

**UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PALMITAT
SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM
APLIKASI SOLAR WATER HEATER**

(SKRIPSI)

OLEH:

**GANDHI KUSUMA DEWA
NPM 2115021018**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PALMITAT SEBAGAI
MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI SOLAR WATER
*HEATER***

OLEH:

GANDHI KUSUMA DEWA

**Skripsi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

**Pada
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PALMITAT SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI *SOLAR WATER HEATER*

Oleh

Gandhi Kusuma Dewa

Dalam pemanfaatan energi surya pada sistem *Solar Water Heater* (SWH) memerlukan media penyimpanan panas yang mampu menjaga kestabilan suhu ketika intensitas radiasi matahari berubah. Pada penelitian ini, mengkaji karakteristik perpindahan panas asam palmitat sebagai *Phase Change Material* (PCM) dalam penukar kalor tipe *shell and tube*. Asam palmitat dipilih karena memiliki titik leleh yang sesuai dengan kebutuhan operasi SWH, bersifat stabil, dan berasal dari bahan alami. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan mengalirkan air panas melalui sisi *tube* pada tiga variasi debit, yaitu 8, 10, dan 12 L/menit, sedangkan asam palmitat ditempatkan pada sisi *shell*. Temperatur fluida dan PCM direkam menggunakan sensor termokopel pada beberapa titik untuk mengevaluasi proses penyimpanan dan proses pelepasan energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran mempercepat laju perpindahan panas dan memperpendek waktu perubahan fasa asam palmitat. Debit 12 L/menit menghasilkan respons termal paling cepat pada kedua proses, serta meningkatkan energi yang ditransfer dari air ke PCM. Hal ini berdampak pada efisiensi sistem yang lebih tinggi dibandingkan debit lainnya. Temuan ini mengonfirmasi bahwa asam palmitat memiliki potensi sebagai media penyimpan energi laten untuk sistem SWH, meskipun konduktivitas termalnya yang rendah tetap menjadi faktor pembatas yang perlu diperhatikan dalam perancangan lanjutan.

Kata kunci: asam palmitat, *Phase Change Material*, perpindahan panas, *shell and tube*, *Solar Water Heater*, energi laten.

ABSTRAK

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Palmitic Acid as an Energy Storage Material in Solar Water Heater Applications

By

Gandhi Kusuma Dewa

Solar Water Heater (SWH) systems require a reliable thermal storage medium to maintain temperature stability when solar radiation fluctuates throughout the day. This study investigates the heat-transfer behavior of palmitic acid when used as a Phase Change Material (PCM) inside a shell-and-tube heat exchanger. Palmitic acid was selected due to its melting point, which falls within the operating range of domestic SWH systems, its chemical stability, and its availability as a bio-based material. The experimental setup involved circulating hot water through the tube side at three flow rates 8, 10, and 12 L/min, while the PCM was placed in the shell. Temperature measurements were recorded at several points to observe the heating and cooling cycles. The results indicate that higher flow rates accelerate the overall heat-transfer process and shorten the time required for phase transition. The flow rate of 12 L/min produced the fastest thermal response during both heating and cooling, as well as the highest amount of energy transferred from the water to the PCM. This trend also led to a higher system efficiency compared to the lower flow-rate conditions. Overall, the findings confirm that palmitic acid has promising potential as a latent-heat storage material for SWH applications, although its inherently low thermal conductivity remains a limitation to be addressed in future system improvements.

Keywords: palmitic acid, Phase Change Material, latent heat storage, shell-and-tube heat exchanger, Solar Water Heater.

Judul Skripsi

: UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN
PANAS PALMITAT SEBAGAI MATERIAL
PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI
SOLAR WATER HEATER

Nama Mahasiswa

: Gandhi Kusuma Dewa

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115021018

Program Studi

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik



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

Ahmad Yonanda, S.T., M.T.
NIP. 199301102019031008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

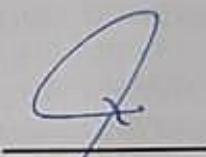
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

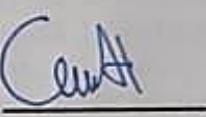
Ketua

: **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



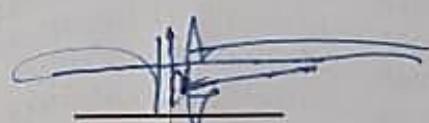
Anggota Penguji

: **Ahmad Yonanda, S.T., M.T.**



Penguji Utama

: **Hadi Prayitno, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik




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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 13 Januari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi berjudul “UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PALMITAT SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI SOLAR WATER HEATER” merupakan hasil karya saya sendiri. Skripsi ini tidak berisi materi yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik pada perguruan tinggi mana pun, dan sejauh pengetahuan saya tidak mengandung karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Saya bertanggung jawab sepenuhnya atas keaslian dan kebenaran isi skripsi ini sesuai dengan etika keilmuan dan ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 23 Januari 2026

Pembuat pernyataan



Gandhi Kusuma Dewa

NPM. 2115021018

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 03 Februari 2003 sebagai anak ketiga dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Irwan dan Ibu Hartini. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 1 Rawa Laut (2009-2015), kemudian melanjutkan studi di SMP Swasta Perintis 2 Bandar lampung (2015-2018), serta SMA Swasta Perintis 2 Bandar lampung (2018-2021). Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negri (SNMPTN).

Selama masa kuliah, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dan mengikuti berbagai kegiatan kejurusan yang menunjang pengembangan kemampuan akademik maupun organisasi. Penulis juga melaksanakan Program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Ono Harjo, Kecamatan Terbanggi Besar, pada awal tahun 2025 sebagai bagian dari kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Dalam bidang pengalaman industri, penulis mengikuti Magang Industri di PTPN I Regional VII Unit Bekri, serta melaksanakan Kerja Praktek (KP) pada tahun 2024 di PT Perkebunan Nusantara I Regional VII Unit Pagar Alam, dengan laporan berjudul ***“Prestasi Continuous Fermentation Machine Pada Produksi Teh Hitam Ctc Di Pt Perkebunan Nusantara I Regional Vii Unit Pagar Alam.”*** Pada tahun 2025, penulis melakukan penelitian tugas akhir berjudul ***“Uji Karakteristik Perpindahan Panas Palmitat Sebagai Material Penyimpan Energi Dalam Aplikasi Solar Water Heater”*** di bawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan Ahmad Yonanda, S.T., M.T. Serta bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. sebagai pembahas.

MOTO

“Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain”

(Al-Qur'an, Surah Al-Insyirah (94): 7)

“Siapa yang bersungguh-sungguh, maka ia akan mendapatkan hasil.”

(Imam Asy-Syafi'i)

“*A dropout will beat a genius through hard work.*”

(Rock Lee (Naruto))

PERSEMPAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang,
penulis panjatkan puji dan syukur ke hadirat-Nya atas rahmat dan karunia-Nya
sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

SKRIPSIINI PENULIS PERSEMPAHKAN KEPADA

Ayah dan ibu tercinta, terima kasih karena selalu hadir dengan kasih dan
pengorbanan tanpa batas. Setiap peluh dan doa yang kalian berikan menjadi
kekuatan terbesar bagi penulis untuk menyelesaikan perjuangan ini. Semoga karya
ini bisa menjadi bukti bahwa doa dan kerja keras kalian tidak pernah sia-sia.

Kakak-kakak dan adik-adik tercinta yang selalu memberikan doa, semangat, dan
dukungan yang senantiasa diberikan. Semoga skripsi ini menjadi bukti bahwa doa
kalian selalu dikabulkan.

Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin 2021

Serta

Almamater Tercinta Universitas Lampung

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh.

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Uji Karakteristik Perpindahan Panas Palmitat Sebagai Material Penyimpan Energi Dalam Aplikasi *Solar Water Heater*.” Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

Proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai kendala dan tantangan, baik secara teknis maupun akademik. Namun demikian, dengan adanya bimbingan, arahan, serta dukungan dari berbagai pihak, seluruh rangkaian kegiatan penelitian dan penulisan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, atas bimbingan, arahan, serta motivasi yang diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Ahmad Yonandah, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II, atas saran,

koreksi, dan masukan yang sangat membantu dalam penyempurnaan skripsi ini.

6. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan bantuan selama masa perkuliahan.
8. Para staf Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan pelayanan dan bantuan yang sangat baik selama masa perkuliahan.
9. Kedua orang tua dan keluarga tercinta, atas doa, dukungan moral, serta motivasi yang senantiasa diberikan kepada penulis.
10. Teman-teman seperjuangan serta semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
11. Seseorang dengan NPM 2214051097 yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, serta pengertian kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
12. Serta penulis juga mengapresiasi kepada diri sendiri atas usaha, konsistensi, serta kesungguhan dalam menyelesaikan setiap tahapan studi hingga penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan, baik dari segi penyajian maupun isi. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun demi perbaikan dan pengembangan karya ilmiah di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat, serta dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 23 Januari 2026

Penulis,



Gandhi Kusuma Dewa

NPM. 2115021018

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	Ii
DAFTAR GAMBAR	IV
DAFTAR TABEL.....	Vi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	3
1.3 BATASAN MASALAH.....	3
1.4 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 SISTEM <i>SOLAR WATER HEATER</i> (SWH)	6
2.1.1 Jenis-Jenis Sistem <i>Solar Water Heater</i>	7
2.2 PERPINDAHAN PANAS (<i>HEAT TRANSFER</i>)	8
2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	9
2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi	10
2.3 MATERIAL PENYIMPAN ENERGI TERMAL (<i>PHASE CHANGE MATERIAL</i>)	12
2.3.1 Klasifikasi PCM	13
2.3.2 Asam Palmitat Sebagai PCM Alternatif	15
2.3.3 Kelebihan Dan Kekurangan Asam Palmitat Sebagai PCM	16
2.3.4 Sifat-Sifat Asam Palmitat.....	18
2.4 ALAT PENUKAR KALOR (<i>HEAT EXCHANGERS</i>).....	19
2.4.1 Aliran Searah Dan Berlawanan Arah	20

2.4.2 Prinsip Kerja <i>Shell And Tube Heat Exchanger</i>	22
2.4.3 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 TEMPAT PELAKSANAAN	25
3.2 WAKTU PELAKSANAAN.....	25
3.3 ALAT DAN BAHAN.....	26
3.5 DIAGRAM ALIR	35
3.6 JENIS SKEMA PENGUJIAN	36
3.7 PENEMPATAN TITIK PENGUKURAN	38
3.8 KONDISI OPERASIONAL.....	39
3.9 METODE PENGAMBILAN DATA	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 HASIL PENGAMBILAN DATA	41
4.1.1 Temperatur Palmitat	42
4.2 HASIL PERHITUNGAN	44
4.2.1 Laju Perpindahan Panas Air.....	44
4.2.2 Bilangan <i>Reynolds</i>	48
4.2.3 Perhitungan Energi	49
BAB V PENUTUP.....	56
5.1 KESIMPULAN	56
5.2 SARAN.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Diagram Alir Sistem SWH Aktif	7
Gambar 2. 2 Perpindahan panas konduksi.....	9
Gambar 2. 3 Perpindahan panas konveksi.....	11
Gambar 2. 4 Klasifikasi PCM	13
Gambar 2. 5 <i>Palmitic acid pcm powder</i>	15
Gambar 2. 6 Profil temperatur aliran <i>parallel flow</i>	21
Gambar 2. 7 Profil temperatur aliran <i>counter-current</i>	22
Gambar 2. 8 <i>Shell and tube heat exchanger</i>	23
Gambar 3. 1 Pemanas Air (<i>Heater</i>).....	27
Gambar 3. 2 Pompa Air.....	27
Gambar 3. 3 Penampungan Air.....	28
Gambar 3. 4 Selang Pipa Air Panas	29
Gambar 3. 5 <i>Digital Water Flow Meter control display</i>	29
Gambar 3. 6 Kontroler <i>thermocouple</i>	30
Gambar 3. 7 <i>Data logger</i>	31
Gambar 3. 8 <i>thermocouple</i>	32
Gambar 3. 9 Konfigurasi internal <i>shell and tube</i>	33
Gambar 3. 10 Alat Penukar Kalor.....	34
Gambar 3. 11 <i>Palmitic Acid</i>	34
Gambar 3. 12 Diagram alir penelitian	36
Gambar 3. 13 Skema pengujian <i>close loop</i>	37
Gambar 3. 14 Skema sistem <i>open loop</i>	37
Gambar 3. 15 Penempatan titik pengukuran.....	38
Gambar 4. 1 Perbandingan temperatur rata-rata palmitat pada suhu 70°C _____	42

