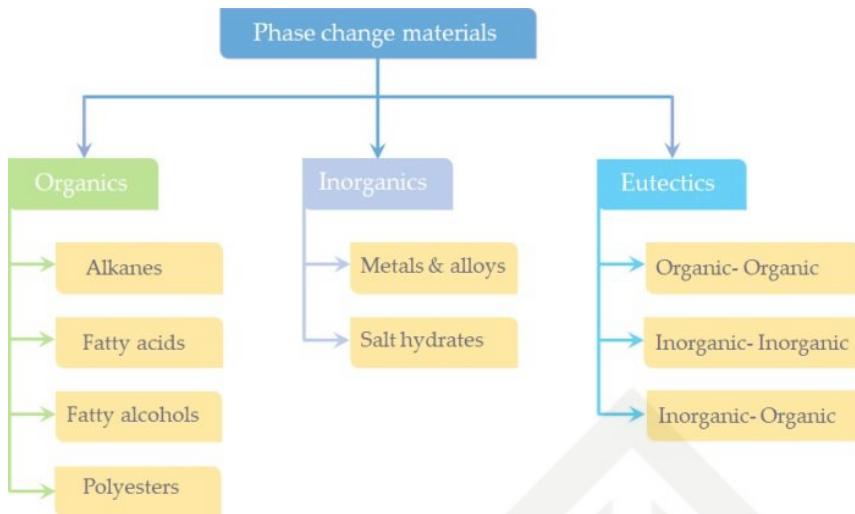
menghambat kinerja penyimpanan energi termal [28]. Hal ini akan mempengaruhi pergerakan panas dalam material, sehingga mengurangi efektivitasnya dalam penerapan yang memerlukan perpindahan panas yang cepat. Oleh karena itu, peningkatan konduktivitas termal PCM menjadi aspek yang perlu diperhatikan dalam meningkatkan kinerjanya secara keseluruhan.

PCM organik, seperti parafin dan asam lemak, banyak digunakan karena memiliki kapasitas penyimpanan panas latent yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta sifatnya yang tidak korosif. Namun, konduktivitas termalnya masih dikatakan rendah. Berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan kinerjanya, seperti penambahan aditif dengan konduktivitas tinggi (misalnya serbuk logam atau material berbasis karbon), penggunaan struktur berpori, atau pengembangan material komposit [28].

PCM anorganik seperti hidrat garam dan logam memiliki konduktivitas termal lebih baik dibandingkan PCM organik. Hidrat garam sering digunakan dalam penyimpanan energi termal karena entalpi perubahan fase tinggi, perubahan volume kecil, serta kepadatan energi yang besar. Material ini juga tahan api dan lebih ekonomis, sehingga cocok untuk penggunaan skala besar. Namun, hidrat garam memiliki kekurangan seperti sifat korosif, supercooling, dekomposisi, dan pemisahan fase, yang dapat menurunkan kinerja dan keandalannya dalam siklus termal berulang. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai metode seperti penggunaan inhibitor korosi, enkapsulasi, dan formulasi komposit diterapkan guna meningkatkan stabilitas dan kinerja material [28].

Eutektik merupakan campuran dua atau lebih zat yang memiliki titik leleh lebih rendah dibandingkan dengan komponen penyusunnya. Campuran ini mencair dan membeku pada suhu yang sama, sehingga sering digunakan dalam penyimpanan energi termal dan penerapan lainnya [28]. Diagram klasifikasi *phase change material* ditunjukkan pada Gambar 2.12.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.12 Klasifikasi *Phase Change Material* [28]

### 2.10.2 Hubungan Kalor dengan Perubahan Suhu dan Perubahan Wujud

*Phase Change Material* (PCM) adalah material yang mengalami perubahan fase padat-cair, dikenal sebagai siklus peleburan-pembekuan, pada suhu tertentu sesuai dengan aplikasinya. Saat berubah dari padat ke cair, PCM menyerap energi dari lingkungan tanpa mengalami kenaikan suhu yang signifikan. Energi ini meningkatkan getaran atom atau molekul hingga ikatan antar atom melemah dan material mencair. Sebaliknya, saat membeku, material melepaskan energi ke lingkungan, menyebabkan molekul kembali ke fase padat [29].

Energi yang diserap atau dilepaskan selama siklus ini disebut kalor laten fusi. Tidak seperti kalor sensibel yang menaikkan suhu material, kalor laten hanya mengubah fase tanpa mempengaruhi suhu. Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.13, yang menunjukkan kurva standar *heating*. Pada gambar 2.13, bagian datar (plateau) menggambarkan proses perubahan fase, di mana panas terus diberikan tetapi suhu tidak berubah. Sebagai contoh, es batu tetap bersuhu 0°C hingga seluruhnya mencair, meskipun terus menerima panas. Proses serupa juga terjadi saat cairan berubah menjadi gas, meskipun kalor laten penguapan umumnya lebih besar dibanding kalor laten fusi [29].

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menantumkan dan menyebutkan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

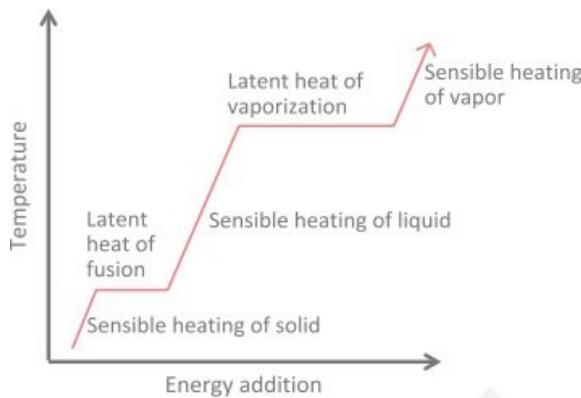
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis tanpa izin dan tanpa menambahkan, dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Gambar 2.13 Kurva Standar Heating [29]

PCM lebih sering digunakan dalam fase padat-cair dibanding cair-gas karena perubahan densitas yang lebih kecil dan tidak memerlukan peralatan tambahan seperti boiler atau kondensor. Besarnya energi yang diserap atau dilepaskan tergantung pada nilai kalor laten fusi, yang dinyatakan dalam J/g atau kJ/kg. Semakin besar massa PCM, semakin banyak energi yang dapat disimpan atau dilepaskan [29].

Kecepatan peleburan PCM bergantung pada kondisi operasi, seperti perbedaan suhu dan laju perpindahan panas. Misalnya, es dengan kalor laten fusi 333 kJ/kg membutuhkan 333 kJ energi untuk mencairkan 1 kg es. Meskipun jumlah energi yang dibutuhkan tetap, laju peleburan bisa berbeda tergantung pada sumber panas. Es yang dipanaskan dengan *blow torch* akan mencair lebih cepat dibanding yang dibiarkan di suhu ruangan karena perbedaan suhu yang lebih besar dan aliran panas yang lebih cepat [29].

Pengaruh utama dalam proses perubahan fase PCM ditentukan oleh titik leleh, suhu, dan kalor laten. Titik leleh menentukan pada suhu berapa PCM menyerap atau melepaskan energi. Suhu lingkungan serta perbedaan suhu dengan PCM mempengaruhi kecepatan transisi fase. Sementara itu, kalor laten menentukan jumlah energi yang diperlukan untuk perubahan fase tanpa meningkatkan suhu material.

## 2.11 Standar Mutu Minyak Goreng

### 2.11.1 Perubahan Warna dan Bau

Minyak goreng yang digunakan berulang kali akan mengalami perubahan warna dan bau, yang bisa menjadi indikasi kualitasnya sudah menurun. Menurut SNI 7709:2019, minyak goreng yang baik seharusnya memiliki warna yang jernih dan tidak berbau tengik. Namun, dalam praktiknya, minyak yang digunakan berkali-kali, terutama pada suhu tinggi, cenderung berubah warna menjadi lebih gelap.

Hal ini disebabkan oleh proses oksidasi serta larutnya pigmen dari makanan yang digoreng ke dalam minyak [30]. Selain warna, bau minyak goreng juga bisa berubah menjadi tengik jika digunakan terlalu sering. Pada suhu tinggi, senyawa seperti akrolein mulai terbentuk yang memberikan aroma tidak sedap. Selain itu, paparan udara juga mempercepat oksidasi minyak, menghasilkan senyawa hiperperoksida yang semakin memperburuk bau [30].

### 2.11.2 Kadar Air dalam Minyak Goreng

Kadar air menjadi salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas minyak goreng. Menurut SNI 7709:2019, batas maksimal kadar air yang diperbolehkan dalam minyak goreng adalah 0,10%. Jika kadar air melebihi angka ini, minyak lebih rentan mengalami reaksi hidrolisis yang mempercepat penurunan kualitasnya [30].

Tingginya kadar air dalam minyak goreng dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti suhu penggorengan dan jumlah makanan yang dimasak. Saat minyak dipanaskan, air dari bahan makanan akan bercampur dengan minyak. Jika minyak digunakan berulang kali, air yang terserap dalam minyak dapat memicu reaksi hidrolisis, yaitu proses di mana molekul air ( $H_2O$ ) memecah ikatan trigliserida dalam minyak, menghasilkan asam lemak bebas yang dampaknya menurunkan kualitas minyak goreng [30].

