

**KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL
PALMITIC ACID SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA
UNTUK PENYIMPAN ENERGI TERMAL**

(Skripsi)

Oleh

**AKMAL MAULANA ABRIEN
2115021004**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL
PALMITIC ACID SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA
UNTUK PENYIMPAN ENERGI TERMAL**

Oleh:

**Akmal Maulana Abrien
NPM 2115021004**

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL PALMITIC ACID SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA UNTUK PENYIMPAN ENERGI TERMAL

Oleh

AKMAL MAULANA ABRIEN

Palmitic acid merupakan salah satu turunan minyak kelapa sawit yang berpotensi digunakan sebagai *phase change material* (PCM) untuk penyimpanan energi termal karena memiliki titik leleh yang sesuai dan panas laten yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan karakteristik termal palmitat setelah mengalami siklus pelelehan dan pembekuan berulang. Pengujian dilakukan secara eksperimental menggunakan metode T-history, *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dan pengujian densitas hingga 600 siklus. Hasil pengujian T-history menunjukkan bahwa temperatur leleh palmitat mengalami kenaikan dari sekitar 75,2 °C pada siklus awal menjadi 78,3 °C pada siklus ke-600, sedangkan temperatur beku meningkat dari sekitar 40,2 °C menjadi 44,2 °C. Pengujian DSC menunjukkan temperatur puncak pelelehan sebesar 61,65 °C dengan panas laten 231,17 J/g pada siklus 0, dan menurun sedikit sekitar 228–229 J/g setelah 200 siklus. Pada proses pembekuan, panas laten tercatat sebesar 237,87 J/g pada siklus awal dan menurun secara tidak signifikan setelah siklus berulang. Hasil pengujian densitas menunjukkan perubahan kerapatan yang relatif kecil pada siklus 0, 200, 400, dan 600, sehingga tidak mempengaruhi kinerja termal material secara signifikan. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa palmitat memiliki kestabilan termal yang baik dan tetap layak digunakan sebagai material penyimpanan energi termal meskipun telah mengalami siklus termal berulang hingga 600 siklus.

Kata kunci: *Palmitic Acid, Phase Change Material, Kestabilan Termal, T-History, DSC, Penyimpanan Energi Termal.*

ABSTRACT

THERMAL STABILITY CHARACTERISTICS OF PALMITIC ACID AS A PHASE CHANGE MATERIAL FOR THERMAL ENERGY STORAGE

By

AKMAL MAULANA ABRIEN

Palmitic acid is a derivative of palm oil that has significant potential as a phase change material (PCM) for thermal energy storage due to its suitable melting temperature and high latent heat. This study aims to analyze the thermal stability characteristics of palmitic acid after undergoing repeated melting and solidification cycles. The experiments were conducted using the T-history method, Differential Scanning Calorimetry (DSC), and density measurements for up to 600 thermal cycles. The T-history results show that the melting temperature of palmitic acid increased from approximately 75.2 °C in the initial cycle to 78.3 °C at the 600th cycle, while the freezing temperature increased from about 40.2 °C to 44.2 °C. DSC analysis revealed a peak melting temperature of 61.65 °C with a latent heat of 231.17 J/g at cycle 0, which slightly decreased to approximately 228–229 J/g after 200 cycles. During the solidification process, the latent heat was recorded at 237.87 J/g in the initial cycle and showed no significant decrease after repeated thermal cycling. Density measurements indicated relatively small changes at cycles 0, 200, 400, and 600, suggesting that the variations did not significantly affect the thermal performance of the material. Overall, the results demonstrate that palmitic acid exhibits good thermal stability and remains suitable for use as a thermal energy storage material even after 600 repeated thermal cycles.

Keywords: Palmitic Acid, Phase Change Material, Thermal Stability, T-History, DSC, Thermal Energy Storage.

Judul Skripsi

**: KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL
PALMITIC ACID SEBAGAI MATERIAL
BERUBAH FASA UNTUK PENYIMPAN
ENERGI TERMAL**

Nama Mahasiswa

: **Akmal Maulana Abrien**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2115021004**

Program Studi

: **Teknik Mesin**

Fakultas

: **Teknik**



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

NIP. 197112142000121001

Hadi Prayitno, S.T., M.T.