Gambar 4. 2 Perbandingan temperatur rata-rata palmitat pada suhu 30°C	42
Gambar 4. 3 Perbandingan laju perpindahan panas rata-rata proses pemanasan dan proses pendinginan	47
Gambar 4. 4 Perbandingan energi air dengan energi palmitat pada suhu 70°C.....	53
Gambar 4. 5 Perbandingan energi air dengan energi palmitat pada suhu 30°C.....	53

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3. 1 Spesifikasi Pompa Air.....	28
Tabel 3. 2 Spesifikasi <i>Digital Water Flow Meter control display</i>	30
Tabel 3. 3 Spesifikasi kontroler	31
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>data logger</i>	32
Tabel 3. 5 Spesifikasi <i>thermocouple</i>	33
Tabel 4. 1 Data Laju Perpindahan Panas pada suhu 70°C	45
Tabel 4. 2 Data Laju Perpindahan Panas pada suhu 30°C.....	45
Tabel 4. 3 Perhitungan bilangan <i>Reynolds</i> pada suhu 70°C	48
Tabel 4. 4 Perhitungan bilangan <i>Reynolds</i> pada suhu 30°C	48
Tabel 4. 5 Energi Air Pada Proses Pemanasan Dan Proses Pendinginan.....	50
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Energi Palmitat Pada Proses Pemanasan	51
Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Energi Palmitat Pada Proses Pendinginan	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling melimpah, bersih, dan berkelanjutan, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Potensi radiasi surya harian rata-rata di Indonesia mencapai sekitar 4,8 kWh/m², yang menunjukkan peluang besar untuk mengembangkan berbagai teknologi berbasis energi surya, seperti sistem pemanas air tenaga surya (*Solar Water Heater / SWH*). Pemanfaatan energi surya dalam sistem SWH sangat menjanjikan karena tidak menghasilkan emisi dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (Asrori, 2022).

Namun, terdapat kendala utama dalam penerapan sistem pemanas air tenaga surya, yaitu intensitas radiasi matahari yang berubah-ubah tergantung pada kondisi cuaca dan waktu. Hal ini menyebabkan pasokan energi panas menjadi tidak stabil. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem penyimpanan energi termal (*thermal Energy storage system*) untuk menjaga ketersediaan energi bahkan ketika intensitas cahaya matahari rendah atau tidak ada. Salah satu solusi terbaik untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan teknologi penyimpanan energi termal berbasis *Phase Change Material* (PCM). PCM bekerja dengan cara menyimpan dan melepaskan kalor laten selama proses perubahan fase, seperti dari padat menjadi cair atau sebaliknya. Parafin merupakan salah satu PCM yang paling umum digunakan karena memiliki stabilitas termal yang baik dan titik leleh yang sesuai untuk aplikasi SWH. Namun, parafin memiliki kelemahan, yaitu konduktivitas termal yang rendah

serta berasal dari produk turunan minyak bumi, sehingga kurang ramah lingkungan. Saat ini, perhatian semakin meningkat terhadap penggunaan PCM berbasis bahan alami (*bio-based* PCM) sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan. Salah satunya adalah asam palmitat, yaitu asam lemak jenuh yang berasal dari minyak kelapa sawit. Asam palmitat memiliki sifat termal yang mirip dengan parafin, seperti titik leleh yang sebanding dan kapasitas kalor laten yang tinggi. Selain itu, karena bersifat non-toksik, *biodegradable*, dan mudah diperoleh di Indonesia, asam palmitat menjadi pilihan yang baik dari sisi lingkungan maupun ekonomi.

Namun, seperti PCM parafin, asam palmitat juga memiliki konduktivitas termal yang rendah. Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kemampuan perpindahan panasnya dengan menambahkan material yang memiliki konduktivitas termal lebih baik. Misalnya, Lin dkk. (2020) melaporkan bahwa penambahan *graphene nanoplatelets* (GNPs) ke dalam asam palmitat dapat meningkatkan konduktivitas termalnya hingga 1,65 kali dibandingkan PCM murni. Fang dkk. (2022) juga memperkuat temuan dengan menunjukkan bahwa penggunaan matriks karbon berpori dapat meningkatkan konduktivitas dan laju peleahan asam palmitat secara signifikan. Selain itu, penelitian Zhang (2018) dengan metode argumentasi seperti penggunaan gelombang ultrasonik dalam proses peleahan PCM berbasis *fatty acid*, mampu menunjukkan peleahan berlangsung lebih cepat dan lebih merata ketika PCM dikenai perlakuan ultrasonik, sehingga secara langsung meningkatkan kapasitas penyimpanan energi. Sedangkan penelitian Bhagyalakshmi dkk. (2018) melakukan penelitian dengan menggunakan asam lemak *fatty acid* dan alat *cylindrical shell-type heat exchanger*, menemukan bahwa variasi laju aliran fluida dapat meningkatkan proses peleahan dan pembekuan PCM secara signifikan. Temuan tersebut sangat relevan karena menunjukkan bahwa selain peningkatan konduktivitas melalui komposit, optimasi aliran fluida juga berpengaruh besar terhadap kinerja PCM, terutama pada sistem penukar panas.

Agar PCM dapat dimanfaatkan secara efektif dalam sistem termal seperti SWH, dibutuhkan desain penukar panas (*heat exchanger*) yang efisien untuk

memastikan proses penyerapan dan pelepasan panas berlangsung optimal. Salah satu tipe yang paling umum digunakan adalah penukar panas tipe *shell-and-tube*, di mana fluida panas dialirkkan melalui pipa bagian dalam (*tube side*), sementara PCM ditempatkan pada bagian luar (*shell side*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas asam palmitat sebagai material perubahan fase (PCM) dalam aplikasi pemanas air tenaga surya menggunakan penukar panas tipe *shell-and-tube*. Dalam konfigurasi ini, air panas dialirkkan melalui pipa bagian dalam, sedangkan asam palmitat ditempatkan di bagian luar (*shell*). Tujuan penelitian ini adalah untuk menemukan media penyimpanan energi termal yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan, sehingga dapat mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara optimal di masa depan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan durasi yang diperlukan bagi asam palmitat untuk mengalami perubahan fase dalam kondisi operasional sistem pemanas air tenaga surya.
2. Menganalisis karakteristik perpindahan panas asam palmitat sebagai *phase change material (PCM)* dalam sistem pemanas air tenaga surya yang menggunakan penukar panas tipe *shell-and-tube*.

1.3 Batasan Masalah

Dalam proses penelitian dilakukan pembatasan masalah untuk memudahkan pengambilan data. Adapun batasan-batasan yang diterapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material PCM yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi hanya pada asam palmitat ($C_{16}H_{32}O_2$). Penelitian ini tidak membandingkan kinerja asam palmitat dengan material perubahan fase (PCM) lainnya, seperti

parafin, asam stearat, maupun campuran PCM.

2. Jenis penukar panas yang digunakan adalah penukar panas tipe *shell-and-tube* horizontal.
3. Parameter yang divariasikan hanyalah parameter masukan, yaitu laju aliran fluida yang diatur pada 8, 10, dan 12 liter per menit (L/menit), dengan suhu air panas dijaga pada 70°C dan suhu air dingin dijaga pada 30°C.
4. Fluida kerja yang digunakan adalah air, dengan pH sekitar 7,5, yang berfungsi sebagai media pemanas dan pendingin.
5. Pengukuran yang dilakukan hanya meliputi suhu, waktu, dan laju aliran, serta energi air dan energi PCM.
6. Eksperimen dilakukan di luar ruangan (*outdoor*) tanpa mempertimbangkan pengaruh perubahan suhu lingkungan. Analisis juga tidak memperhitungkan faktor eksternal seperti angin, kelembapan, maupun radiasi lingkungan.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematik penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian, tujuan dari penelitian, batasan masalah yang diberikan dan sistematika penulisan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan landasan teori mengenai hal-hal yang berhubungan dengan penelitian seperti perpindahan panas, material berubah fase (PCM), alat penukar kalor dan lainnya.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi hal-hal yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian meliputi bahan penelitian, peralatan dan prosedur pengujian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil dan pembahasan dari data-data yang diperoleh pada

saat pengujian.

5. PENUTUP

Bab ini berisikan hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang ingin disampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan tentang referensi yang digunakan oleh penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem *Solar Water Heater* (SWH)

Sistem *Solar Water Heater* (SWH) menggunakan energi surya untuk mengubah sinar matahari menjadi panas yang dapat digunakan untuk memanaskan air, baik secara langsung maupun tidak langsung. Komponen utama sistem ini adalah kolektor surya yang dilengkapi dengan pelat penyerap panas (*absorber plate*). Energi panas yang diserap kemudian dialirkan melalui pipa penghantar panas menuju fluida kerja biasanya air dan selanjutnya disimpan dalam tangki penyimpanan (*storage tank*). Proses ini dapat terus memanaskan air di dalam tangki selama masih tersedia cukup sinar matahari. Sistem ini merupakan alternatif ramah lingkungan untuk menghasilkan air panas tanpa menggunakan sumber energi listrik atau bahan bakar fosil konvensional (Alwan dkk., 2022).

Dalam sistem SWH, proses pemanasan air melibatkan mekanisme perpindahan panas berupa radiasi, konduksi, dan konveksi. Tahap pertama dimulai ketika radiasi matahari mengenai permukaan pelat penyerap panas. Selanjutnya, dinding kolektor menghantarkan energi panas ke fluida yang mengalir di dalam pipa melalui proses konduksi. Setelah itu, panas ditransfer ke air melalui konveksi, yang dapat terjadi secara alami (*natural convection*) maupun paksa (*forced convection*), tergantung pada konfigurasi sistem dan kecepatan aliran fluida. Ketiga mekanisme perpindahan panas ini bekerja secara bersamaan untuk memastikan bahwa air dapat dipanaskan dengan cepat dan efisien. Pemahaman yang menyeluruh mengenai cara kerja sistem SWH serta

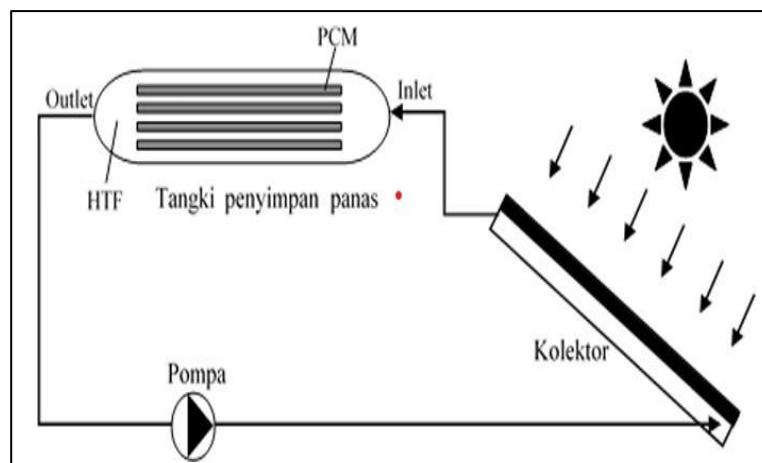
mekanisme perpindahan panas di dalamnya sangat penting untuk mengembangkan teknologi pemanas air tenaga surya yang lebih efisien dan tahan lama (Koua dkk., 2020).

2.1.1 Jenis-Jenis Sistem *Solar Water Heater*

Terdapat dua jenis utama sistem pemanas air tenaga surya, yaitu sistem aktif dan sistem pasif.