### 2.11.3 Kadar Asam Lemak Bebas pada Minyak Goreng

Kadar asam lemak bebas (ALB) adalah salah satu indikator kualitas minyak goreng yang menunjukkan tingkat degradasi minyak akibat proses pemanasan dan penggunaan berulang. Menurut SNI 7709:2019, kadar ALB dalam minyak goreng seharusnya tidak melebihi 0,30%. Secara umum, kadar ALB meningkat akibat proses hidrolisis, yaitu pemecahan trigliserida menjadi asam lemak bebas dan gliserol. Faktor utama yang memicu reaksi ini adalah suhu tinggi dan kontak dengan air selama proses penggorengan. Minyak dengan kadar ALB tinggi tidak hanya mengalami perubahan warna menjadi lebih gelap, tetapi juga menghasilkan senyawa seperti akrolein yang dapat menimbulkan bau tengik [30].

Berikut persamaan untuk menentukan kadar ALB pada minyak [31].

$$\text{Asam lemak bebas (\%)} = \frac{V NaOH \times N NaOH \times BM Minyak}{Massa Sampel} \times 100\% \quad (2.4)$$

© Hak cipta milik UIN Suska Riau  
Hak Cipta Dihindari Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagai bagian atau seluruhnya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
2. Dilarang mengutip sebagai bagian atau seluruhnya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Keterangan:

$V_{NaOH}$ : Volume larutan NaOH yang dibutuhkan dalam titrasi (mL)

Berat sampel : Massa sampel minyak (gram)

BM Minyak : Bobot molekul minyak, yaitu 25,6 (sebagai asam palmitat)

#### 2.11.4 Bilangan Peroksida

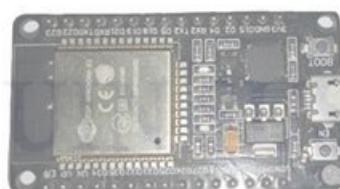
Menurut SNI 7709:2019, nilai bilangan peroksida dalam minyak goreng tidak boleh melebihi 10 mek O<sub>2</sub>/kg agar tetap aman dikonsumsi. Nilai yang lebih tinggi menandakan minyak telah mengalami degradasi akibat paparan oksigen, suhu tinggi, atau penggunaan berulang. Minyak yang teroksidasi cenderung mengalami perubahan warna menjadi lebih gelap dan mengeluarkan bau tengik akibat terbentuknya senyawa hiperperoksida [30].

### 2.12 Sistem Alat Ukur pada PLTS

#### 2.12.1 Perangkat *Hardware* untuk *Monitoring* Sistem PLTS

Sistem pengambilan data dapat menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama yang bertugas mengelola dan memproses data dari sensor. Dua sensor utama yang digunakan dalam sistem ini adalah DHT22 dan BH1750. Setelah data dari kedua sensor tersebut diproses oleh ESP32 hasilnya akan ditampilkan secara *real-time* pada layar LCD I2C sehingga memudahkan pemantauan kondisi suhu udara, kelembaban udara, dan cahaya dalam sistem.

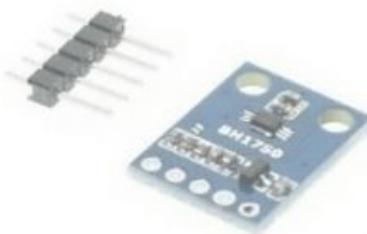
ESP32 adalah mikrokontroler buatan *Espressif Systems* yang sudah memiliki WiFi sendiri. Mikrokontroler ini menggunakan prosesor *dual-core* Xtensa LX6 dan berfungsi sebagai pengontrol utama dalam sistem. ESP32 menghubungkan sensor-sensor yang digunakan agar bisa mengumpulkan data dan mengirimkannya ke aplikasi monitoring untuk dipantau secara langsung [32]. Bentuk ESP 32 ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Modul ESP 32 [32]

Intensitas cahaya sekitar dapat diukur menggunakan sensor BH1750 dalam satuan lux. Komunikasi antara sensor ini dengan mikrokontroler atau sistem minimum dilakukan melalui protokol I2C. Sensor ini mampu mendekripsi cahaya dalam rentang 1 hingga 65.535

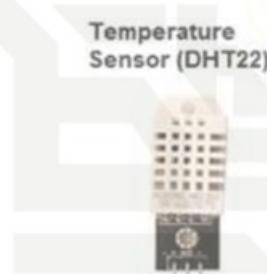
lux, di mana 1 lux menunjukkan bahwa cahaya 1 lumen tersebar pada area seluas 1 meter persegi [33]. Bentuk BH1750 ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Sensor BH1750 [33]

Hak cipta milik UIN Suska Riau  
Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa s

Sensor DHT22 adalah sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara. Sensor ini memiliki tiga pin utama, yaitu VCC sebagai sumber tegangan input, GND sebagai jalur *ground*, dan DATA yang mengirimkan data keluaran secara serial. DHT22 bekerja dengan mengubah perubahan suhu dan kelembaban menjadi sinyal digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Data yang dikirim melalui pin DATA memiliki format tertentu sehingga dapat diolah lebih lanjut untuk ditampilkan atau disimpan dalam sistem monitoring [34]. Bentuk DHT 22 ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 DHT22 [35]

LCD I2C adalah modul layar yang dapat terhubung ke papan Arduino atau papan pengendali lainnya melalui komunikasi I2C, yang hanya membutuhkan dua pin untuk data (SDA dan SCL). Layar ini memiliki tampilan negatif putih dengan latar belakang biru dan ukuran papan 80x36 mm. Modul ini bekerja dengan tegangan 5V dan memiliki alamat I2C antara 0x38 hingga 0x3F, dengan 0x3F sebagai alamat *default*.

Modul ini menggunakan antarmuka I2C dengan 4-bit data dan kontrol, dan dilengkapi dengan potensiometer untuk mengatur kontras serta opsi pengaturan *backlight* melalui *firmware* atau sambungan *jumper*. Bentuk LCD I2C ditunjukkan pada Gambar

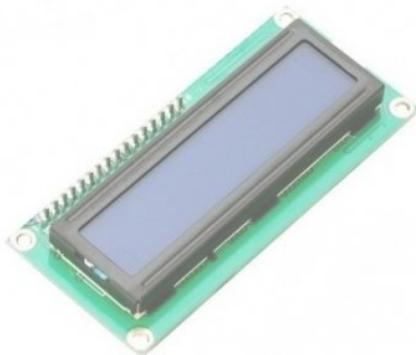
2.17.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.17 LCD I2C [36]

Volt ampere meter digital 4 digit DC tipe 4Bit *Red Blue* digunakan untuk mengukur tegangan dan arus listrik DC. Alat ini menggunakan layar LED digital berukuran 0.36 inci dengan tampilan warna merah dan biru. Alat ini dapat beroperasi dengan tegangan DC antara 4 hingga 30 volt, dan mampu mengukur tegangan mulai dari 0.000 hingga 100.0 volt. Untuk pengukuran arus, alat ini memiliki rentang 0.000 hingga 9.999 ampere. Dengan tingkat akurasi 1% ditambah atau dikurangi 1 digit. Pembaruan data dilakukan setiap 300 milidetik, sehingga hasil yang ditampilkan cukup responsif. Konsumsi arus dari alat ini sendiri cukup rendah, yaitu kurang dari 20 mA. Bentuk voltampere meter ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Voltampere Meter 4 Digit DC

### 2.12.2 Perangkat Software untuk Monitoring Sistem PLTS

Arduino IDE adalah aplikasi yang digunakan untuk menulis dan mengunggah program ke papan Arduino. Dengan Arduino IDE, kita bisa menulis kode menggunakan bahasa pemrograman C/C++, lalu mengompilasi dan mengirimkannya ke Arduino melalui kabel USB. Fitur utama dari Arduino IDE termasuk editor kode yang mudah digunakan, kemampuan untuk memeriksa dan mengubah kode, serta melihat hasilnya melalui serial monitor untuk memantau data atau kesalahan pada program [34].