NIP. 198805142019031012

**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.

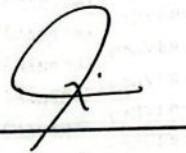
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

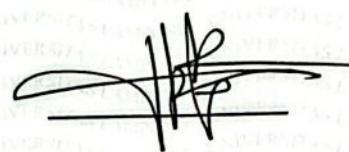
Ketua

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



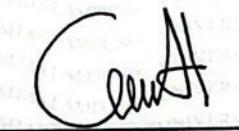
Anggota Penguji

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



Penguji Utama

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



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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 26 Januari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi berjudul “KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL *PALMITIC ACID* SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA UNTUK PENYIMPAN ENERGI TERMAL” 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, 6 Februari 2026

Pembuat pernyataan



Akmal Maulana Abrien

NPM. 2115021004

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Akmal Maulana Abrien dilahirkan di Serang, Banten pada tanggal 8 Februari 2003. Penulis merupakan anak ke dua dari tiga bersaudara dari Bapak Zul Abrar dan almarhumah Ibu Eni Fatimah. Penulis mengawali pendidikan formal di Paud Kenanga pada tahun (2008-2009), kemudian dilanjutkan menempuh pendidikan dasar di SD Negeri Gayam (2009-2015), SMPN 1 Penengahan (2015-2018) dan SMKN 2 Kalianda (2018-2021). Selama menjalani pendidikan SMK, penulis aktif dalam organisasi internal sekolah seperti Pramuka, PMR, ROHIS, dan BETIK GAWI. Pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, Penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Anggota Divisi Kominfo Bidang HUMAS pada periode 2022/2023. Penulis menjalankan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kampung Gedung Batin, Kec. Umpu Semenguk, Kab. Way Kanan pada awal Januari – Februari 2024. Pada tahun 2024 penulis berkesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktek (KP) di BSPJI Bandar Lampung dengan mengambil topik **“Analisa Kerja Mesin Press Emping Hidrolik Di Balai Standarisasi Dan Pelayanan Jasa Industri Bandar Lampung”**. Pada tahun 2025 Penulis melakukan penelitian di bidang Konversi Energi dengan judul **“Karakteristik Kestabilan Termal Palmitic Acid Sebagai Material Berubah Fasa Untuk Penyimpan Energi Termal”**.

MOTTO

“Apa yang sudah dimulai harus diselesaikan”

-Qin Shi Huang-

“Terkadang kita harus kehilangan segalanya untuk mendapatkan sesuatu”

-Brad Pitt-

“Dimana bumi dipijak disitu langit dijunjung”

-Pribahasa-

HALAMAN PERSEMBAHAN



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

KARYA TULIS INI SAYA PERSEMBAHKAN KEPADA

Almarhumah Ibunda dan Ayahanda Tercinta

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

Kakak saya yang bernama Tia Malinda Abrien dan adik saya Arief Budiman serta Kristina Alma Isadora yang selalu memberikan semangat, dukungan motivasi dan finansial serta doa yang menyertai saya selama proses penyelesaian skripsi ini.

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 “KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL *PALMITIC ACID* SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA UNTUK PENYIMPAN ENERGI TERMAL” 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. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Prodi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Nafrizal, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan arahan selama dibangku perkuliahan.
5. Bapak Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., Ph.D Selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan memberikan saran dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Seluruh Dosen, Staff dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
9. Terimakasih tak terhingga kepada kedua orang tua tercinta saya yakni Almarhumah Ibunda Eni Fatimah yang meskipun telah berpulang ke rahmatullah, namun doa, nasihat, perjuangan, serta keteladanan beliau menjadi sumber kekuatan dan motivasi terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan dan skripsi ini dan Ayahanda, Zul Abrar dengan segala pengorbanan, kerja keras, dan kasih sayangnya selalu mendukung saya dalam setiap langkah. Skripsi ini penulis persembahkan sebagai bentuk bakti dan penghormatan kepada kedua orang tua saya.
10. Tia Malinda Abrien dan Arief Budiman, seorang yang darahnya ikut mengalir dalam tubuh saya, terima kasih yang tak terhingga untuk kakak dan adik saya. Sosok yang selalu mendukung dan membantu penulis dalam hal materi hingga meraih gelar Sarjana Teknik.
11. Kristina Alma Isadora yang membantu dalam segala hal baik dukungan secara emosional, finansial maupun dalam penyusunan dan revisi skripsi saya.
12. Ghandi, Ardika dan Roni selaku teman kelompok Tugas Akhir, terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
13. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 yang telah membersamai, memberi motivasi dan semangat selama perkuliahan .
14. Seluruh pihak yang tak dapat saya sebutkan satu persatu yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu menyelesaikan 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, 6 Februari 2026