1. Sistem Aktif

Sistem aktif (*active systems*) menggunakan pompa untuk mengalirkan fluida kerja dari kolektor menuju tangki penyimpanan. Umumnya, sistem ini dilengkapi dengan pengendali otomatis (*automatic controller*) yang mengatur aliran fluida berdasarkan perbedaan suhu antara kolektor dan tangki penyimpanan. Keuntungan utama dari sistem aktif adalah kemampuannya dalam mentransfer panas secara lebih efisien serta menjaga kestabilan suhu air meskipun terjadi perubahan kondisi cuaca.



Gambar 2. 1 Diagram Alir Sistem SWH Aktif
Sumber : (Sidiq, 2025)

2. Sistem Pasif

Sistem pasif tidak menggunakan pompa untuk menggerakkan aliran seperti yang dilakukan sistem aktif. Efek termosifon adalah apa yang membuat air bergerak. Sistem pasif kurang efisien dibandingkan

dengan sistem aktif, tetapi lebih mudah untuk dibangun, biayanya lebih rendah untuk dioperasikan, dan memerlukan lebih sedikit perawatan.

2.2 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Perpindahan panas (*heat transfer*) merupakan salah satu bidang utama dalam ilmu termodinamika yang mempelajari mekanisme perpindahan energi dari suatu benda atau sistem ke benda lainnya akibat adanya perbedaan suhu. Fenomena ini terjadi karena energi panas secara alami mengalir dari daerah yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju daerah yang bersuhu lebih rendah sampai tercapai kondisi kesetimbangan termal. Tanpa adanya perbedaan suhu, proses perpindahan panas tidak akan terjadi, sebab tidak terdapat gaya pendorong termal yang menyebabkan aliran energi. Prinsip ini menjadi dasar bagi berbagai kajian ilmiah dalam bidang energi dan rekayasa termal, di mana pemahaman terhadap arah dan laju perpindahan panas sangat menentukan performa suatu sistem (Çengel, 2020).

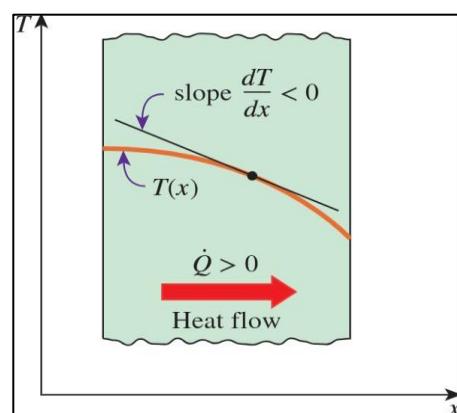
Dalam konteks sistem teknik dan industri, fenomena perpindahan panas memiliki peran yang sangat vital. Proses ini menjadi prinsip dasar dalam berbagai aplikasi, seperti sistem pendingin (*refrigeration system*), penukar kalor (*heat exchanger*), sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*), serta penyimpanan energi termal menggunakan *phase change material* (PCM). Melalui pemahaman mendalam terhadap mekanisme perpindahan panas, para insinyur dapat merancang sistem konversi energi yang lebih efisien dengan meminimalkan kehilangan energi panas selama proses berlangsung. Selain itu, analisis perpindahan panas juga digunakan untuk mengoptimalkan kinerja sistem termal agar dapat mencapai efisiensi maksimum dengan konsumsi energi yang minimal (Eze dkk., 2024).

Secara teoritis, proses perpindahan panas dijelaskan melalui tiga hukum dasar, yaitu Hukum Fourier untuk konduksi, Hukum Newton untuk konveksi,

dan Hukum Stefan–Boltzmann untuk radiasi. Hukum Fourier menyatakan bahwa laju perpindahan panas konduksi sebanding dengan gradien suhu dan konduktivitas termal material. Hukum Newton menjelaskan bahwa laju perpindahan panas konveksi bergantung pada koefisien perpindahan panas dan perbedaan suhu antara permukaan dengan fluida di sekitarnya. Hukum Stefan–Boltzmann menguraikan bahwa energi radiasi yang dipancarkan oleh suatu permukaan sebanding dengan pangkat empat suhu absolutnya. Ketiga mekanisme tersebut sering kali terjadi secara bersamaan dalam sistem termal nyata, meskipun salah satu dapat menjadi lebih dominan tergantung pada kondisi fisis, sifat material, serta geometri sistem yang dikaji. (Alaghemandi, 2025).

2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi merupakan salah satu mekanisme utama dalam perpindahan panas yang terjadi melalui suatu medium padat, cair, maupun gas tanpa disertai perpindahan massa secara makroskopis. Pada proses ini, energi panas berpindah dari daerah bersuhu tinggi menuju daerah bersuhu lebih rendah akibat adanya interaksi antar partikel, baik melalui tumbukan molekul maupun getaran atom di dalam material. Mekanisme tersebut menyebabkan energi kinetik partikel pada bagian yang lebih panas berpindah ke partikel di sekitarnya yang memiliki energi lebih rendah.



Gambar 2. 2 Perpindahan panas konduksi
Sumber : (Çengel, 2020)

Fenomena konduksi dijelaskan secara kuantitatif melalui Hukum Fourier, yang menyatakan bahwa laju perpindahan panas secara konduksi berbanding lurus dengan gradien suhu dan luas penampang aliran panas, serta berbanding terbalik dengan panjang lintasan perpindahan panas. Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Keterangan :

Q_{cond}	: Laju perpindahan panas (W)
A	: Luas penampang (m^2)
k	: Konduktivitas termal (W/m.K)
T	: Temperatur (K)
X	: Tebal (m)

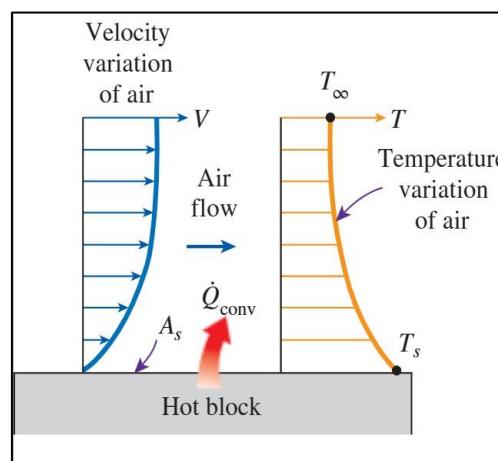
Dalam konteks sistem *Solar Water Heater* (SWH), mekanisme konduksi berperan penting dalam proses perpindahan panas dari kolektor ke fluida kerja. Proses ini terjadi pada dinding pipa kolektor dan permukaan *heat exchanger* ketika energi panas dari fluida pemanas berpindah menuju air di dalam sistem penyimpanan. Efisiensi perpindahan panas konduksi sangat dipengaruhi oleh konduktivitas material pipa, ketebalan dinding, serta perbedaan suhu antara fluida panas dan fluida penerima panas. Oleh karena itu, pemilihan material dengan konduktivitas termal tinggi seperti tembaga atau aluminium menjadi salah satu faktor penting dalam peningkatan kinerja termal sistem SWH.

2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi

Konveksi merupakan salah satu mekanisme perpindahan panas yang terjadi akibat adanya perpindahan massa fluida yang disertai dengan transfer energi panas. Mekanisme ini hanya berlangsung pada media fluida, baik dalam bentuk cair maupun gas, di mana partikel-partikel fluida yang memiliki suhu lebih tinggi akan bergerak dan mengantikan

posisi partikel dengan suhu lebih rendah. Proses ini menyebabkan terjadinya sirkulasi fluida yang berfungsi mentransfer energi panas dari satu daerah ke daerah lain. Berbeda dengan konduksi yang terjadi tanpa perpindahan massa, konveksi selalu melibatkan gerakan fluida sebagai media penghantar panasnya.

Konveksi dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu konveksi alami (*natural convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Pada konveksi alami, aliran fluida terjadi karena adanya perbedaan densitas yang diakibatkan oleh variasi temperatur. Fluida yang lebih panas memiliki densitas lebih rendah sehingga naik ke permukaan, sedangkan fluida yang lebih dingin dengan densitas lebih tinggi bergerak turun. Sebaliknya, konveksi paksa melibatkan penggunaan alat bantu mekanis seperti pompa atau kipas untuk mempercepat sirkulasi fluida, sehingga laju perpindahan panas meningkat secara signifikan. Jenis konveksi ini banyak diaplikasikan dalam sistem teknik yang memerlukan kontrol dan efisiensi perpindahan panas yang tinggi



Gambar 2. 3 Perpindahan panas konveksi

Sumber : (Çengel, 2020)

Secara matematis, laju perpindahan panas konveksi dijelaskan melalui Hukum Newton tentang Pendinginan (*Newton's Law of Cooling*), yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Keterangan :

Q_{conv}	: Laju perpindahan panas konveksi (W)
h	: Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m ² .K)
A_s	: Luas permukaan perpindahan panas (m ²)
T_s	: Suhu Permukaan (°C)
T_∞	: Suhu fluida di sekitarnya (°C)

Persamaan ini menunjukkan bahwa besarnya energi panas yang berpindah secara konveksi bergantung pada perbedaan suhu antara permukaan dan fluida di sekitarnya, serta pada nilai koefisien perpindahan panas h . Nilai h sendiri dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida, sifat fisik fluida (seperti viskositas dan konduktivitas termal), serta kondisi permukaan tempat perpindahan panas terjadi.

Dalam sistem *Solar Water Heater* (SWH), mekanisme konveksi memiliki peran penting dalam dua proses utama, yaitu perpindahan panas antara fluida kerja di dalam pipa kolektor dengan permukaan pipa, dan proses perpindahan panas antara material penyimpan energi (*Phase Change Material* atau PCM) dengan air pada tangki penyimpanan. Pada tahap pemanasan air di dalam pipa kolektor.

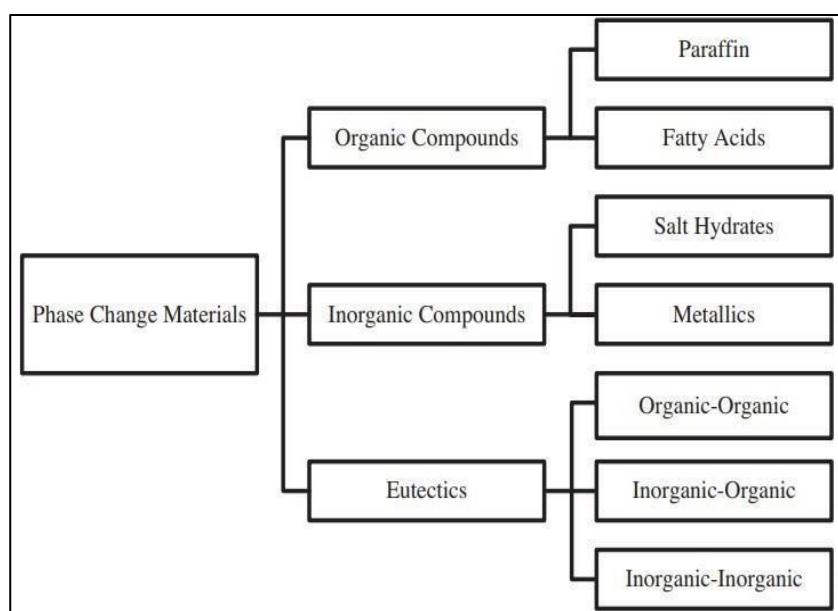
2.3 Material Penyimpan Energi Termal (*Phase Change Material*)

Phase Change Material (PCM) merupakan salah satu jenis material penyimpan energi termal yang memiliki kemampuan untuk mengalami perubahan fase, biasanya dari bentuk padat ke cair atau sebaliknya, dengan menyerap atau melepaskan energi dalam jumlah besar selama proses tersebut berlangsung. Pada kondisi ini, PCM menyerap panas saat mencair dan melepaskan panas saat membeku, tanpa mengalami perubahan suhu yang signifikan. Sifat responsif terhadap suhu menjadikan PCM sangat ideal untuk digunakan sebagai media penyimpanan energi panas latent dalam aplikasi sistem termal (Mao dkk., 2025).