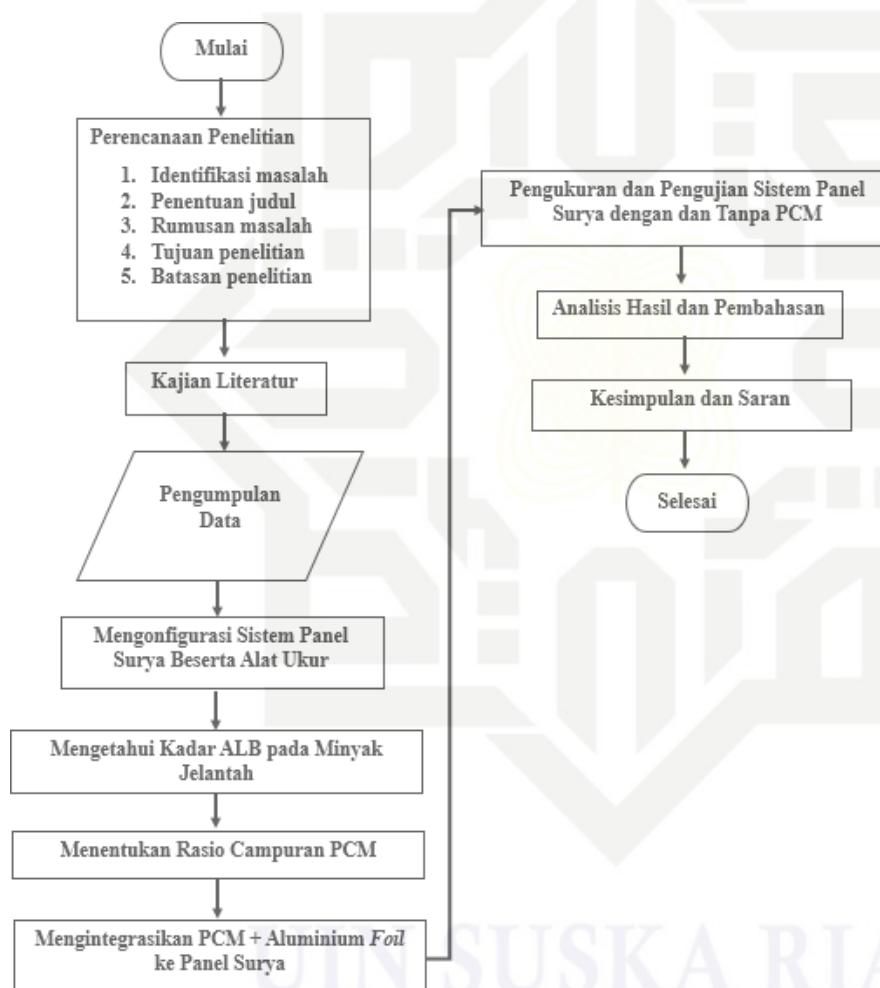
1. a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### Flowchart Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental karena melibatkan pengujian langsung penggunaan PCM dari minyak jelantah dan asam stearat pada panel surya. Dua sistem diuji, yaitu tanpa PCM dan dengan PCM + aluminium foil. Hasil penelitian ini berupa data numerik, grafik, tabel, dan analisis perbandingan yang menunjukkan performa panel surya dengan dan tanpa PCM. Berikut langkah-langkah pada penelitian ini yaitu :



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

## Perencanaan Penelitian

### 3.2.1 Identifikasi Masalah

Energi surya memiliki potensi besar di Indonesia, namun efisiensi panel surya menurun seiring peningkatan suhunya. Salah satu studi menunjukkan bahwa efisiensi turun sekitar 5,9% saat suhu naik dari 0°C ke 50°C.

### 3.2.2 Penentuan Judul

Judul penelitian ini adalah "Studi Eksperimental Pengaruh Phase Change Material dari Komposit Minyak Jelantah dan Asam Stearat sebagai Pendingin Panel Surya terhadap Daya Output yang Dihasilkan."

### 3.2.3 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh penurunan kinerja panel surya akibat peningkatan suhu. Untuk itu, dikembangkan sistem panel surya dengan alat ukur tegangan, arus, intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban udara guna memantau kondisi lingkungan dan performa panel. Sebelum merumuskan rasio campuran optimal minyak jelantah dan asam stearat sebagai PCM, dilakukan pengukuran kadar asam lemak bebas (ALB) sebagai indikator karakteristik awal minyak jelantah. Selanjutnya, dipilih rasio dengan titik leleh tertinggi untuk digunakan sebagai pendingin panel. PCM diintegrasikan pada bagian belakang panel surya dengan aluminium foil sebagai media sebar panas. Penelitian ini juga membandingkan daya keluaran panel dengan dan tanpa PCM untuk menilai efektivitasnya.

### 3.2.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini selaras dengan identifikasi masalah dan rumusan yang telah dijelaskan sebelumnya.

### 3.2.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada perbedaan daya output panel surya dengan dan tanpa pendingin PCM pada sistem *off-grid*. Sensor BH1750 dan DHT22 digunakan untuk memantau intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban udara. BH1750 mengukur intensitas cahaya dalam satuan lux, bukan representasi langsung radiasi matahari seperti solar power meter. Kecepatan angin dan *soiling* berada di luar cakupan penelitian. Pengambilan data dilakukan di area terbuka saat cuaca cerah atau berawan.

### 3.3 Kajian Literatur

Beberapa studi literatur dikumpulkan sebagai referensi dan rujukan, baik dari jurnal maupun artikel yang relevan dengan penelitian ini.

### 3.4 Pengumpulan Data

Tabel 3.1 Spesifikasi Panel Surya

Spesifikasi	Detail	Spesifikasi	Detail
Model	GH100P-36	Rated Maximum Power (Pm)	10W
Tolerance	$\pm 5\%$	Voltage at Pmax (Vmp)	18,20V
Current at Pmax (Imax)	0,55A	Open-Circuit Voltage (Voc)	22,30V
Short-Circuit Current (Isc)	0,60A	Normal Operating Cell Temp (NOCT)	47 $\pm 2^\circ\text{C}$
Maximum System Voltage	1000V DC	Operating Temperature	-40°C to +85°C
Series Fuse Rating	10A	Application Class	Class A
Fire Safety Class	Class C	Cell Technology	Polycrystalline Silicon (Poly-Si)
Weight	0,8 kg	Dimension (mm)	350 $\times$ 250 $\times$ 17 mm

Tabel 3.1 merupakan data spesifikasi panel surya yang diperoleh langsung dari *nameplate* yang tertera di bagian belakang panel. Informasi ini mencakup parameter seperti daya maksimum, tegangan dan arus nominal serta karakteristik lainnya. Data tersebut digunakan sebagai acuan dalam mengonfigurasi sistem panel surya beserta alat ukurnya.

Tabel 3.2 Spesifikasi BH 1750

Parameter	Spesifikasi	Parameter	Spesifikasi
Tipe Modul	GY-302	Sensor IC	BH1750FVI ROHM
Tegangan Catu Daya	5V DC	Rentang Data	0 - 65535
Tipe Data	16-bit Serial	Keluaran Digital	Langsung, tanpa perhitungan rumit, tanpa kalibrasi

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau  
Hak Cipta Dilindungi Undang Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menentukan dan menyebutkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Parameter	Spesifikasi	Parameter	Spesifikasi
Karakteristik Spektral	Mendekati sensitivitas visual manusia	Presisi Pengukuran	Akurasi tinggi hingga 1 lux untuk berbagai tingkat kecerahan
Ukuran	13.9 mm × 18.5 mm		

Tabel 3.2 merupakan data spesifikasi sensor BH1750 yang diperoleh dari referensi lembar data pabrikan. Spesifikasi ini mencakup rentang pengukuran intensitas cahaya, resolusi sensor, tegangan operasi, serta protokol komunikasi. Sensor ini digunakan dalam penelitian untuk mengukur intensitas cahaya yang diterima panel surya.

Tabel 3.3 Spesifikasi ESP32

Parameter	Spesifikasi	Parameter	Spesifikasi
Mikrokontroler	Tensilica 32-bit Single-/Dual-core CPU Xtensa LX6	Tegangan Operasi	3.3V
Tegangan Input	7-12V	Pin I/O Digital (DIO)	25
Pin Input Analog (ADC)	6	Pin Output Analog (DAC)	2
UART	3	SPI	2
I2C	3	Memori Flash	4 MB
SRAM	520 KB	Kecepatan Clock	240 MHz
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n/e/i	Keamanan Wi-Fi	WEP, WPA/WPA2

Tabel 3.3 merupakan data spesifikasi ESP32 yang diperoleh dari *datasheet* pabrikannya. Spesifikasi ini mencakup jenis mikrokontroler, tegangan operasi, jumlah pin I/O, antarmuka komunikasi, kapasitas memori, kecepatan *clock*, serta fitur konektivitas Wi-Fi. ESP32 berfungsi sebagai pengolah data utama dari seluruh sensor yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.4 Spesifikasi DHT22

Parameter	Spesifikasi	Parameter	Spesifikasi
Model	DHT22	Tegangan Operasi	3.3-6V DC
Output Signal	Digital (single-bus)	Elemen Sensor	Kapasitor polimer
Rentang Operasi	Kelembaban: 0-100% RH; Suhu: -40~80°C	Akurasi	Kelembaban: $\pm 2\%$ RH (Maks $\pm 5\%$ RH); Suhu: $\pm 0.5^\circ\text{C}$
Resolusi	Kelembaban: 0.1% RH; Suhu: $0.1^\circ\text{C}$	Repeatability	Kelembaban: $\pm 1\%$ RH; Suhu: $\pm 0.2^\circ\text{C}$
Histeresis Kelembaban	$\pm 0.3\%$ RH	Stabilitas Jangka Panjang	$\pm 0.5\%$ RH/tahun
Periode Sampling	Rata-rata: 2 detik	Interchangeability	Sepenuhnya dapat dipertukarkan

Tabel 3.4 merupakan data spesifikasi sensor DHT22 yang diperoleh dari *datasheet* pabrikan. Data ini mencakup parameter seperti rentang pengukuran suhu dan kelembaban, akurasi, serta tegangan operasional. Informasi tersebut digunakan sebagai acuan dalam pemantauan kondisi lingkungan seperti suhu ambien dan kelembaban udara selama pengujian panel surya.