Penulis,

Akmal Maulana Abrien
NPM. 2115021004

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Perpindahan Panas	5
2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	5
2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi	6
2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi	7
2.2 Sifat Termal Material	8
2.3 <i>Phase Change Materials (PCM)</i>	9
2.4 Klasifikasi PCM.....	11
2.4.1 PCM Organik	11
2.4.2 PCM Anorganik	12
2.4.3 PCM <i>Eutectic</i>	12
2.5 <i>Palmitic Acid</i>	13
2.6 Sifat-sifat Palmitat.....	15
III. METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Tahap Penelitian.....	18
3.2 Fokus Penelitian	18
3.3 Alat dan Bahan.....	19
3.4 Diagram Alir	29
3.5 Skema Pengujian.....	30

3.6	Penempatan Titik Pengukuran	31
3.7	Metode Pengambilan Data	32
3.7.1	Prosedur pengujian <i>T-history</i>	32
3.7.2	Prosedur pengujian <i>Differential Sceanning Calorimetry</i> (DSC)	34
3.7.3	Prosedur Pengujian Densitas	35
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1	Pengujian <i>T-History</i>	37
4.2	Pengujian <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC)	45
4.3	Pengujian Densitas	53
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perpindahan panas konduksi	6
Gambar 2. Perpindahan panas konveksi	7
Gambar 3. Alat DSC-60 Plus	9
Gambar 4. Klasifikasi PCM	11
Gambar 5. Senyawa Palmitat	14
Gambar 6. Pemanas air	19
Gambar 7. Data logger	20
Gambar 8. Pompa air.....	21
Gambar 9. Water flow meter	21
Gambar 10. Arduino dan SSR.....	22
Gambar 11. Selang air.....	22
Gambar 12. Katup air	23
Gambar 13. Relay 10 ampere.....	23
Gambar 14. Max 6675 dan termocople.....	24
Gambar 15. Wadah penampung air	25
Gambar 16. Wadah sirkulasi	25
Gambar 17. Tabung reaksi	26
Gambar 18. Neraca Analitik.....	26
Gambar 19. Pipet/syringe.....	27
Gambar 20. Pipa air.....	27
Gambar 21. <i>Palmitic Acid</i>	28
Gambar 22. Diagram alir penelitian.....	29
Gambar 23. Instalasi alat pengujian	30
Gambar 24. Penempatan titik pengukuran	32
Gambar 25. Grafik siklus 100	39
Gambar 26. Grafik siklus 200	40
Gambar 27. Grafik siklus 300	41
Gambar 28. Grafik siklus 400	42
Gambar 29. Grafik siklus 500	43
Gambar 30. Grafik siklus 600	44
Gambar 31. Grafik hasil pengujian DSC Palmitat siklus 0.....	46
Gambar 32. Grafik hasil pengujian DSC Palmitat siklus 200.....	48
Gambar 33. Grafik hasil pengujian DSC Palmitat siklus 400.....	49
Gambar 34. Grafik hasil pengujian DSC Palmitat siklus 600.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis-jenis material PCM eutectic	13
Tabel 2. Spesifikasi data logger	20
Tabel 3. Spesifikasi pompa air	21
Tabel 4. Tempratur peleahan pada siklus 0, 100, 200, 300, 400, 500, dan 600	37
Tabel 5. Tempratur pembekuan pada siklus 0, 100, 200, 300, 400, 500 dan 600 ..	38
Tabel 6. Peleahan DSC Palmitat pada siklus	46
Tabel 7. Pembekuan DSC Palmitat pada siklus 0	46
Tabel 8. Peleahan DSC Palmitat pada siklus 200	47
Tabel 9. Pembekuan DSC Palmitat pada siklus 200	47
Tabel 10. Peleahan DSC Palmitat pada siklus 400	49
Tabel 11. Pembekuan DSC Palmitat pada siklus 400	49
Tabel 12. Peleahan DSC Palmitat pada siklus 600	50
Tabel 13. Pembekuan DSC Palmitat pada siklus 600	50
Tabel 14. Peleahan pengujian DSC Palmitat pada siklus 0, 200, 400 dan 600....	52
Tabel 15. Pembekuan pengujian DSC Palmitat pada siklus 0, 200, 400 dan 600..	52
Tabel 16. Pengujian densitas siklus 0, 200, 400, dan 600	53