Kemampuan PCM dalam mempertahankan kestabilan suhu menjadikannya berperan penting dalam sistem manajemen energi. Ketika suhu lingkungan meningkat dan melebihi titik transisi fase, PCM menyerap kalor dari lingkungan dan berubah menjadi fase cair, sehingga energi termal disimpan dalam bentuk panas laten. Oleh karena itu, PCM banyak diterapkan dalam sistem pemanas air tenaga surya, pengendalian suhu bangunan, transportasi termal, serta sistem pendinginan elektronik (Nejat dkk., 2022).

2.3.1 Klasifikasi PCM

Phase Change Material (PCM) material yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan melepaskan energi termal dalam jumlah besar melalui mekanisme panas laten yang terjadi selama proses perubahan fase, umumnya dari fase padat ke cair atau sebaliknya. Keunggulan utama PCM terletak pada kemampuannya menyimpan energi pada temperatur yang relatif konstan, sehingga sangat sesuai diaplikasikan sebagai media penyimpanan energi termal pada berbagai sistem pemanas dan pendingin. Berdasarkan komposisi kimianya, PCM secara umum dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama, yaitu PCM organik, PCM anorganik, dan PCM eutektik.



Gambar 2. 4 Klasifikasi PCM
Sumber : (Mofijur dkk., 2019)

a. *Phase Change Material (PCM) Organik*

PCM organik umumnya terdiri dari senyawa hidrokarbon, seperti parafin dan asam lemak. Salah satu contoh asam lemak yang banyak diteliti dan digunakan adalah asam palmitat, yang diperoleh dari sumber alami seperti minyak kelapa sawit dan minyak nabati lainnya. Asam palmitat memiliki beberapa keunggulan sebagai material penyimpan energi termal. Selain bersifat *biodegradable* dan ramah lingkungan, asam palmitat juga menunjukkan kestabilan kimia yang tinggi, tidak bersifat korosif, dan memiliki titik leleh yang berada dalam rentang suhu operasi sistem pemanas air rumah tangga (Lin dkk., 2018).

b. *Phase Change Material (PCM) Anorganik*

PCM anorganik, seperti garam hidrat, memiliki kapasitas panas laten yang tinggi dan konduktivitas termal yang lebih baik dibandingkan PCM organik. Keunggulan lain dari PCM anorganik termasuk ketersediaan yang luas dan biaya yang relatif rendah. Namun, PCM anorganik juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu masalah utama adalah fenomena *supercooling*, di mana material harus didinginkan ke suhu yang lebih rendah dari titik lelehnya sebelum mengalami kristalisasi, yang dapat menghambat pelepasan panas laten dan menurunkan efisiensi sistem penyimpanan energi. Selain itu, PCM anorganik dapat bersifat korosif terhadap material tertentu, yang dapat membatasi pilihan bahan untuk wadah atau sistem penukar panas.

c. *Phase Change Material (PCM) Eutectic*

PCM eutektik merupakan campuran dari dua atau lebih komponen yang memiliki titik leleh lebih rendah dibandingkan komponen individualnya. Campuran ini dapat berupa kombinasi organik-organik, anorganik-anorganik, atau organik-anorganik, yang memungkinkan penyesuaian sifat termal sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Keunggulan utama dari PCM eutektik adalah

kemampuannya untuk mencair dan membeku pada suhu yang tetap dan tajam, yang menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan kontrol suhu yang presisi (Anand dkk., 2025).

2.3.2 Asam Palmitat sebagai PCM Alternatif

Asam palmitat ($C_{16}H_{32}O_2$) merupakan salah satu jenis asam lemak jenuh rantai panjang yang banyak dijumpai secara alami pada berbagai sumber, baik lemak hewani maupun minyak nabati, seperti minyak kelapa sawit dan lemak daging. Secara kimia, asam palmitat termasuk ke dalam golongan asam karboksilat yang memiliki struktur molekul relatif stabil, sehingga tidak mudah mengalami perubahan kimia selama proses pemanasan dan pendinginan berulang. Asam palmitat memiliki titik leleh pada kisaran 62–64°C, yang berada dalam rentang temperatur operasional sistem pemanas air tenaga surya. Karakteristik tersebut menjadikan asam palmitat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai *Phase Change Material* (PCM) dalam aplikasi penyimpanan energi termal. Pada temperatur di sekitar titik lelehnya, asam palmitat mampu menyerap energi panas dalam jumlah besar melalui mekanisme panas laten ketika mengalami perubahan fase dari padat menjadi cair.



Gambar 2. 5 *Palmitic acid*
Sumber : (Natesan dkk., 2020)

2.3.3 Kelebihan dan Kekurangan Asam Palmitat sebagai PCM

Asam palmitat merupakan salah satu jenis asam lemak jenuh rantai panjang yang banyak diteliti sebagai material perubahan fasa (*Phase Change Material/PCM*) untuk penyimpanan energi termal. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan parafin sebagai penyimpan energi termal.

a. Kelebihan Asam Palmitat

Asam palmitat memiliki sejumlah karakteristik unggulan yang menjadikannya kandidat potensial sebagai *phase change material* (PCM) untuk aplikasi penyimpanan energi termal, antara lain:

1. Stabilitas Termal dan Kimia

Asam palmitat menunjukkan kestabilan kimia yang tinggi, sehingga tidak mudah terdekomposisi meskipun digunakan dalam siklus pembekuan dan pencairan berulang. Sifat ini mendukung keandalan jangka panjang dalam aplikasi penyimpanan panas.

2. Panas Laten yang Tinggi

Nilai panas laten leleh asam palmitat berkisar 163–210 kJ/kg, menjadikannya efektif dalam menyimpan energi dalam jumlah besar selama proses perubahan fase padat–cair.

3. Titik Leleh Sesuai Aplikasi Domestik

Titik leleh asam palmitat berada pada kisaran 59,54–63,54°C, cocok untuk sistem *solar water heater*, pemanas ruangan, dan aplikasi termal lainnya yang bekerja pada suhu menengah.

4. Tidak Bersifat Korosif dan Ramah Lingkungan

Berbeda dengan beberapa PCM anorganik seperti garam hidrat, asam palmitat tidak menyebabkan korosi pada material logam. Selain itu, karena berasal dari sumber alami, senyawa ini relatif ramah lingkungan dan *biodegradable*.

5. Tidak Mengalami *Supercooling* yang Signifikan

Supercooling adalah fenomena ketika suatu zat tidak langsung

membeku pada titik bekunya. Asam palmitat memiliki kecenderungan sangat kecil untuk mengalami *supercooling*, sehingga sangat cocok untuk aplikasi dengan kebutuhan temperatur stabil.

b. Kekurangan Asam Palmitat

Meskipun memiliki banyak kelebihan, asam palmitat juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan dalam aplikasinya sebagai PCM:

1. Konduktivitas Termal Rendah

Seperti halnya PCM organik lainnya, asam palmitat memiliki konduktivitas termal yang rendah ($\sim 0,2 \text{W/m}\cdot\text{K}$), yang dapat menghambat laju perpindahan panas selama pengisian dan pelepasan energi. Oleh karena itu, sering diperlukan bahan tambahan seperti grafit atau logam untuk meningkatkan performanya

2. Mudah Terbakar

Sebagai senyawa organik, asam palmitat bersifat mudah terbakar, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam aspek keselamatan saat digunakan dalam sistem termal tertutup.

3. Harga Lebih Mahal Dibanding Parafin Biasa

Meskipun dapat diperoleh dari sumber alami, proses pemurnian dan standarisasi asam palmitat murni sering kali membuat harganya lebih tinggi dibandingkan parafin biasa yang umum digunakan dalam PCM komersial.

4. Potensi Kebocoran Fasa Cair

Dalam bentuk murni, asam palmitat dapat mengalami kebocoran ketika berada dalam fase cair. Oleh karena itu, biasanya dibutuhkan media penyangga atau matriks poros untuk mempertahankan bentuknya (*form- stable PCM*).

2.3.4 Sifat- Sifat Asam Palmitat

Dalam konteks penyimpanan energi termal, asam palmitat termasuk dalam kategori PCM organik yang memiliki sejumlah sifat fisik dan termal yang menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi penyimpanan panas, khususnya pada sistem pemanas air tenaga surya dan pengondisian udara pasif.

1. Titik Leleh

Asam palmitat memiliki titik leleh yang relatif tinggi di antara senyawa PCM organik, yaitu sekitar 63,54 °C. Nilai ini tergolong ideal untuk aplikasi penyimpanan panas di rentang suhu menengah (*medium temperature thermal storage*), seperti sistem pemanas air berbasis tenaga surya, penghangat ruangan berbasis energi terbarukan, dan aplikasi industri ringan yang memerlukan pengendalian suhu yang stabil. Titik leleh yang berada di atas suhu ruang juga memastikan bahwa material ini stabil dalam bentuk padat pada kondisi lingkungan umum, sehingga tidak memerlukan sistem pendingin tambahan untuk mempertahankan fasa padatnya (Lin dkk., 2020).

2. Panas Laten Leleh

Panas latent leleh adalah jumlah energi yang diserap atau dilepaskan oleh suatu material ketika mengalami perubahan fase tanpa perubahan suhu. Asam palmitat memiliki panas latent leleh yang tinggi, berkisar antara 163 hingga 210 kJ/kg tergantung pada kemurnian dan kondisi operasionalnya. Nilai ini memungkinkan penyimpanan energi panas dalam jumlah besar dalam volume yang relatif kecil, sehingga sangat efisien untuk digunakan dalam sistem penyimpanan energi termal berbasis fase.

3. Kapasitas Panas Jenis

Kapasitas panas jenis (cp) dari asam palmitat berada dalam kisaran 1,9– 2,3 kJ/kg·K, yang cukup baik untuk senyawa organik. Gabungan antara kapasitas panas jenis yang cukup tinggi dan nilai

panas laten yang besar menjadikan asam palmitat sebagai material penyimpan energi yang efisien dalam dua tahapan proses pemanasan: fase sensibel dan fase laten.

4. Konduktivitas Termal

Salah satu kekurangan umum dari PCM organik termasuk asam palmitat adalah konduktivitas termalnya yang rendah, yaitu hanya sekitar $0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Nilai ini menyebabkan perpindahan panas dari fluida kerja ke material menjadi kurang efisien, yang dapat memperlambat proses pengisian dan pelepasan energi.

5. Stabilitas Termal dan Kimia

Asam palmitat menunjukkan stabilitas termal dan kimia yang sangat baik, bahkan setelah mengalami ratusan hingga ribuan siklus perubahan fase. Dalam berbagai studi, asam palmitat tetap mempertahankan titik leleh, panas laten, serta integritas strukturalnya setelah digunakan berulang kali dalam sistem penyimpanan energi termal.

6. Non-Korosif dan Ramah Lingkungan

Berbeda dengan beberapa PCM anorganik seperti garam hidrat, asam palmitat tidak bersifat korosif terhadap logam, sehingga tidak memerlukan penggunaan material pelindung atau pelapis khusus pada alat penukar panas. Sifat ini memberikan keuntungan dari sisi ekonomi dan keamanan.

2.4 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchangers*)

Alat penukar kalor atau *heat exchanger* merupakan salah satu komponen utama dalam sistem termal yang berfungsi untuk memindahkan energi panas dari satu fluida ke fluida lainnya yang memiliki perbedaan temperatur tanpa terjadi kontak langsung di antara keduanya. Prinsip dasar kerja alat ini didasarkan pada hukum termodinamika pertama, yaitu bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya. Dalam

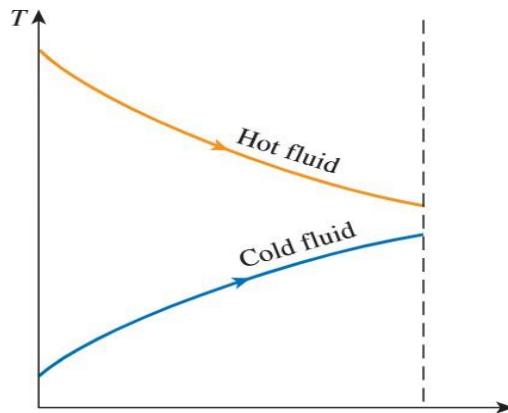
konteks ini, energi panas akan mengalir secara spontan dari fluida bersuhu tinggi menuju fluida bersuhu lebih rendah hingga tercapai kondisi kesetimbangan termal (Rahmadi dkk., 2023).