Tabel 3.5 Spesifikasi LCD I2C

Spesifikasi	Detail
Tipe Tampilan	0.36" LED digital
Tegangan Operasi	DC 4 ~ 30V
Rentang Pengukuran Tegangan	DC 0.000 ~ 100.0V
Rentang Pengukuran Arus	0.000 ~ 9.999A
Waktu Refresh	300ms
Akurasi Pengukuran	1% ( $\pm 1$ digit)
Arus Operasi	< 20mA

Tabel 3.5 merupakan data spesifikasi modul LCD I2C yang diperoleh dari *datasheet* pabrikan. Data ini mencakup parameter seperti jenis tampilan, ukuran modul, alamat I2C, serta tegangan operasional. Informasi tersebut digunakan sebagai acuan dalam menampilkan data hasil pembacaan sensor secara *real-time* selama proses pemantauan sistem panel surya.

### 3.5

### Mengonfigurasi Sistem Panel Surya Beserta Alat Ukur

Bagian ini menjelaskan secara menyeluruh bagaimana sistem panel surya dan alat ukurnya dikonfigurasi sebelum dilakukan proses eksperimen. Konfigurasi dimulai dari evaluasi awal alat ukur, dilanjutkan dengan penyusunan rangkaian panel surya dan sistem monitoring yang menggunakan mikrokontroler, serta ditutup dengan prosedur pengambilan data pada panel surya tanpa sistem pendingin. Pengaturan sistem ini dilakukan agar pengambilan data berjalan sesuai dengan kebutuhan penelitian.

#### 3.5.1

#### Pengujian Awal Alat Ukur (Referensi Kalibrasi)

Pengujian awal dilakukan untuk mengevaluasi dua buah voltampere meter (VAM). Uji referensi ini penting dilakukan sebelum voltampere meter digunakan untuk mengukur output panel surya, agar selisih data yang mungkin muncul nantinya dapat diketahui penyebabnya.

Langkah-langkah pengujian:

1. Menyusun dua buah resistor keramik 20 ohm 20 watt secara seri untuk menghasilkan total resistansi sebesar 40 ohm sebagai beban tetap.
2. Menyambungkan beban ke sumber tegangan DC.
3. Mengukur tegangan dan arus menggunakan voltampere meter 1 dan voltampere meter 2 secara bergantian, kemudian mencatat hasilnya.
4. Membandingkan hasil pengukuran dari VAM 1 dan VAM 2 untuk mengetahui selisih atau deviasi nilai yang terjadi.

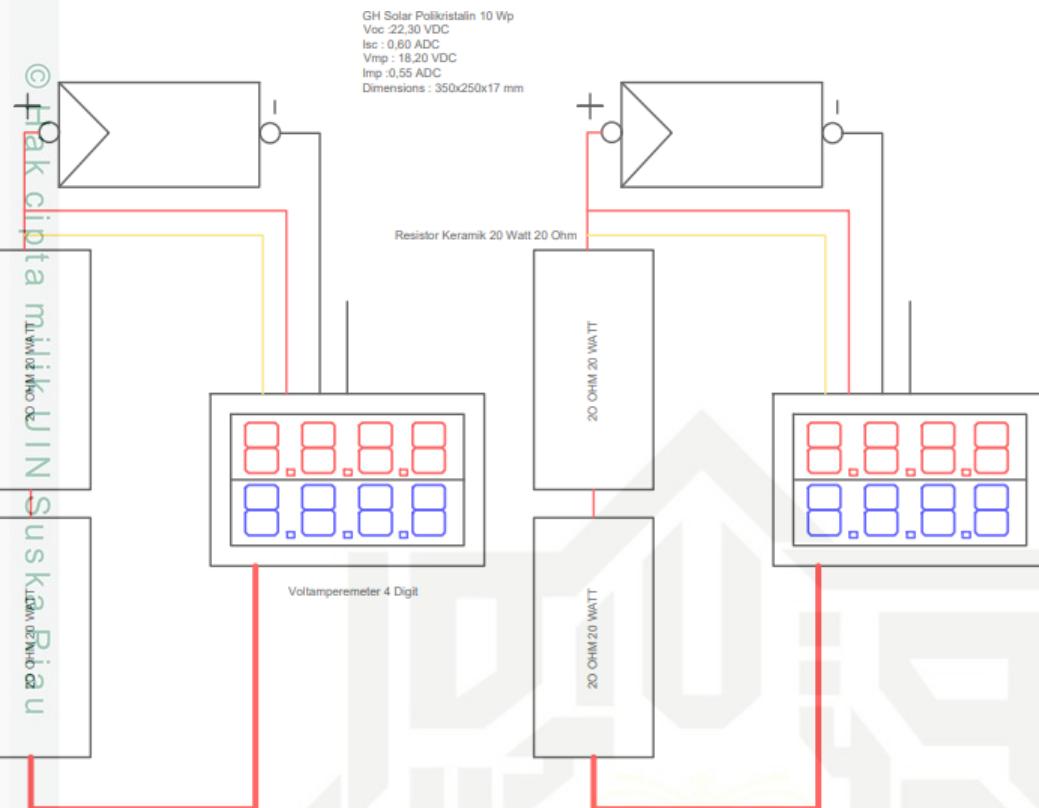
#### 3.5.2

#### Konfigurasi Rangkaian Sistem Panel Surya

Sistem panel surya yang diterapkan pada penelitian ini terdiri dari dua panel surya yang masing-masing terhubung ke beban tetap berupa dua resistor keramik 20 watt 20 ohm yang dirangkai secara seri, menghasilkan total resistansi 40 ohm per panel. Setiap panel juga dilengkapi dengan voltampere meter yang dipasang secara independen.

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang menggulff sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

3.5.2 Konfigurasi Rangkaian Sistem Panel Surya



Gambar 3.2 Sistem Panel Surya yang akan Diterapkan

### 3.5.2 Konfigurasi Sistem *Monitoring* Panel Surya

Untuk memantau kinerja panel surya, dibutuhkan sistem alat ukur. Dalam konfigurasi ini, digunakan beberapa sensor dan modul yang saling terhubung dan dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Sistem ini dirancang untuk menampilkan informasi seperti suhu dan kelembaban udara, serta intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya. Seluruh komponen *monitoring* IoT dan alat-alat resistor akan diletakkan di papan yang akan digunakan sebagai dudukan untuk mengamankan komponen agar tetap tertata rapi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.

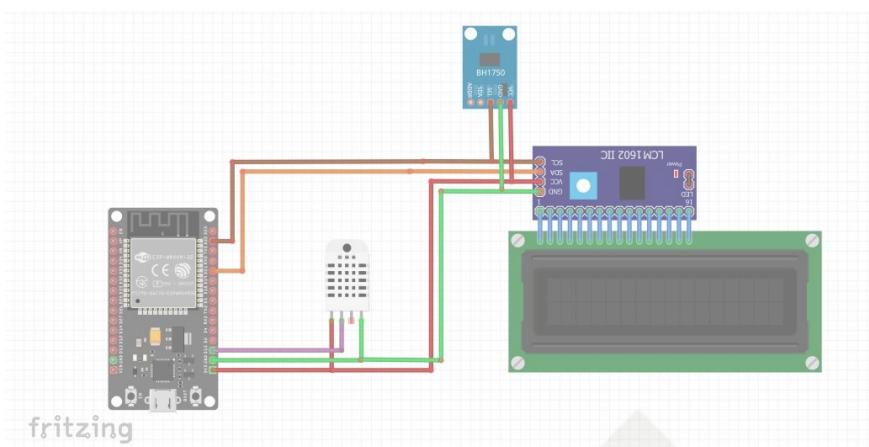
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

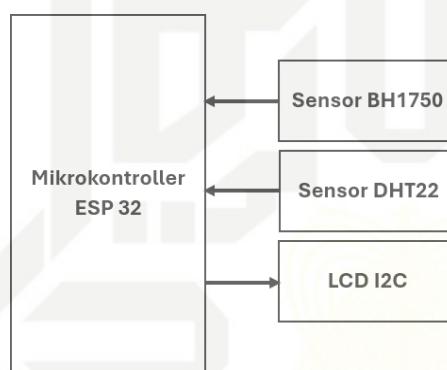
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan merujuk sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritisik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.3 Skema Wiring Sistem Alat Ukur



Gambar 3.4 Skema Blok Diagram Sistem Alat Ukur

Setelah sistem panel suryanya dikonfigurasi, dilakukan konfigurasi sistem alat ukur.

Sistem yang diterapkan adalah sebagai berikut.

### 1. ESP32

Mengukur suhu dan kelembaban udara sebagai faktor lingkungan yang dapat memengaruhi kinerja panel surya. Sensor ini akan ditempatkan di bawah panel surya atau di belakang.