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) merupakan salah satu tanaman perkebunan yang memiliki peran strategis dalam perekonomian global. Minyak kelapa sawit yang dihasilkan dari buah kelapa sawit menjadi komoditas minyak nabati yang paling banyak diproduksi dan diperdagangkan di dunia. Secara global, minyak kelapa sawit digunakan sebagai bahan baku utama dalam industri makanan, kosmetik, farmasi, hingga bioenergi. Peran penting minyak kelapa sawit dalam rantai pasok global menjadikannya komoditas strategis yang berkontribusi besar terhadap ketahanan pangan dan energi dunia. Oleh karena itu, pengembangan industri kelapa sawit terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi dan kebutuhan industri (Purba dkk., 2021).

Indonesia merupakan produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia dan memiliki kontribusi signifikan terhadap pasokan minyak nabati global. Kondisi iklim tropis yang mendukung serta ketersediaan lahan yang luas menjadikan Indonesia sebagai wilayah yang sangat potensial untuk pengembangan perkebunan kelapa sawit. Minyak kelapa sawit merupakan salah satu komoditas unggulan yang memiliki peranan penting dalam sektor industri, baik pangan maupun non-pangan. Indonesia sebagai salah satu produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia memiliki potensi besar dalam pengembangan dan pemanfaatan produk turunan minyak kelapa sawit bernilai tambah tinggi. Salah satu produk turunan yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang industri adalah asam palmitat (Wang dkk., 2023).

Palmitat merupakan asam lemak jenuh dengan jumlah atom karbon enam belas (C16:0) yang secara alami terkandung dalam minyak kelapa sawit dengan fraksi yang cukup tinggi. Sebagai bahan penyimpan energi termal, palmitat memiliki sifat fisik yang meliputi titik leleh sekitar 63-64°C dan titik beku yang sedikit lebih rendah, sekitar 60-61°C, menjadikannya efektif untuk aplikasi penyimpanan energi. Titik leleh dan titik beku yang relatif stabil ini memungkinkan palmitat untuk menyimpan dan melepaskan energi pada suhu yang sesuai dengan kebutuhan untuk pemanasan air. Kajian stabilitas termal menunjukkan bahwa palmitat memiliki kemampuan untuk mempertahankan kestabilan struktur kimianya pada suhu operasional yang berada di sekitar titik lelehnya, menjadikannya bahan yang menjanjikan sebagai PCM untuk aplikasi penyimpanan energi termal. Stabilitas termal palmitat yang tinggi juga mendukung keberlanjutan dan efisiensi dalam sistem pengaplikasiannya dimana energi matahari dapat disimpan dan digunakan saat diperlukan, mengoptimalkan kinerja sistem secara keseluruhan (Irsyad dkk., 2020).

1.2 Rumusan Masalah

Pengujian yang akan dilakukan penulis dengan menggunakan PCM material palmitat akan mengalami banyak siklus berulang-ulang yang akan berakibat pada karakteristik dari PCM.