Secara umum, fungsi utama dari *heat exchanger* adalah menjaga stabilitas suhu sistem melalui proses pemanasan atau pendinginan, tergantung pada kebutuhan operasionalnya. Perangkat ini banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang teknik, seperti sistem energi terbarukan (misalnya *solar water heater*), industri kimia, sistem pemanas-ventilasi-pendingin (HVAC), pembangkit listrik, serta sistem penyimpanan energi berbasis material perubahan fase atau *Phase Change Material* (PCM). Kinerja alat penukar kalor sangat bergantung pada sejumlah parameter yang memengaruhi efisiensi perpindahan panas, antara lain sifat termofisika fluida (seperti viskositas, kapasitas panas jenis, dan konduktivitas termal), kecepatan aliran fluida, konfigurasi dan luas permukaan perpindahan panas, serta jenis material dan ketebalan dinding pemisah yang digunakan.

2.4.1 Aliran Searah dan Berlawanan Arah

a. Aliran Searah

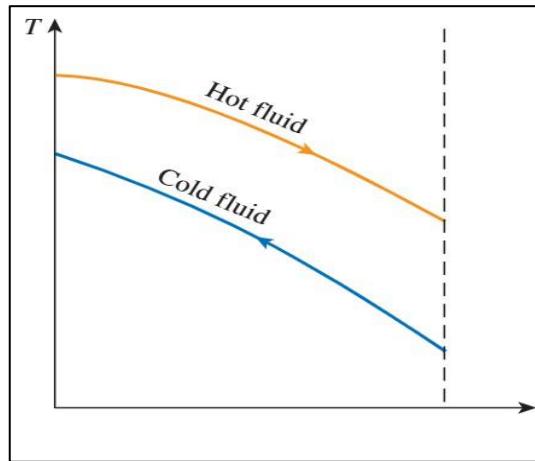
Pada sistem penukar panas dengan konfigurasi aliran searah (*parallel flow*), kedua fluida baik fluida panas maupun fluida dingin yang dimasukkan secara bersamaan dari sisi yang sama pada alat penukar panas. Keduanya mengalir sejajar dalam satu arah dan keluar dari sisi yang sama pula. Pola aliran ini menyebabkan pertukaran panas antara kedua fluida terjadi secara bertahap sepanjang panjang penukar kalor, di mana perbedaan suhu antar fluida akan terus menurun seiring perjalanan aliran. Dalam kondisi ini, suhu maksimum fluida dingin yang keluar tidak akan pernah melampaui suhu akhir fluida panas, karena tidak ada perpotongan temperatur secara teoritis (Astawa dkk., 2022).



Gambar 2. 6 Profil temperatur aliran *parallel flow*
Sumber : (Çengel, 2020)

b. Berlawanan Arah

Pada sistem penukar panas dengan konfigurasi berlawanan arah (*counterflow heat exchanger*), fluida panas dan fluida dingin mengalir secara saling berlawanan arah, yaitu masing-masing masuk dari sisi yang berlawanan dan keluar melalui sisi seberangnya. Pola aliran antagonis ini memungkinkan perbedaan suhu (*temperature gradient*) antara kedua fluida tetap tinggi sepanjang lintasan perpindahan panas. Kondisi tersebut membuat proses transfer energi menjadi lebih efektif karena fluida panas terus bertemu dengan fluida yang relatif lebih dingin pada setiap titik sepanjang penukar panas. Keunggulan ini menjadikan konfigurasi *counterflow* memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan sistem aliran searah (*parallel flow*). Oleh karena itu, *counterflow heat exchanger* lebih banyak digunakan dalam aplikasi rekayasa termal yang menuntut performa tinggi, seperti sistem pemanas air tenaga surya, industri proses, serta sistem pendingin yang membutuhkan stabilitas suhu dan efektivitas perpindahan panas yang maksimal (Kadhim dkk., 2024).

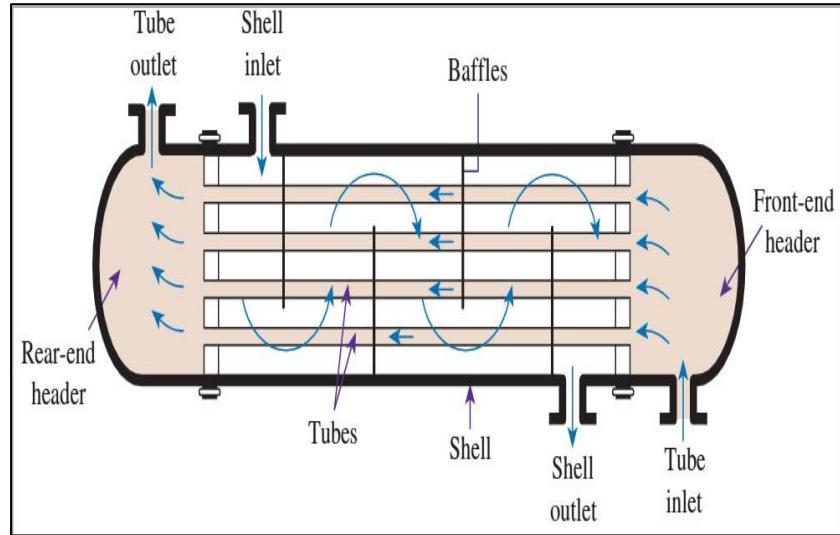


Gambar 2. 7 Profil temperatur aliran *counter-current*
Sumber : (Çengel, 2020)

2.4.2 Prinsip Kerja *Shell and Tube Heat Exchanger*

Secara umum, alat penukar kalor (*heat exchanger*) dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa aspek utama, antara lain desain konstruksi, arah aliran fluida, serta mekanisme perpindahan panas yang terjadi di dalamnya. Berdasarkan bentuk fisik atau struktur, *heat exchanger* dapat berupa tipe pipa ganda (*double pipe*), pelat dan rangka (*plate and frame*), spiral, maupun tipe tabung dan pipa (*shell and tube*). Dari berbagai jenis yang ada, *shell and tube heat exchanger* merupakan tipe yang paling banyak digunakan dalam sistem teknik termal dan proses industri karena memiliki desain yang kokoh, efisiensi perpindahan panas yang tinggi, serta kemudahan perawatan.

Mekanisme perpindahan panas pada tipe ini terjadi melalui dinding pipa, di mana energi termal berpindah dari fluida bersuhu lebih tinggi ke fluida bersuhu lebih rendah tanpa kontak langsung antara keduanya. Strukturnya terdiri atas sebuah tabung silinder (*shell*) yang berfungsi sebagai wadah fluida pertama, dan di dalamnya terdapat sejumlah pipa kecil (*tubes*) yang disusun sejajar sebagai media aliran fluida kedua. Fluida panas umumnya dialirkan melalui sisi *tube*, sedangkan fluida dingin mengalir melalui sisi *shell* (atau sebaliknya), tergantung kebutuhan sistem (Hayyin dkk., 2025).



Gambar 2. 8 *Shell and tube heat exchanger*
Sumber : (Çengel, 2020)

2.4.3 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

Adapun persamaan dasar *heat exchanger* yang digunakan yaitu sebagai berikut:

a. Panas Yang Diserap

Dalam konteks penukar kalor, perpindahan panas terjadi antara dua fluida yang memiliki perbedaan suhu. Fluida dengan suhu lebih tinggi akan mentransfer energi termalnya ke fluida dengan suhu lebih rendah melalui permukaan pemisah, seperti dinding pipa atau pelat. Laju perpindahan panas (Q) dalam sistem ini dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Keterangan :

Q : Laju perpindahan panas (Watt)

\dot{m} : Laju aliran massa (kg/s)

c_p : Panas spesifik (J/kg°C)

ΔT : Perbedaan temperatur (°C)

Dalam penelitian ini, fluida panas berupa air akan mentransfer kalor ke fluida penyimpan energi termal. Besarnya energi yang ditransfer dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kalor sebagai berikut:

$$E_{air} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot t \quad (2.4)$$

Keterangan :

E_{air} : Energi air (Joule)

t : Waktu perpindahan panas (s)

Dalam penukar panas yang ideal, fluida dingin menyerap semua panas dari fluida panas. Jadi laju transfer panas adalah :

$$Q = Q_e = Q_a = \dot{m}_H \cdot c_{pH} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_C \cdot c_{pC} \cdot \Delta T_C \quad (2.5)$$

Energi panas yang tersimpan di dalam *Phase Change Material* (PCM) berupa asam palmitat merupakan gabungan dari panas sensibel dan panas laten. Oleh karena itu, energi total PCM dihitung sebagai penjumlahan dari ketiga tahapan yaitu fase padat, proses peleburan, dan fase cair pada pemanasan, serta kebalikannya pada pendinginan. Secara matematis, energi total PCM dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot [c_{ps} \cdot (T_m - T_i) + L_s + c_{pl} \cdot (T_f - T_m)] \quad (2.6)$$

Dan

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot [c_{pl} \cdot (T_i - T_m) + L_l + c_{ps} \cdot (T_m - T_f)] \quad (2.7)$$

Keterangan :

m_{PCM} : massa PCM (kg)

c_p : kapasitas panas jenis PCM (J/kg·°C)

T_i : temperatur awal PCM (°C)

T_m : temperatur leleh PCM (°C)

T_f : temperatur akhir PCM (°C)

L : kalor laten leleh PCM (J/kg)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik perpindahan panas pada material perubahan fase PCM berupa asam palmitat, yang digunakan sebagai media penyimpanan energi termal dalam sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*). Asam palmitat dipilih sebagai PCM alternatif karena memiliki titik leleh yang sesuai dengan kebutuhan sistem termal domestik (sekitar 63,54°C), stabilitas kimia yang baik, serta bersifat ramah lingkungan, sehingga menjadikannya sebagai opsi yang ekonomis dan berkelanjutan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan eksperimental, Alat penukar kalor yang digunakan dalam pengujian adalah jenis *shell and tube heat exchanger* dengan konfigurasi tabung horizontal. Adapun waktu dan tempat serta hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

3.1 Tempat Pelaksanaan

Pengambilan data Penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2 Waktu Pelaksanaan

Adapun waktu pelaksanaannya dilakukan dari tanggal 1 Mei 2025 sampai dengan 1 November 2025. Adapun deskripsi penelitian dapat dilihat pada uraian berikut.

1. Studi Literatur

Tahap awal dalam penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur yang bertujuan untuk memperoleh pemahaman teoritis mengenai konsep perpindahan panas, alat penukar kalor, serta material perubahan fase (PCM). Studi ini didasarkan pada referensi dari jurnal ilmiah, buku teks, dan artikel terpercaya yang relevan dengan topik penelitian.

2. Persiapan Alat dan Bahan

Setelah memperoleh dasar teori yang memadai, langkah berikutnya adalah menyiapkan peralatan dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian. Persiapan ini meliputi penyusunan sistem alat penukar kalor tipe *shell and tube*, tangki penyimpanan air panas, asam palmitat sebagai bahan PCM, serta perlengkapan pengukuran seperti termokopel dan data *logger*.

3. Pelaksanaan Pengujian

Tahap ini merupakan bagian inti dari proses eksperimen. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan alat penukar kalor yang diposisikan secara horizontal, sesuai dengan batasan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya.