### 2. Sensor BH1750

Berfungsi untuk mengukur intensitas cahaya matahari yang diterima oleh panel surya, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap daya keluaran panel. Sensor ini akan dipasang di samping panel dengan sudut yang sama dengan kemiringan panel.

### 3. LCD I2C

LCD I2C berfungsi untuk menampilkan semua data yang dihasilkan oleh sensor-sensor seperti intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban udara.

Tabel 3. 6 Wiring Sistem Alat Ukur

Komponen	Pin Komponen	Koneksi ke ESP32	Keterangan
DHT22	VCC	3.3V	Sumber daya
	GND	GND	Ground
	DATA	GPIO 15	Data suhu dan kelembaban
BH1750	VCC	3.3V	Sumber daya
	GND	GND	Ground
	SDA	GPIO 21	I2C Data
	SCL	GPIO 22	I2C Clock
LCD I2C	VCC	5V atau 3.3V*	Sumber daya ( <i>cek modul LCD</i> )
	GND	GND	Ground
	SDA	GPIO 21	I2C Data (bersama BH1750)
	SCL	GPIO 22	I2C Clock (bersama BH1750)

### 3.5.3 Pengujian Panel Surya Tanpa Pendingin

Setelah sistem alat ukur dan panel selesai dikonfigurasi, dilakukan pengambilan data performa awal dua panel surya dalam kondisi tanpa diberi pendingin. Tujuan dari pengujian ini adalah memperoleh data dasar (*baseline*) untuk dibandingkan dengan hasil setelah pemberian sistem pendingin.

Langkah-langkah pengujian:

1. Menghubungkan masing-masing panel surya ke resistor 40 ohm dan voltampere meter yang telah terpasang.

2. Melakukan pencatatan tegangan dan arus dari masing-masing panel secara serentak.

3. Mengambil data setiap 25 menit dimulai dari pukul 11.10 hingga 13.10 WIB.

4. Menganalisis nilai selisih daya dari dua panel untuk mengetahui kinerjanya.

5. Melakukan analisis tambahan dengan mempertimbangkan toleransi alat ukur,

**3.6.6. Mengetahui Kadar ALB pada Minyak Jelantah**

Hak Cipta Dilindungi Undang  
dilakukan uji laboratorium menggunakan metode titrasi basa dengan indikator fenolftalein.

Proses ini dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

**6. Persiapan Pelarut**

Sebanyak 50 mL etanol dihangatkan hingga mencapai suhu sekitar 40°C. Pemanasan dilakukan dengan hati-hati agar suhu tidak melebihi titik didih etanol untuk mencegah penguapan.

**7. Persiapan Sampel Minyak**

Minyak jelantah sekitar 3 gram ditimbang menggunakan neraca analitik, lalu dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer bersih dan kering.

**8. Pencampuran Larutan**

Etanol hangat dituangkan ke dalam labu Erlenmeyer yang telah berisi minyak. Campuran ini kemudian dipanaskan kembali menggunakan *hot plate* sambil diaduk hingga tercampur homogen, tetap menjaga suhu pada kisaran 40°C.

**9. Penambahan Indikator**

Setelah larutan tercampur dengan baik, ditambahkan 3 tetes indikator fenolftalein. Pada kondisi awal, larutan akan tetap jernih atau tidak berwarna.

**10. Proses Titrasi**

Titrasi dilakukan dengan meneteskan larutan NaOH 0.1 N ke dalam campuran secara perlahan sambil diaduk hingga terjadi perubahan warna menjadi merah muda yang stabil selama minimal 30 detik.

**11. Pencatatan Data**

Volume larutan NaOH 0.1 N yang digunakan selama titrasi dicatat secara teliti untuk kemudian digunakan dalam perhitungan kadar ALB minyak.

Tujuan dari pengujian kadar Asam Lemak Bebas (ALB) ini adalah untuk mengetahui seberapa besar kandungan ALB yang terdapat dalam minyak jelantah yang digunakan pada penelitian. Data ini bukan digunakan untuk menentukan kelayakan konsumsi, melainkan

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

hanya sebagai informasi awal atau indikator awal yang bersifat informatif dengan menggambarkan karakteristik minyak jelantah tersebut. Dengan mengetahui kadar ALB, peneliti dapat memahami sifat kimia dari minyak yang akan digunakan.

3.7

© Hikmati amik UIN Suska Riau  
Hk Cinta Diliadungji UIN-Suska Riau  
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

### Menentukan Rasio Campuran PCM

Penentuan rasio campuran PCM dilakukan untuk mencari komposisi antara minyak jelantah dan asam stearat yang menghasilkan titik leleh paling tinggi. Tujuannya adalah agar PCM dapat menyerap panas secara efektif dan PCM tidak cepat meleleh sehingga PCM diharapkan bisa bekerja lebih maksimal sebagai sistem pendinginan pada panel surya di siang hari. Asam stearat yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *marketplace* Kimia Market yang berlokasi di Bandung dan bentuknya berupa zat padatan.

#### 3.7.1 Pembuatan Sampel

Untuk mengetahui pengaruh rasio campuran terhadap titik leleh PCM, dibuat empat sampel dengan perbandingan volume minyak jelantah dan massa asam stearat yang berbeda, namun tetap menjaga total massa campuran sebesar 15 gram. Berikut ini rincian masing-masing sampel:

1. Sampel pertama dibuat dengan rasio 30:70. Campuran ini terdiri dari 4.5 gram minyak jelantah dan 10.5 gram asam stearat. Rasio ini mengandung lebih banyak asam stearat, sehingga bisa diketahui apakah semakin banyak asam stearat akan membuat titik leleh jadi lebih tinggi atau sebaliknya.
2. Sampel kedua memiliki rasio 40:60, yaitu 6 gram minyak jelantah dan 9 gram asam stearat. Perbandingan ini masih didominasi oleh asam stearat, tetapi jumlah minyak jelantah sedikit lebih banyak dibandingkan sampel sebelumnya.
3. Sampel ketiga menggunakan rasio 50:50. Campurannya terdiri dari 7.5 gram minyak jelantah dan 7.5 gram asam stearat. Rasio ini seimbang, sehingga bisa dilihat bagaimana titik leleh saat kedua bahan sama banyak.
4. Sampel keempat memiliki rasio 60:40, yaitu 9 gram minyak jelantah dan 6 gram asam stearat. Pada rasio ini, minyak jelantah lebih dominan. Tujuannya untuk melihat apakah jumlah minyak yang lebih banyak membuat campuran tersebut titik lelehnya tinggi atau justru rendah.

### 3.7.2 Proses Pencampuran

Dalam proses pencampuran bahan PCM, digunakan *magnetic stirrer* sebagai alat pengaduk untuk memastikan dua bahan minyak jelantah dan asam stearat tercampur secara merata atau homogen. Pengadukan ini dibantu oleh *hot plate* yang berfungsi mengontrol suhu zat selama proses berlangsung.

Campuran dikatakan homogen apabila sudah tidak terlihat gumpalan pada larutan. Artinya, campuran tampak bening atau menyatu sempurna, tanpa ada bagian yang terpisah antara minyak dan asam stearat. Setelah campuran dipastikan homogen, sampel kemudian didiamkan di ruangan terbuka hingga mendingin dan mengeras menjadi padatan. Proses ini dilakukan tanpa alat bantu pendingin.

### 3.7.3 Penentuan Titik Leleh

Penentuan titik leleh merupakan salah satu langkah penting dalam karakterisasi material PCM. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui suhu saat campuran PCM mengalami perubahan fase dari padat ke cair. Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

#### 1. Persiapan Sampel

Campuran PCM terlebih dahulu didinginkan hingga mencapai kondisi padat secara menyeluruh sebelum dilakukan pengujian. Pengambilan keempat sampel nilainya 1.10 g.

#### 2. Penempatan Sampel

Sampel padat dimasukkan ke dalam wadah kaca (seperti tabung reaksi atau vial), kemudian diletakkan di dalam *beaker glass* yang telah diisi dengan akuades. Akuades berfungsi sebagai media pemanas tidak langsung untuk menjaga kestabilan pemanasan.

#### 3. Pemanasan Bertahap

Beaker berisi akuades dan sampel dipanaskan menggunakan *hot plate* dengan meningkatkan suhu secara bertahap. Pada awal, suhu *hot plate* diatur 100 derajat celsius kemudian saat menit ke-10, dilakukan turun sebesar 90 dan menit ke 30 dilakukan peningkatan sebesar 120 derajat celsius. Pemanasan perlahan ini bertujuan agar perubahan fase dari padat ke cair dapat teramati secara jelas tanpa lonjakan suhu.

#### 4. Pemantauan Suhu dan Fase

Sebuah termometer atau sensor suhu digunakan untuk mencatat suhu saat awal mencair dan saat sampel mencair sepenuhnya. Suhu pada saat transisi fase inilah yang menjadi acuan sebagai titik leleh PCM.

#### Pencatatan Waktu

Selain suhu, waktu yang diperlukan sejak awal pemanasan hingga pencairan sempurna juga dicatat untuk melengkapi informasi karakteristik termal bahan.