1. Apakah material palmitat akan mengalami perubahan temperatur leleh dan temperatur pembekuan dari kondisi awalnya?
2. Apakah material palmitat akan mengalami perubahan karakteristik seperti panas latennya setelah dilakukan siklus berulang?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah pengujian T-history, DSC, dan densitas material palmitat.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik sifat PCM palmitat meliputi temperatur leleh temperatur beku, panas laten, serta kerapatan setelah melewati siklus peleahan dan pembekuan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini Adalah sebagai berikut :

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dan dapat menjadi bahan referensi, serta memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu sains dan teknologi. Penelitian ini juga diharapkan dapat memperkaya literatur dan pemahaman karakteristik material palmitat untuk mengetahui panas yang tersimpan pada *phase change material* untuk mencegah potensi panas yang terbuang.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pendahuluan

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

2. Tinjauan Pustaka

Bab ini berisikan landasan dari teori mengenai hal-hal yang berhubungan dengan penelitian seperti Perpindahan panas, *phase change materials* (PCM), sifat termal, penyimpanan energi termal, material palmitat dan sifatnya.

3. Metodologi Penelitian

Bab ini berisi hal-hal yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian, 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 disampaikan dari penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

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

7. Lampiran

Berisikan perlengkapan penelitian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

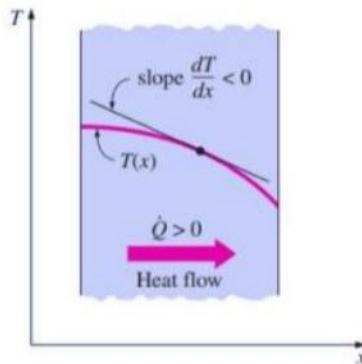
Panas adalah bentuk energi yang dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain, namun tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Perpindahan panas dapat terjadi secara langsung, di mana fluida panas bercampur langsung dengan fluida dingin tanpa penghalang, atau secara tidak langsung, di mana fluida panas dan dingin tidak saling bersentuhan tetapi dipisahkan oleh sekat pemisah. Perbedaan temperatur adalah faktor utama yang menyebabkan terjadinya perpindahan energi dalam bentuk panas, yang sering disebut sebagai perpindahan panas. Berdasarkan studi pustaka, terdapat tiga mekanisme utama dalam perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Selain itu, terdapat juga perpindahan panas yang terjadi melalui kombinasi dari ketiga mekanisme tersebut (Jamilah dkk., 2021).

Dalam praktiknya, sangat sulit untuk membuktikan bahwa perpindahan panas hanya terjadi melalui satu cara yang telah disebutkan sebelumnya. Perpindahan panas biasanya berlangsung secara bersamaan melalui berbagai mekanisme. Sebagai contoh, pada pipa steam yang terisolasi, perpindahan panas terjadi baik dari dinding dalam pipa ke permukaan isolasi maupun dari permukaan luar isolasi ke udara di sekitarnya. Proses perpindahan panas ini melibatkan konduksi, konveksi, radiasi secara bersamaan (Liawan dkk., 2023).

2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas terjadi ketika panas mengalir dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah, melalui medium pengantar panas yang tetap, tanpa

adanya pergerakan dari pengantar tersebut. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas secara konduksi berlangsung melalui benda padat. Berikut ini dapat dilihat kurva perpindahan panas konduksi yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perpindahan panas konduksi (Cengel, 2008)

Perpindahan panas secara konduksi dasar Hukum Fourier dapat dinyatakan dengan persamaan.