4. Penyusunan Laporan Penelitian

Setelah proses pengujian selesai, tahap akhir adalah menyusun laporan penelitian secara sistematis. Laporan ini bertujuan untuk memaparkan hasil penelitian, analisis data, serta kesimpulan yang diperoleh. Penulisan laporan dilakukan berdasarkan struktur karya ilmiah yang berlaku dan merujuk pada pedoman penulisan skripsi Universitas Lampung.

3.3 Alat dan Bahan

Adapun rincian alat dan bahan yang digunakan dijelaskan sebagai berikut:

1. Alat yang digunakan dalam penelitian :

a. Pemanas Air

Dalam penelitian ini, digunakan pemanas air tipe koil listrik sebagai

komponen utama untuk menaikkan temperatur fluida kerja. Pemanas tipe ini bekerja berdasarkan prinsip pemanasan resistif, di mana arus listrik dialirkkan melalui kawat logam dengan hambatan tertentu (resistansi), sehingga menghasilkan energi panas akibat konversi energi listrik menjadi energi termal.



Gambar 3. 1 Pemanas Air (*Heater*)

b. Pompa Air

Pada sistem pengujian ini, pompa air berfungsi sebagai penggerak sirkulasi fluida kerja yang mengalirkan air secara kontinu dari tangki penampungan menuju alat penukar kalor, dan selanjutnya kembali ke tangki setelah melewati proses perpindahan panas.



Gambar 3. 2 Pompa Air

Tabel 3. 1 Spesifikasi Pompa Air

Merek	Shimge ZPS 15-9-140
Daya	60/85/120 Watt
Voltase	220 V
Temperatur Air (maks)	90°C
Tekanan System (maks)	10 bar
Daya Dorong (maks)	9 meter
Kapasitas (maks)	1,6 m/h
Ukuran Pipa	3/4 inch

c. Penampungan Air

Tangki penampung air dalam penelitian ini berperan sebagai wadah penyimpanan sementara bagi fluida kerja sebelum dialirkan ke dalam sistem penukar kalor. Fungsi utama dari tangki ini adalah untuk menyediakan pasokan air panas secara berkelanjutan ke sistem, khususnya selama berlangsungnya proses transien termal pada fase peleburan dan pembekuan dari material perubahan fasa, yaitu asam palmitat.



Gambar 3. 3 Penampungan Air

d. Selang Pipa Air Panas

Pemasangan pipa dilakukan sesuai dengan konfigurasi sistem tertutup yang telah dirancang, sehingga aliran fluida dapat berlangsung secara sirkulasi dan terkontrol.



Gambar 3. 4 Selang Pipa Air Panas

e. *Water flow meter*

Water flow meter berfungsi untuk mengukur laju aliran volumetrik dari fluida yang mengalir, khususnya dari sisi keluaran pompa menuju alat penukar kalor. Dengan adanya pengukuran ini, nilai laju aliran massa fluida dapat dihitung berdasarkan hubungan antara laju aliran volumetrik dan massa jenis fluida yang digunakan.



Gambar 3. 5 *Digital Water Flow Meter Control Display*

Tabel 3. 2 Spesifikasi *Digital Water Flow Meter control display*

Merk	ZJ-LCD-M
Satuan	LPM (liter per menit)
Rentang Tegangan Operasi	DC 24V/1A
Rentang Kuantitatif	1-9999 LPM

f. Kontroler suhu dan SSR (*Solid state relay*)

Dalam penelitian ini digunakan sistem pengendalian suhu digital berupa *dual PID controller* tipe REX-C100 yang terintegrasi dengan sensor suhu *thermocouple* tipe K. Sistem REX-C100 bekerja berdasarkan prinsip kontrol umpan balik (*feedback control*), di mana suhu yang terdeteksi oleh termokopel dibandingkan dengan suhu yang ditetapkan (*setpoint*), dan selanjutnya sistem akan menyesuaikan daya pemanas untuk mempertahankan suhu pada nilai yang diinginkan. Dengan pengendalian suhu yang presisi, proses perpindahan panas ke material perubahan fasa (PCM) dapat berlangsung secara optimal.

Gambar 3. 6 Kontroler *Thermocouple*

Tabel 3. 3 Spesifikasi kontroler

Daya	10 VA
Akurasi pengukuran	0.5% FS
Siklus pengambilan sampel	0.5 detik
Suhu pengukuran	0 - 400°C
<i>Power supply</i>	AC 100-240V

g. *Data Logger*

Dalam sistem pengujian perpindahan panas, perangkat termokopel dan *data logger* memegang peranan penting sebagai alat pengukuran suhu yang akurat dan andal. Informasi temperatur yang diperoleh menjadi dasar dalam mengevaluasi kinerja termal sistem penyimpanan energi, termasuk efisiensi proses pelepasan dan penyimpanan kalor laten pada PCM.

Gambar 3. 7 *Data logger*

Tabel 3. 4 Spesifikasi *data logger*

Merek	LU BTM-4208SD
Suhu <i>min/max</i>	-50° s/d 1300 °C
<i>Record external</i>	<i>SD Card</i>
Ketelitian	0,1° C
Maks. <i>input</i>	12 Saluran

h. *Thermocouple*

Termokopel berfungsi untuk mendekripsi temperatur pada titik-titik strategis dalam sistem, antara lain suhu pada material perubahan fasa (PCM) berupa asam palmitat, temperatur fluida pemanas (air) pada saluran masuk dan keluar alat penukar kalor, serta temperatur fluida pada saluran masuk dan keluar tangki penampungan air. Informasi temperatur yang diperoleh menjadi dasar dalam mengevaluasi kinerja termal sistem penyimpanan energi, termasuk efisiensi proses pelepasan dan penyimpanan kalor laten pada PCM.

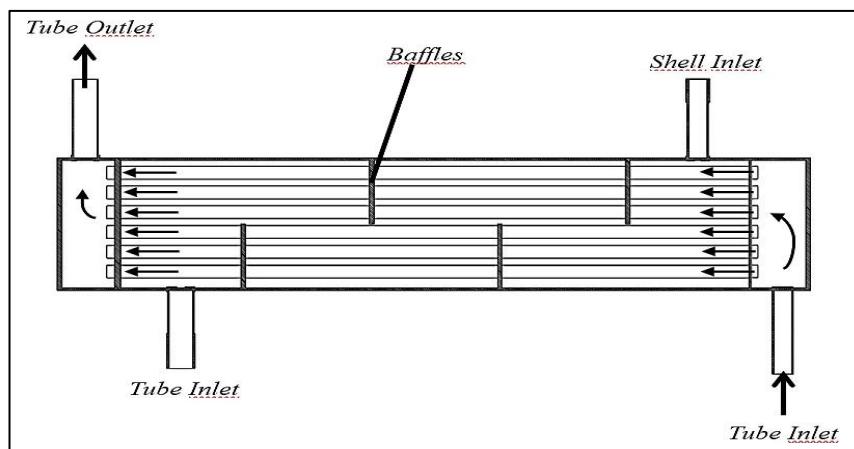
Gambar 3. 8 *thermocouple*

Tabel 3. 5 Spesifikasi *thermocouple*

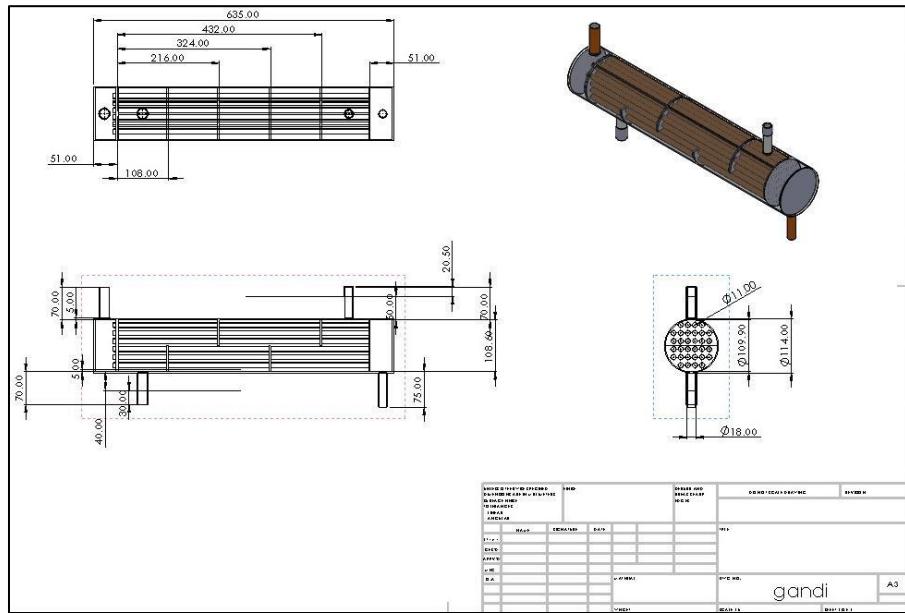
Diameter Tabel	2*0.5mm
Panjang Kabel	1 meter
Layer	<i>blue teflon temperature (ptfe)</i>
Temperatur Ukur	-200°C s/d 600°C
Ketelitian	0.1°C

i. Alat Penukar Kalor

Pada penelitian ini digunakan alat penukar kalor dengan konfigurasi tipe *shell and tube* yang dirancang khusus untuk mengamati dan mengevaluasi karakteristik perpindahan panas dari material perubahan fasa berbasis asam palmitat. Sistem ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu *shell* sebagai ruang penyimpanan material PCM, dan *tube* sebagai jalur aliran fluida kerja.

Gambar 3. 9 Konfigurasi internal *shell and tube*

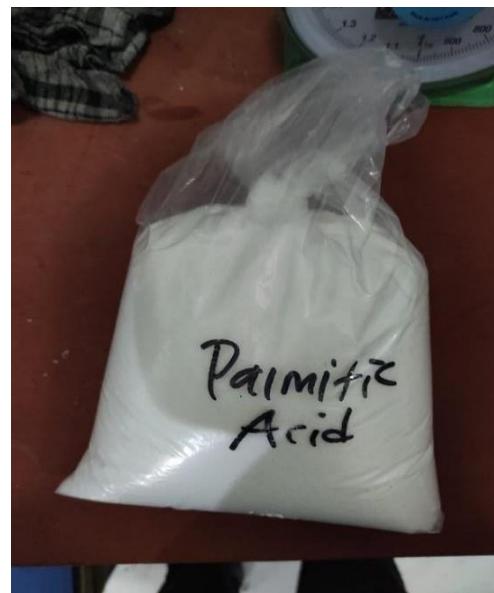
Gambar potongan melintang alat penukar kalor *shell and tube* menunjukkan konfigurasi internal di mana pipa tembaga (*tube*) berfungsi sebagai jalur aliran air panas, sedangkan ruang antara tube dan dinding *shell* PVC diisi oleh asam palmitat sebagai PCM.