#### Kondisi pengujian

Seluruh proses pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan kondisi lingkungan yang stabil untuk menghindari fluktuasi suhu eksternal yang dapat memengaruhi hasil.

### 3.8 Mengintegrasikan PCM dan Aluminium Foil ke Panel Surya

Setelah diperoleh rasio campuran PCM dengan titik leleh tertinggi, campuran PCM kemudian dibuat kembali sesuai prosedur sebelumnya untuk disesuaikan dengan dimensi panel surya yang digunakan. Sebelum integrasi dilakukan, terlebih dahulu dihitung volume bagian belakang panel surya, agar dapat diketahui massa total campuran yang dibutuhkan. Berdasarkan volume tersebut, massa minyak jelantah dan asam stearat ditentukan sesuai dengan rasio yang terpilih. PCM ini nantinya berfungsi sebagai sistem pendingin pasif panel surya.

Proses integrasi dimulai dengan memotong aluminium foil berukuran  $35 \times 25$  cm menggunakan foil merek Klin Pak ukuran  $30 \text{ cm} \times 8 \text{ meter}$  yang dibeli di supermarket. Aluminium foil ini dipasang rapi di bagian belakang panel surya tanpa menutupi kotak hitam terminal, dan diharapkan dapat membantu distribusi panas secara merata. Setelah terpasang, campuran PCM dituangkan ke permukaan aluminium foil dan dibiarkan hingga mengeras.

### 3.9 Pengujian dengan dan Tanpa PCM Panel Surya

#### 3.9.1 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan dengan membandingkan dua panel surya, yaitu panel yang menggunakan PCM dan panel yang tidak menggunakan PCM. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat perbedaan kinerja dari kedua panel berdasarkan data pengukuran yang diperoleh.

Beberapa parameter diukur untuk mendukung analisis hasil. arus, tegangan, dan daya panel surya diukur menggunakan volt-amperemeter. Untuk mengetahui intensitas cahaya yang diterima panel, digunakan sensor BH1750. Sedangkan suhu ambien dan kelembaban udara diukur menggunakan sensor DHT22.

### 3.9.3 Waktu Pengambilan Data dan Kondisi Pengujian

Data diambil setiap 25 menit, mulai pukul 11.10 sampai 13.10 WIB. Pengujian dilakukan selama dua hari. Kondisi cuaca saat pengujian mencakup cuaca cerah dan berawan. Pengambilan data juga didokumentasikan melalui pengambilan gambar atau foto. Setiap foto yang diambil telah dilengkapi dengan informasi berupa koordinat geografis, waktu, tanggal, dan lokasi secara otomatis melalui fitur *timestamp* pada *smartphone*. Dokumentasi ini akan dikumpulkan selama proses pengujian berlangsung.

Setelah data tegangan dan arus dari masing-masing panel dikumpulkan, dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai daya dan selisih daya antara dua panel. Selanjutnya, dilakukan analisis tambahan dengan mempertimbangkan toleransi dari alat ukur untuk memastikan apakah perbedaan daya yang tercatat benar-benar berasal dari pengaruh sistem seperti penggunaan PCM, atau masih berada dalam batas ketidakpastian pengukuran.

### 3.10 Analisis Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah dirancang, analisis hasil dan pembahasan akan membahas beberapa aspek utama:

## 1. Desain dan Konfigurasi Sistem

Pada tahap desain dan konfigurasi sistem panel surya, dilakukan perancangan sistem pengukuran yang terdiri dari panel surya, volt-amperemeter, sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya, serta sensor DHT22 untuk memantau suhu dan kelembaban udara. Setelah seluruh komponen dirakit, dilakukan evaluasi awal menggunakan power supply dan beban resistor untuk memastikan bahwa alat ukur bekerja dengan baik.

Selanjutnya, dilakukan pengujian panel surya tanpa PCM sebagai tahap awal. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan seluruh parameter dapat terbaca dengan baik dan sistem berjalan sesuai dengan yang dirancang. Data tegangan dan arus yang diperoleh dari volt-amperemeter digunakan langsung dalam

analisis, dengan mempertimbangkan toleransi alat ukur sebagai bagian dari validasi data. Hasil pengujian ini kemudian dijadikan dasar untuk pembahasan pada bab selanjutnya, dengan mengacu pada teori dan referensi yang telah dijelaskan di Bab 2 Tinjauan Pustaka.

### **Mengetahui Kadar ALB Minyak Jelantah**

Pengujian kadar Asam Lemak Bebas (ALB) dilakukan untuk memperoleh informasi awal mengenai kondisi minyak jelantah yang digunakan dalam penelitian. Pengujian ini tidak bertujuan untuk dianalisis secara mendalam atau dibandingkan dengan standar mutu pangan, melainkan hanya sebagai indikator karakteristik minyak yang digunakan. Nilai ALB yang diperoleh memberikan gambaran umum terhadap kualitas minyak jelantah tersebut. Setelah hasil diperoleh, barulah dilakukan pembahasan yang mengacu pada teori atau penelitian terkait yang telah dijelaskan pada Bab 2.

### **3. Pemilihan Rasio PCM**

Penentuan rasio campuran antara minyak jelantah dan asam stearat dilakukan untuk mengetahui komposisi yang memiliki titik leleh paling tinggi. Empat sampel dengan rasio berbeda dibuat dan diuji melalui proses pemanasan bertahap hingga mencair, kemudian didinginkan. Data yang dicatat meliputi suhu saat mulai mencair, suhu saat mencair sepenuhnya, serta waktu yang dibutuhkan selama proses pencairan. Dari hasil ini, dapat diketahui karakteristik termal masing-masing campuran PCM. Setelah data diperoleh, pembahasan akan dilakukan dengan merujuk pada teori atau penelitian terkait yang telah dibahas pada Bab 2.

### **4. Evaluasi Pengaruh PCM terhadap Daya Keluaran**

Pada Data diambil setiap 25 menit, mulai pukul 11.10 hingga 13.10 WIB, selama dua hari pengujian. Kondisi cuaca selama proses ini bervariasi antara cerah dan berawan. Setiap pengambilan data didokumentasikan melalui foto yang dilengkapi informasi otomatis, seperti koordinat geografis, waktu, tanggal, dan lokasi, menggunakan fitur *timestamp* pada *smartphone*. Dokumentasi ini dikumpulkan selama proses pengujian berlangsung untuk memperkuat validitas data lapangan.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Setelah seluruh data diperoleh dari volt-amperemeter dan sistem monitoring IoT (yang mencakup intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban udara), dilakukan perhitungan daya output dari masing-masing panel surya, baik yang menggunakan PCM maupun tanpa PCM. Selanjutnya, dilakukan analisis selisih daya pada setiap waktu pencatatan untuk mengetahui perbedaan performa antar panel.

Sebagai tambahan, dilakukan juga analisis berdasarkan toleransi alat ukur, untuk mengetahui apakah perbedaan daya yang tercatat memang berasal dari pengaruh penggunaan PCM atau masih berada dalam rentang ketidakpastian alat ukur. Toleransi yang digunakan mengacu pada spesifikasi volt-amperemeter, yaitu  $\pm 1\%$  dari nilai baca ditambah satu digit terakhir, dengan resolusi tegangan dan arus menyesuaikan sistem auto-ranging. Hasil analisis ini selanjutnya dibahas dengan mengacu pada teori dan referensi yang telah dijelaskan di Bab 2 Tinjauan Pustaka.

**3.11 Kesimpulan dan Saran**

Penelitian ini menunjukkan apakah PCM dari minyak jelantah dan asam stearat efektif dalam mendinginkan panel surya dan meningkatkan daya keluarannya. Ke depan, penelitian dapat dikembangkan dengan mencoba campuran PCM lain, menguji di berbagai kondisi lingkungan, atau menggabungkan PCM dengan metode pendinginan lain untuk hasil yang lebih optimal.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sebelum panel diberi pendingin, selisih daya antara dua panel berada pada kisaran **0.000** hingga **0.067** Watt. Nilai selisih tersebut menunjukkan bahwa daya output kedua panel hampir identik. Jika dilihat berdasarkan rentang toleransi alat ukur, hasil daya dari kedua panel juga saling bertumpang tindih, yang berarti tidak terdapat perbedaan signifikan dalam pembacaan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kondisi awal kedua panel setara, dan selisih daya yang sangat kecil tersebut masih berada dalam batas ketidakpastian alat ukur.
2. Minyak jelantah yang digunakan memiliki kadar ALB sebesar 0,850%.
3. Berdasarkan hasil pengujian empat rasio campuran, yaitu 30:70, 40:60, 50:50, dan 60:40, sampel dengan rasio 30:70 memiliki titik leleh tertinggi sebesar 53°C.
4. Hasil pengujian pada 6 dan 8 Juli 2025 menunjukkan bahwa pada waktu tertentu, seperti pukul 11:25 WIB (6 Juli) dan 11:10 WIB (8 Juli), rentang daya panel dengan PCM tidak bertumpang tindih dengan panel tanpa PCM dan melebihi toleransi alat ukur. Hal ini mengindikasikan bahwa PCM berpengaruh dalam meningkatkan daya output panel surya.