Gambar 3. 10 Alat Penukar Kalor

2. Bahan yang digunakan dalam penelitian

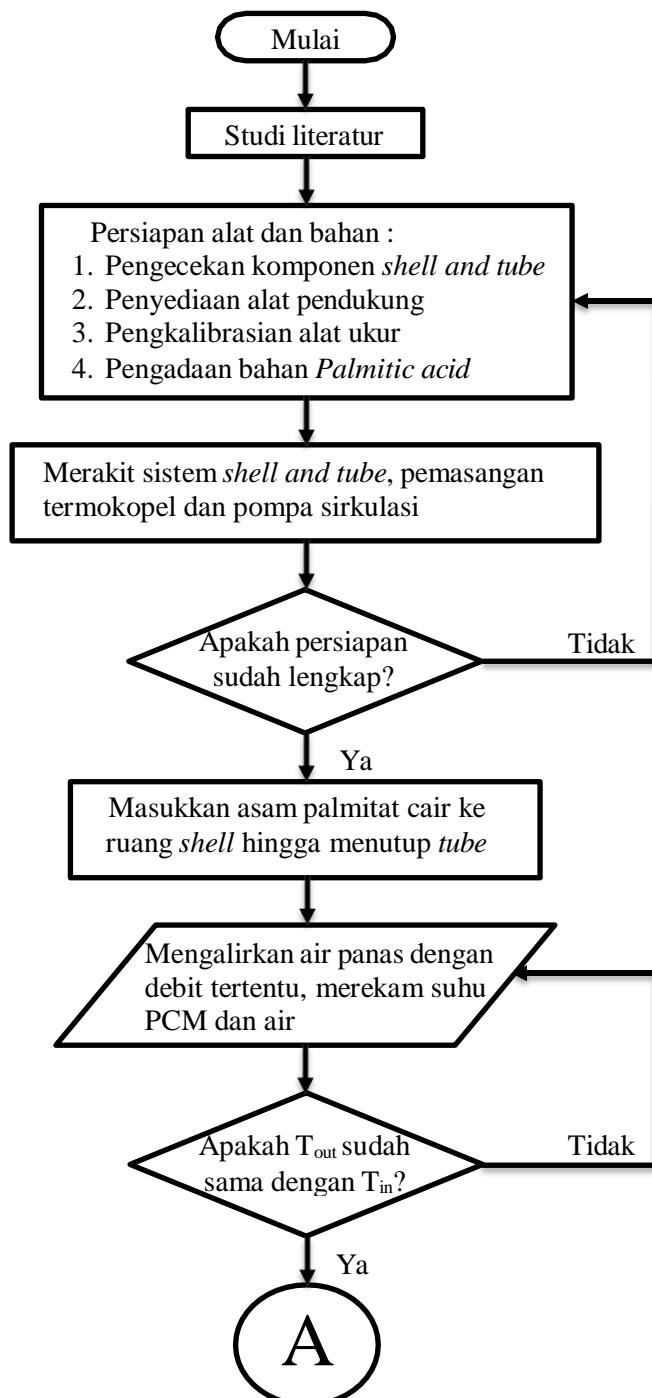
Penelitian ini menggunakan dua jenis bahan utama, yaitu air sebagai fluida kerja dan asam palmitat sebagai material perubahan fase (*Phase Change Material/PCM*). Air digunakan sebagai media pengantar panas yang bersirkulasi dalam sistem tertutup. Adapun material perubahan fase yang digunakan adalah asam palmitat dalam bentuk padat.

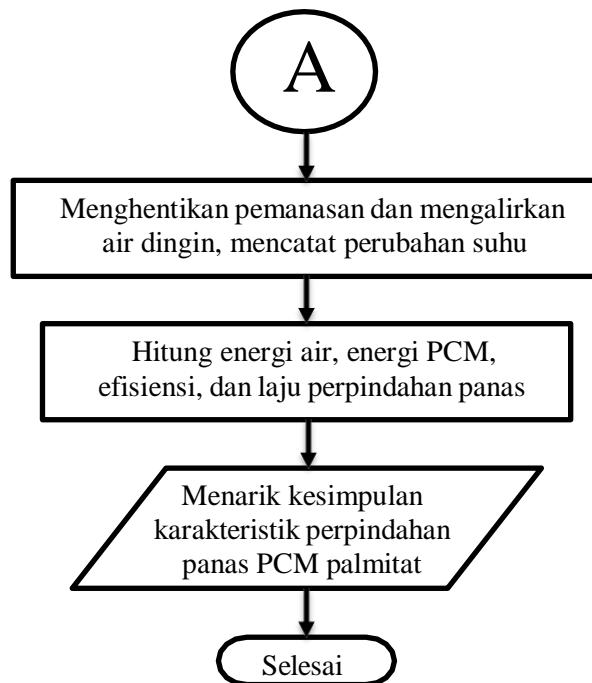


Gambar 3. 11 *Palmitic Acid*

3.5 Diagram Alir

Adapun tahapan penelitian tentang pengujian karakteristik perpindahan panas palmitat dengan menggunakan alat penukar kalor tipe *shell and tube* adalah sebagai berikut :





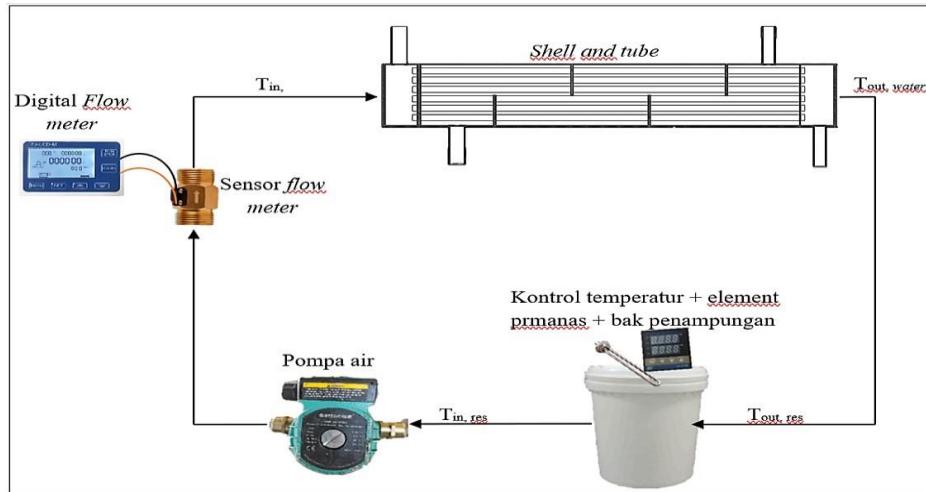
Gambar 3. 12 Diagram alir penelitian

3.6 Jenis Skema Pengujian

Dalam pelaksanaannya, pengujian dibagi ke dalam beberapa skema untuk menggambarkan alur dan kondisi operasional yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut ini:

1. Skema sistem *close loop*

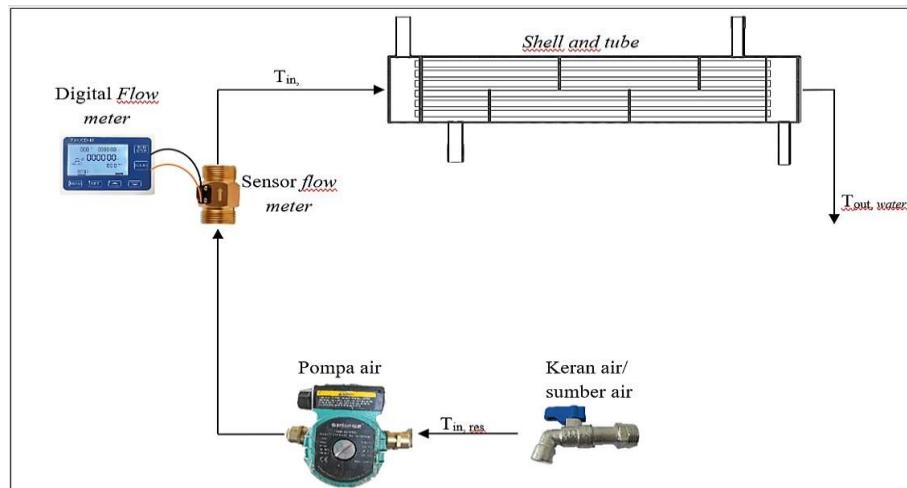
Skema sistem *close loop* merupakan konfigurasi sistem sirkulasi tertutup, di mana fluida kerja berupa air panas dialirkan secara kontinu dari tangki penampungan menuju alat penukar kalor, dan setelah melalui proses perpindahan panas, dialirkan kembali ke tangki semula untuk dipanaskan ulang. Keunggulan dari penggunaan sistem *close loop* adalah sistem ini mempermudah pengaturan dan pemantauan parameter pengujian, seperti laju aliran dan suhu fluida, karena kondisi fluida dapat dikontrol dalam ruang lingkup sistem yang tertutup.



Gambar 3. 13 Skema pengujian *close loop*

2. Skema sistem *open loop*

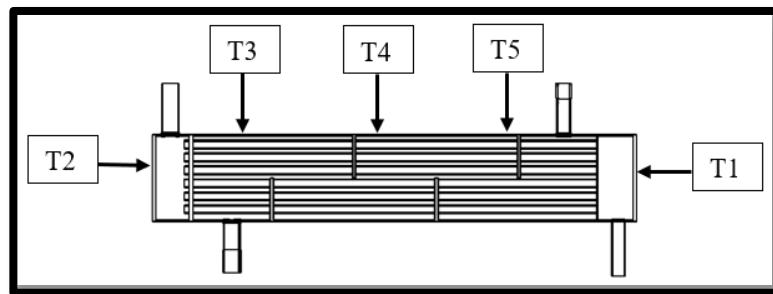
Sistem *open loop* merupakan konfigurasi aliran fluida terbuka, di mana air dingin dialirkan secara langsung dari sumber menuju alat penukar kalor tanpa dilakukan proses sirkulasi ulang. Dalam konteks penelitian ini, sistem *open loop* digunakan untuk mengamati perilaku pelepasan panas dari material perubahan fase (PCM), yaitu parafin, ke fluida kerja (air) yang terus berganti. Dengan tidak adanya sirkulasi ulang, maka fluida kerja yang masuk selalu berada dalam kondisi termal awal yang konstan, sehingga mempermudah dalam menganalisis konduktivitas termal PCM secara lebih spesifik.



Gambar 3. 14 Skema sistem *open loop*

3.7 Penempatan Titik Pengukuran

Pengukuran dalam penelitian ini difokuskan pada dua parameter utama, yaitu temperatur dan debit aliran fluida kerja (air). Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan lima buah sensor termokopel tipe K yang dihubungkan dengan perangkat *data logger* untuk merekam data secara otomatis. Titik pertama, yaitu T_1 (T_{in}), digunakan untuk mengukur temperatur air saat memasuki pipa bagian dalam (*tube*). Titik kedua, T_2 (T_{out}), merekam temperatur air setelah keluar dari sistem, yang merepresentasikan jumlah panas yang telah ditransfer ke PCM. Selanjutnya, termokopel T_3 diletakkan pada bagian PCM yang berada di dekat pangkal pipa air masuk, sedangkan T_4 dipasang di bagian tengah *shell* untuk mengamati distribusi temperatur selama proses peleburan berlangsung. Titik kelima, T_5 , mengukur temperatur PCM di dekat ujung pipa air keluar, sehingga memungkinkan analisis distribusi panas sepanjang sistem.



Gambar 3. 15 Penempatan titik pengukuran

Data temperatur dicatat oleh *data logger* setiap 30 detik selama proses berlangsung, guna memperoleh gambaran yang lengkap mengenai fluktuasi suhu selama proses transien termal. Penelitian ini dilaksanakan dengan tiga variasi debit aliran air, yaitu 8 liter/menit, 10 liter/menit, dan 12 liter/menit. Setiap variasi dilakukan dalam tiga kali pengulangan, sehingga total jumlah percobaan yang dilakukan adalah sembilan kali. Variasi debit ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh kecepatan aliran terhadap proses peleburan PCM serta efisiensi perpindahan panas dalam sistem *shell and tube heat exchanger*.

3.8 Kondisi Operasional

Pemilihan suhu air pemanas 70°C dan suhu air pendingin 30°C didasarkan pada karakteristik termofisika palmitat serta rentang operasional sistem *Solar Water Heater*. Palmitat memiliki titik leleh pada kisaran 62–64°C dan titik beku sekitar 55–58°C, sehingga pemanasan di atas 65°C diperlukan untuk memastikan proses melting berlangsung secara penuh (Fang, dkk. 2022). Demikian pula, pendinginan pada suhu sekitar 30°C dipilih untuk memastikan *solidification* dapat terjadi secara total dan tidak hanya parsial. Rentang ini juga konsisten dengan suhu operasional sistem *Solar Water Heater*, yang umumnya menghasilkan air panas 60–75°C pada kondisi puncak radiasi matahari serta air masuk pada kisaran 28–32°C (Mellouli, dkk. 2022). Oleh karena itu, penggunaan suhu tengah seperti 45–50°C tidak memungkinkan terjadinya perubahan fase secara lengkap sehingga energi laten tidak dapat dihitung secara akurat.

3.9 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan sistem *shell and tube heat exchanger*. Pengujian dilakukan untuk memantau parameter-parameter yang memengaruhi karakteristik perpindahan panas pada material perubahan fasa, yaitu asam palmitat. Adapun tahapan metode pengambilan data dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh peralatan dan bahan yang dibutuhkan dalam pengujian, meliputi pompa sirkulasi air, sensor termokopel dan *data logger*, sensor *water flow meter*, pemanas air, tangki penampung air panas, alat penukar kalor, asam palmitat sebagai PCM, pipa PVC sebagai saluran fluida, serta katup pengatur aliran.
2. Merangkai seluruh komponen sistem sesuai dengan rancangan skematik yang telah ditentukan, memastikan tidak ada kebocoran maupun gangguan aliran.

3. Mengaktifkan *data logger* dan menghubungkan sensor termokopel pada titik-titik pengukuran dengan susunan sebagai berikut:
 - CH1 dan CH2 untuk mengukur temperatur fluida pada saluran masuk dan keluar dari alat penukar kalor.
 - CH3 hingga CH5 untuk mengukur distribusi temperatur pada asam palmitat di dalam ruang *shell*.
4. Memanaskan air di dalam tangki penampung hingga mencapai temperatur yang telah ditentukan yaitu 70°C , dengan toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
5. Mengaktifkan pompa untuk mengalirkan air panas ke dalam sistem.
6. Mengalirkan air panas ke dalam bagian *tube* dari alat penukar kalor untuk mentransfer panas ke asam palmitat hingga material tersebut mengalami fase peleburan (mencapai temperatur $63,54^{\circ}\text{C}$ ke atas).
7. Merekam data temperatur dari semua titik pengukuran menggunakan *data logger* dengan interval pencatatan setiap 30 detik.
8. Mengaktifkan sensor *water flow meter* untuk memantau laju aliran air secara *real time*.
9. Mengatur kecepatan aliran air sesuai dengan nilai yang telah divariasikan menggunakan katup manual.
10. Membiarakan sistem bekerja secara sirkulasi tertutup hingga temperatur air di dalam tangki penampung mengalami kenaikan akibat pelepasan kalor laten dari PCM.
11. Menyimpan seluruh data hasil pencatatan dari *data logger* dalam format digital dan mengolahnya menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.
12. Mengulangi langkah 9 sampai 11 untuk setiap variasi kecepatan aliran yang telah dirancang guna memperoleh perbandingan data.
13. Menganalisis data yang telah diperoleh untuk menarik kesimpulan terkait karakteristik perpindahan panas asam palmitat sebagai PCM.

Dengan metode ini, diperoleh data primer berupa perubahan temperatur serta laju aliran fluida yang diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas penyimpanan dan pelepasan energi termal oleh asam palmitat dalam sistem pemanas air berbasis energi surya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental terhadap sistem *shell and tube heat exchanger* yang menggunakan asam palmitat sebagai *Phase Change Material* (PCM) pada aplikasi *solar water heater*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada proses pemanasan, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai fase cair sempurna adalah 524 detik (8 L/menit), 381 detik (10 L/menit), dan 377 detik (12 L/menit). Pada proses pendinginan, durasi tercatat 486 detik (8 L/menit), 459 detik (10 L/menit), dan 420 detik (12 L/menit). Durasi perubahan fase ditentukan untuk mengukur respons termal, efektivitas penyimpanan energi latent palmitat dan memastikan PCM dapat menyelesaikan *melting-solidification* secara penuh dalam waktu operasional sistem *Solar Water Heater*.
2. Berdasarkan hasil pengujian, karakteristik perpindahan panas dari air panas ke asam palmitat menunjukkan bahwa proses transfer energi berlangsung secara efektif melalui mekanisme konveksi paksa pada sisi fluida dan konduksi pada media PCM. Nilai laju perpindahan panas pada proses pemanasan berturut turut sebesar 1,29 kW, 1,73 kW dan 2,05 kW. Sedangkan pada proses pendinginan didapatkan nilai berturut turut sebesar 1,42 kW, 1,42 kW dan 1,76 kW, dengan seluruh variasi debit menghasilkan bilangan *Reynolds* dalam regime turbulen. Berdasarkan perbandingan energi air dan energi yang diserap PCM, diperoleh rasio kesetimbangan termal pada proses pemanasan berada pada rentang 0,97 atau 97%, sedangkan pada

proses pendinginan berada pada rentang 0,946 atau 94,6%. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi yang dibawa fluida dapat diserap dan dilepaskan kembali oleh PCM dengan efisiensi tinggi.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki penelitian-penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan menambahkan aditif penghantar panas seperti grafit atau logam ringan untuk meningkatkan konduktivitas termal serta mempercepat proses pelelehan dan pembekuan PCM.
2. Diperlukan penggunaan alat ukur dan sensor termokopel yang lebih akurat dan responsif.
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan material *shell-and-tube* yang tahan panas, seperti *stainless steel*, untuk menghindari pemuatan dan deformasi. PVC digunakan pada penelitian ini karena biaya dan kemudahan perakitan, namun setelah pengujian terlihat adanya perubahan bentuk dan penurunan kekakuan pada suhu tinggi. Oleh karena itu, penggunaan material logam diperlukan agar sistem lebih stabil dan hasil lebih akurat.
4. Perlu dilakukan variasi temperatur untuk menganalisis pengaruhnya terhadap laju perpindahan panas.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaghemandi, M., & Alamandi, M., (2025). *Heat Transfer In Composite Materials: Mechanisms And Applications.* arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.15231>
- Alwan, N. T., Majeed, M. H., Khudhur, I. M., Shecheklein, S. E., Ali, O. M., Yaqoob, S. J., & Alayi, R. (2022). *Assessment of the performance of solar water heater: An experimental and theoretical investigation.* International Journal of Low-Carbon Technologies, 17, ctac032.
<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac032>
- Anand, A., Mansor, M., Siddiqui, M. I. H., Sharma, K., Sadasivuni, K. K., Shukla, A., Priyadarshi, N., & Twala, B. (2025). *A comprehensive review on eutectic phase change materials: Development, thermophysical properties, thermal stability, reliability, and applications.* Alexandria Engineering Journal, V112, 254-280.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.10.054>
- Asrori, A., & Susilo, S. H. (2022). *The development of Fresnel lens concentrators for solar water heaters: A case study in tropical climates.* EUREKA: Physics and Engineering,(3),4. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002441>
- Astawa, K., Surya, I. G. T. P., & Tenaya, I. G. N. P. (2022). Analisis Efektivitas Perpindahan Panas pada Alat Penukar Panas Jenis Water to Water. JMPM: Jurnal Material dan Proses Manufaktur Vol. 6, No. 1, p26-30,
<https://doi.org/10.18196/jmpm.v6i1.14896>

- Astika, I. M., Winaya, I. N. S., Subagia, I. D. G. A., Wirawan, I. K. G., Dwijana, I. G. K., & Sukadana, I. G. K. (2021). Peningkatan konduktivitas termal lemak sapi sebagai bahan PCM dengan menambahkan arang sekam padi. *Dinamika Teknik Mesin*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.29303/dtm.v11i1.364>
- Bhagyalakshmi, p., Rajan, k., Kumar, K. S., & Reddy, S. S. (2018). *Experimental Study On Solar Energy Storage In Phase Change Materials Using Cylindrical Shell Type Heat Exchanger*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13(2). https://www.arpnjournals.org/rp_2018/jeas_0118_6686.pdf
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 6th Edition. McGraw-Hill.
- Eze, F., Egbo, M., Anuta, U. J., Ntiriwaa, O. B. R., Ogola, J., & Mwabora, J. (2024). *A review on solar water heating technology: Impacts of parameters and techno-economic studies*. *Bulletin of the National Research Centre*, 48, 29. <https://doi.org/10.1186/s42269-024-01187-1>
- Fang, G., Chen, Z., Liu, X., & Zhang, Z. (2022). *Review on heat transfer enhancement of latent heat thermal energy storage in shell-and-tube systems: Numerical and experimental studies*. *Frontiers in Energy Research*, 10, 859273. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.859273>
- Hayyin, F., Isniah, S., Supriyadi, Surani, D., & Kusuma, M. T. W. (2025) . Analisis Efisiensi *Plate Heat Exchanger* (Phe) Pada Sistem *Hot Shock* Di Industri Minyak Goreng. *Jurnal Intekna : Informasi Teknik dan Niaga* Volume 25, No.1. <http://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/intekna/issue/archive>
- Huo, X., Xu, T., Zhang, S., & Wang, Y. (2024). *Thermal performance enhancement of palmitic acid phase change material using copper foam for latent heat thermal energy storage*. *Energies*, 17(5), 1923. <https://doi.org/10.3390/en17051923>

- Kadhim, S. A., Askar, A. H., & Saleh, A. A. M. (2024). *An enhancement of double pipe heat exchanger performance at a constant wall temperature using a nanofluid of iron oxide and refrigerant vapor*. *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 78–87. [1706855466-en.pdf](https://doi.org/10.1706855466-en.pdf)
- Koua, M., Koffib, E. P. M., & Gbahab, P. (2020). *Comparative study of the thermal performance of two thermosiphon solar water heaters system*. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(3), 521–530. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.3.521-530>
- Lin, Y., Cong, R., Chen, Y., & Fang, G. (2020). *Thermal properties and characterization of palmitic acid/nano silicon dioxide/graphene nanoplatelet for thermal energy storage*. *International Journal of Energy Research*, 44(7), 5621–5633. <https://doi.org/10.1002/er.5322>
- Lin, Y., Zhu, C., Alva, G., & Fang, G. (2018). *Palmitic acid/polyvinyl butyral/expanded graphite composites as form-stable phase change materials for solar thermal energy storage*. *Applied Energy*, 228, 1801–1809. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.033>
- Liu, Z., Zhang, Y., & Chen, Y. (2023). *Thermal performance enhancement of stearic–palmitic acid mixture PCM stabilized by expanded graphite*. *Membranes*, 13(1), 46. <https://doi.org/10.3390/membranes13010046>
- Mao, S., Liu, Y., Wu, X., Zhang, L., Chen, J., & Zhou, T. (2025). *Thermal energy storage performance, application and challenge of phase change materials: a review*. *Energy Storage and Saving*, 4(3), 300-322. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.03.001>
- Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., & Rahman, S. M. A. (2019). *Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview*. *Energies*, 12(16), 3167. <https://doi.org/10.3390/en12163167>
- Natesan, S., Kumar, V. A., Gokulnath, M., & Raj, G. K. (2020). *Performance analysis of palmitic acid coated PCM storage container*. *International Journal of Research and Review*, 7(3), 1–6. <https://www.researchgate.net/publication/341051096>

- Nejat, P., Fekri, Y., & Jomehzadeh, F. (2022). *Phase change material (PCM) as the smart heat-storing concept: A brief review*. *Annals of Marine Science*, 6(1), 34–38.
- Rahmadi, J., Fuazen, & Putra, M. J. S. (2023). Studi Komparatif Efektivitas Perpindahan Kalor dengan Pengaturan Laju Aliran Fluida Pendingin *Heat Exchanger* Jenis *Plate* Aliran Searah. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(1). 3500-3506, <https://jptam.org/index.php/jptam/article/view/5746/4827>
- Sidiq, M. F., & Waluyo, J. (2025). Simulasi karakterisasi *solar water heater* sistem aktif dengan variasi bentuk pipa kapsul PCM. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 7(1), 13–20. <https://doi.org/10.22146/jmdt.98503>
- Wu, W., Sun, Y., Zhang, P., & Zhou, G. (2021). *Form-stable PCM with enhanced thermal conductivity based on capric–palmitic acid-grafted expanded perlite*. *ACS Applied Energy Materials*, 4(9), 9124–9132. <https://doi.org/10.1021/acs.aem.1c01279>
- Zhang, N., & Du, Y. (2018). *Ultrasonic enhancement on heat transfer of palmitic–stearic acid as PCM in unit by experimental study*. *Sustainable Cities and Society*, 43, 532–537. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.040>