#### Saran

Penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan di laboratorium khusus yang bisa mengatur besarnya radiasi matahari, suhu, dan faktor lingkungan lainnya. Dengan kondisi yang lebih terkontrol, hasil pengujian akan lebih akurat dan tidak terganggu oleh perubahan cuaca. Selain itu, disarankan juga untuk mencoba beberapa bahan tambahan lain yang memiliki sifat termal serupa, agar bisa dibandingkan mana yang paling efektif dalam menyimpan dan melepaskan panas.

Penelitian ke depan juga bisa dilakukan di berbagai kondisi lingkungan, baik di daerah tropis maupun di negara dengan empat musim, untuk melihat bagaimana kinerja PCM dalam situasi yang berbeda. Selain itu, perlu dilakukan analisis dari sisi biaya agar dapat diketahui apakah penggunaan bahan seperti minyak jelantah ini layak digunakan dalam skala luas secara ekonomis.

- 5.1. Hak Cipta Rindung Sindang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## DAFTAR PUSTAKA

- © Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
- Dewan Energi Nasional, “Outlook Energi Indonesia 2023,” Jakarta, 2023. Accessed: Feb. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.den.go.id/publikasi/Outlook-Energi-Indonesia>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Implementasi Peraturan Menteri ESDM tentang PLTS Atap.” Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/implementasi-peraturan-menteri-esdm-tentang-plts-atap>
- M. Khalis, F. Id Ouissaaden, S. El Khaldi, H. Kamel, F. Elmourabit, and S. Dlimi, “Studying effect of temperature on the efficiency of solar cells through the interpolation method,” *Hybrid Advances*, vol. 6, p. 100231, 2024.
- H. S. Jaya, M. H. Rahmat, and A. Asrori, “Analisis Pengaruh Suhu Panel Surya Terhadap Output Panel Performance,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 42–51, 2024.
- S. Preet, “A review on the outlook of thermal management of photovoltaic panel using phase change material,” *Energy and Climate Change*, vol. 2, p. 100033, 2021.
- C. Chen *et al.*, “Recent advances in solar energy full spectrum conversion and utilization,” *ES Energy & Environment*, vol. 11, no. 4, pp. 3–18, 2021.
- S. Preet, “A review on the outlook of thermal management of photovoltaic panel using phase change material,” *Energy and Climate Change*, vol. 2, p. 100033, 2021.
- M. Sharaf, M. S. Yousef, and A. S. Huzayyin, “Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems,” *Environmental science and pollution research*, vol. 29, no. 18, pp. 26131–26159, 2022.
- E. K. A. P. LAKSANA, O. SANJAYA, S. SUJONO, S. BROTO, and N. FATH, “Sistem pendinginan panel surya dengan metode penyemprotan air dan pengontrolan suhu air menggunakan peltier,” *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 10, no. 3, p. 652, 2022.

- [10] M. Rezki, R. Rusilawati, and I. Irfan, "Optimalisasi Daya Panel Surya Menggunakan Sistem Pendingin Berbasis Air Otomatis," *EEICT (Electric, Electronic, Instrumentation, Control, Telecommunication)*, vol. 6, no. 2, 2023.
- [11] Z. Arifin, S. D. Prasetyo, B. A. Tribhuwana, D. Tjahjana, R. A. Rachmanto, and B. Kristiawan, "Photovoltaic performance improvement with phase change material cooling treatment," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 953–960, 2022.
- [12] D. Karimi *et al.*, "Thermal performance enhancement of phase change material using aluminum-mesh grid foil for lithium-capacitor modules," *J Energy Storage*, vol. 30, p.101508, 2020.
- [13] C. Zhu, Y. Chen, R. Cong, F. Ran, and G. Fang, "Improved thermal properties of stearic acid/high density polyethylene/carbon fiber composite heat storage materials," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 219, p. 110782, 2021.
- [14] M. Irsyad, Amrizal, Harmen, Amrul, M. D. Susila Es, and A. R. Diva Putra, "Experimental study of the thermal properties of waste cooking oil applied as thermal energy storage," *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101080, 2023.
- [15] D. Huang *et al.*, "Highly thermal conductive shape-stabilized composite phase change materials based on boron nitride and expanded graphite for solar thermal applications," *RSC Adv*, vol. 13, no. 19, pp. 13252–13262, 2023.
- [16] Y. Liu, N. Wang, and Y. Ding, "Preparation and properties of composite phase change material based on solar heat storage system," *J Energy Storage*, vol. 40, p. 102805, 2021.
- [17] M. V Dambhare, B. Butey, and S. V Moharil, "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, p. 012053.
- [18] M. Aghaei, N. M. Kumar, A. Eskandari, H. Ahmed, A. K. V. de Oliveira, and S. S. Chopra, "Chapter 5 - Solar PV systems design and monitoring," in *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, S. Gorjian and A. Shukla, Eds., Academic Press, 2020, pp. 117–145.

- [19] **Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa men-  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- [20] **Check Cipta milik UIN Suska Riau**
- [21] E. Faizal, Y. A. Winoko, M. S. Mustapa, and M. Kozin, "Solar Charger Controller Efficiency Analysis of Type Pulse Width Modulation (PWM) and Maximum Power Point Tracking (MPPT)," *Asian Journal Science and Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 90, Jan. 2023.
- [22] K. P. Kampouris, V. Drosou, C. Karytsas, and M. Karagiorgas, "Energy storage systems review and case study in the residential sector," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2020, p. 012033.
- [23] A. P. Ratnadewi and Y. Susanti, *Dasar-dasar Rangkaian Listrik: Disertai Contoh Soal-soal dan Pembahasannya*. Bandung: Alfabeta, 2018.
- [24] I. Bizzy, *Teknologi Tenaga Surya*. Palembang: UPT. Penerbit dan Percetakan Universitas Sriwijaya, 2020.
- [25] R. Rusda, D. A. R. Ridho, and M. A. Putra, "Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Penerimaan Iradiasi Matahari Dan Daya Keluaran Yang Dihasilkan Panel Surya," *PoliGrid*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [26] F. A. F. Sugiono, P. D. Larasati, and E. A. Karuniawan, "Pengaruh sudut kemiringan panel surya terhadap potensi pemanfaatan plts rooftop di bengkel teknik mesin, Politeknik Negeri Semarang," *Jurnal Rekayasa Energi*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2022.
- [27] H. Darmawan, A. S. Wardhana, and S. H. Budi, "Studi Investigasi Keluaran Daya Sistem PLTS dengan PV Optimizer pada Kondisi Kaca Panel Surya Retak dan Bayangan," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika (SNESTIK)*, 2024, pp. 269–280.
- [28] T. Rihayat, *Buku Teknologi Photovoltaic*. Buketrata: Yayasan Puga Aceh Riset, 2019.
- [29] F. M. Dewadi and Maryadi, *PERPINDAHAN PANAS DASAR DAN PRAKTIS DARI PERSPEKTIF AKADEMISI DAN PRAKTIKI*. Bandung: INDIE PRESS, 2022.
- [30] S. Mandal, "Advancements in Phase Change Materials: Stabilization Techniques and Applications," *Advancements in Phase Change Materials: Stabilization Techniques and Applications*, pp. 254–268, 2024.
- [31] A. S. Fleischer, *Thermal energy storage using phase change materials: fundamentals and applications*. Springer, 2015.

[30] S. Mucti, R. Purwasih, and I. D. Destiana, “Analisis Mutu Minyak Goreng yang Dipakai oleh Pedagang Gorengan di Pasar Pujasera Subang,” *Edufortech*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2023.

[31] H. P. Hutapea, Y. S. Sembiring, and P. Ahmadi, “Uji kualitas minyak goreng curah yang dijual di pasar tradisional Surakarta dengan penentuan kadar air, bilangan asam dan bilangan peroksid,” *QUIMICA: Jurnal Kimia Sains Dan Terapan*, vol. 3, no. 1, pp. 6–11, 2021.

[32] A. Basit, R. Khoeruzzaman, R. Rais, and A. Maulana, “Monitoring System Automatic Solar Cell Sebagai Sumber PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) Berbasis Microcontroller,” *Smart Comp Jurnalnya Orang Pint. Komput*, vol. 13, no. 1, pp. 175–182, 2024.

[33] M. Y. Albustomi, I. M. Wartana, and A. U. Krismanto, “Merancang Sistem Monitoring Dan Menganalisa Kinerja Realtime Pada PLTS Skala Kecil,” *Magnetika: Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 357–364, 2023.

[34] A. B. Kusumaningyas, D. Monika, and D. A. Sihite, “Monitoring Alat Pendingin Panel Surya Menggunakan Uap Air Berbasis IoT,” *Electrices*, vol. 6, no. 1, pp. 27–36, 2024.

[35] A. Achmad, I. S. Areni, E. Palantei, A. D. Achmad, and M. Muliadi, “IoT Network of Sensor Array for Intrusion Detection and Diagnosis of Electrical Systems,” *International Journal Advanced Sciense Engineering Information Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 446–452, 2022.

[36] M. Yasin, E. Apriaskar, and D. Djuniadi, “Simulasi Monitoring Arus, Tegangan dan Daya Panel Surya,” *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 87–92, 2023.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

©Hak Cipta milik UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Sistem Informasi

Statistik

Statistik

Sistem

Informasi

Statistik

Sistem

## LAMPIRAN A

### PENGUJIAN PANEL SURYA SEBELUM DIBERI PENDINGIN

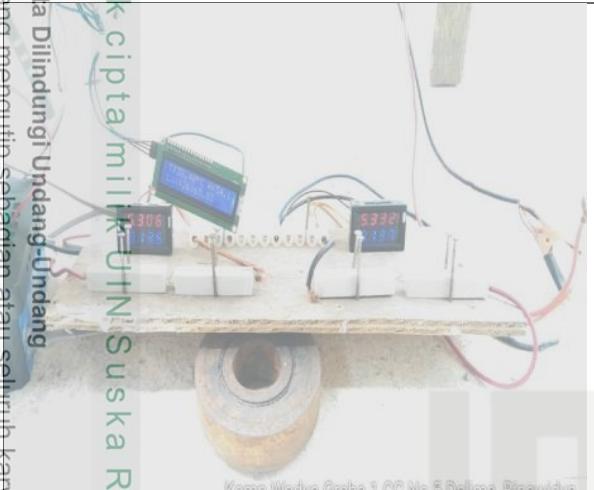
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

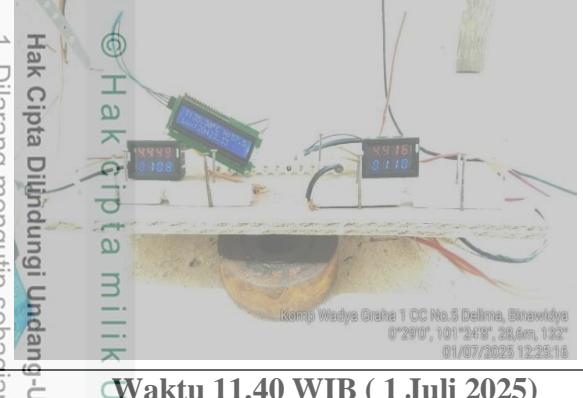
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa meneentuk dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

 <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 35.4m, 125° 01/07/2025 11:10:25</p>	 <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 32.6m, 121° 01/07/2025 11:25:08</p>
<p><b>Waktu 11.10 WIB ( 1 Juli 2025)</b></p>  <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 35.5m, 125° 01/07/2025 11:40:20</p>	<p><b>Waktu 11.25 WIB ( 1 Juli 2025)</b></p>  <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36.8m, 127° 01/07/2025 11:55:06</p>
<p><b>Waktu 11.40 WIB ( 1 Juli 2025)</b></p>  <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 35.5m, 125° 01/07/2025 12:10:35</p>	<p><b>Waktu 11.55 WIB ( 1 Juli 2025)</b></p>  <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 33.1m, 124° 01/07/2025 12:10:35</p>
<p><b>Waktu 12.10 WIB ( 1 Juli 2025)</b></p>  <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 35.5m, 125° 01/07/2025 12:10:35</p>	<p><b>Waktu 11.25 WIB ( 1 Juli 2025)</b></p>  <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 35.5m, 125° 01/07/2025 12:10:35</p>

	
<b>Waktu 11.40 WIB ( 1 Juli 2025)</b>	<b>Waktu 11.55 WIB ( 1 Juli 2025)</b>
<b>Hak Cipta milik UIN Suska Riau</b>	<b>State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau</b>

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa meneentukkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## © PENGUJIAN SAMPEL (ASAM LEMAK BEBAS DAN TITIK LELEH)



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

## LAMPIRAN C

### PENGUJIAN PANEL SURYA SETELAH DIBERI PENDINGIN BESERTA DATA ALAT UKUR VOLTAMPERE METER

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1.

- Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa meneentukkan dan menyebutkan sumber.
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2.

Waktu 11.10 WIB WIB (6 Juli 2025)

Waktu 11.25 WIB (6 Juli 2025)

Waktu 11.40 WIB (6 Juli 2025)

Waktu 11.55 WIB (6 Juli 2025)

Waktu 12.10 WIB (6 Juli 2025)

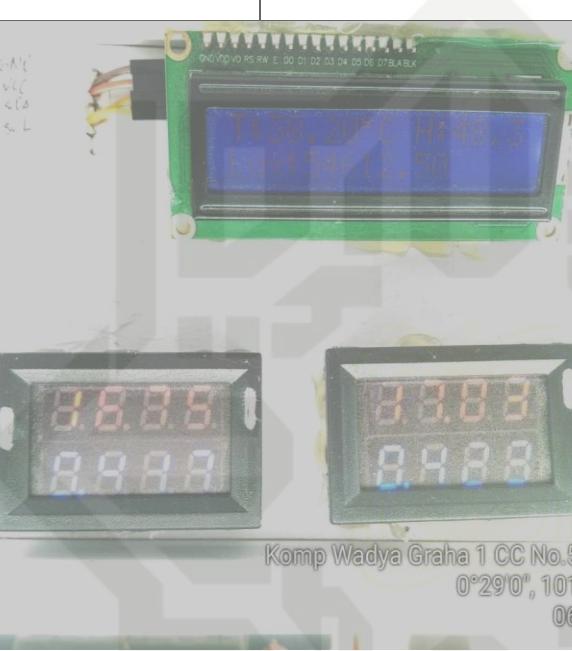
Waktu 12.25 WIB (6 Juli 2025)

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa meneentuk dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

## 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

 <p>Komp Wadya Graha 1 CC No 5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 39,1m, 134° 06/07/2025 12:40:22</p> <p>Waktu 11.40 WIB (6 Juli 2025)</p>	 <p>Komp Wadya Graha 1 CC No 5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 39,1m, 134° 06/07/2025 12:55:05</p> <p>Waktu 11.55 WIB (6 Juli 2025)</p>
 <p>Komp Wadya Graha 1 CC No 5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 39,1m, 134° 06/07/2025 13:10:05</p> <p>Waktu 13.10 WIB (6 Juli 2025)</p>	

<p>© Hak cipta milik UIN SUSKA RIAU</p> <p><b>Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang</b></p> <p>1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mendeklarkan dan menyebutkan sumber.</p> <p>a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.</p> <p>b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.</p> <p>2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.</p>	 <p>T: 35.00°C H: 57.9 Lux: 37116.66</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 11:10:06</p>
<p><b>Waktu 11.10 WIB (8 Juli 2025)</b></p>  <p>T: 35.00°C H: 57.9 Lux: 37116.66</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 11:10:06</p>	<p><b>Waktu 11.25 WIB WIB (8 Juli 2025)</b></p>  <p>T: 37.10°C H: 49.8 Lux: 54612.50</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 11:25:06</p>
<p><b>Waktu 11.40 WIB WIB (8 Juli 2025)</b></p>  <p>T: 37.10°C H: 49.8 Lux: 54612.50</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 11:40:06</p>	<p><b>Waktu 11.55 WIB WIB (8 Juli 2025)</b></p>  <p>T: 37.10°C H: 49.8 Lux: 54612.50</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 11:55:06</p>
<p><b>Waktu 12.10 WIB WIB (8 Juli 2025)</b></p>  <p>T: 37.10°C H: 49.8 Lux: 54612.50</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 12:10:06</p>	<p><b>Waktu 12.25 WIB WIB (8 Juli 2025)</b></p>  <p>T: 37.10°C H: 49.8 Lux: 54612.50</p> <p>Komp Wadya Graha 1 CC No.5 Delima, Binawidya 0°29'0", 101°24'8", 36,3m, 139° 08/07/2025 12:25:06</p>

 <p>© Hak cipta milik UIN Suska Riau</p> <p>Waktu 11.40 WIB WIB (8 Juli 2025)</p>	 <p>Waktu 11.55 WIB WIB (8 Juli 2025)</p>
 <p>Waktu 13.10 WIB WIB (8 Juli 2025)</p>	

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa meneentukkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Data Alat Ukur Voltamperemeter DC 4 Digit Red-Blue		
Hak Cipta	Parameter	Spesifikasi
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:	<b>Display</b>	0.28" LED digital
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.	<b>Operating Voltage</b>	DC 4 ~ 30V
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.	<b>Voltage Measurement Range</b>	DC 0.000 ~ 100.0V
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.	<b>Current Measurement Range</b>	0.000 ~ 9.999A
	<b>Display Type</b>	Red+Blue / Red+Red
	<b>Refresh Rate</b>	≥ 300 ms / kali
	<b>Accuracy</b>	±1% (±1 digit)
	<b>Operating Current</b>	< 20 mA
	<b>Operating Temperature</b>	-10°C to 65°C
	<b>Operating Humidity</b>	10% to 80% (non-condensing)
	<b>Overall Size</b>	48 mm x 29 mm x 21 mm
	<b>Mounting Cutout Size</b>	45.5 mm x 26 mm