Dimana :

\dot{Q}_{cond} = Laju perpindahan panas (W)

k = Konduktivitas thermal W/(m·°C)

A = Luas penampang yang tegak lurus dengan arah laju perpindahan kalor (m^2)

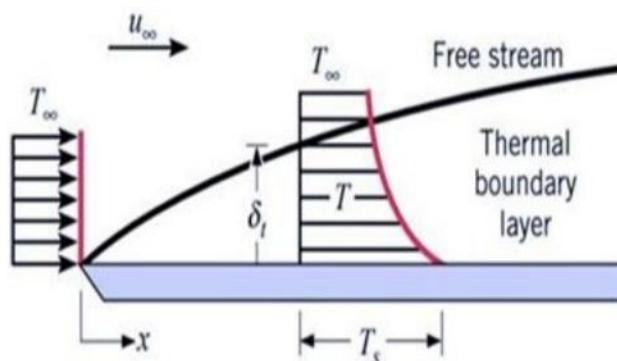
dt = Temperature (°C)

dx = Tebal (m)

2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah proses pemindahan panas antara permukaan padat dan fluida yang mengalir di sekitarnya, dengan menggunakan fluida (baik cairan maupun gas) sebagai media penghantar. Secara umum, perpindahan panas konveksi dibagi menjadi dua jenis: pertama, konveksi bebas, yang terjadi akibat

perbedaan kerapatan dan suhu tanpa adanya gaya eksternal yang mempengaruhi aliran fluida; kedua, konveksi paksa, yang terjadi ketika gaya eksternal atau tambahan mempengaruhi pergerakan fluida. Sebagai contoh, semakin cepat fluida bergerak, semakin besar pula laju perpindahan panas konveksi yang terjadi (Cengel, 2008). Berikut ini dapat dilihat kurva perpindahan panas konveksi yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perpindahan panas konveksi (Bergman, 2011)

Perpindahan panas secara konveksi pada sebuah benda diperlihatkan pada persamaan berikut:

Dimana :

\dot{Q}_{conv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)

T_s = Temperatur permukaan padat (°C)

T_f = Temperatur fluida yang jauh dari permukaan benda padat (°C)

2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan panas yang terjadi melalui gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan medium sebagai perantara. Dalam perpindahan panas radiasi, panas mengalir dari benda yang memiliki suhu tinggi ke benda yang memiliki suhu lebih rendah, meskipun benda-benda tersebut terpisah dalam ruang.

Radiasi termal adalah energi yang dipancarkan oleh materi yang memiliki suhu lebih dari nol, dan sebenarnya, perpindahan panas melalui radiasi dapat terjadi dengan sangat efisien di ruang hampa (Bergman, 2011). Panas radiasi dipancarkan oleh suatu benda dalam bentuk kumpulan energi terbatas yang disebut quanta. Contoh perpindahan panas radiasi terjadi pada panas matahari yang sampai permukaan bumi. Dengan rumus perpindahan panas secara radiasi adalah sebagai berikut:

Dimana

\dot{Q}_{rad}	= Laju perpindahan panas radiasi (W)
ε	= Koefisien Emisivitas ($0 < \varepsilon < 1$)
σ	= Konstanta Stefan-Bolzman $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m ² .K ⁴)
A	= Luas permukaan (m ²)
T ₁	= Suhu benda (°K)
T ₂	= Suhu Lingkungan (°K)

2.2 Sifat Termal Material

Material merupakan suatu zat atau kombinasi zat yang digunakan untuk tujuan tertentu dan memiliki karakteristik fisik, kimia, serta mekanik yang khas. Salah satu karakteristik penting material adalah sifat termal, yaitu kemampuan material dalam merespons perubahan temperatur akibat pemanasan maupun pendinginan. Sifat termal material sangat dipengaruhi oleh struktur internal, ikatan antar atom atau molekul, serta fase material (amorf, kristalin, atau semi-kristalin). Perbedaan struktur ini menyebabkan setiap material memiliki perilaku termal yang berbeda ketika dikenai energi panas (Hermanto, 2023).

Karakteristik suatu material yang berkaitan dengan respon material terhadap perubahan temperatur merupakan definisi dari sifat termal. Material dengan sifat termalnya berperan penting dalam menentukan aktivitas selama proses pemanasan maupun pendinginan, serta mempengaruhi stabilitas, ketahanan, dan performa material dalam aplikasi tertentu. Analisis sifat termal banyak digunakan untuk

mengetahui perubahan fase, reaksi kimia, dan stabilitas termal suatu material. Sifat termal material meliputi temperatur transisi gelas, temperatur leleh, temperatur kristalisasi, kapasitas panas, serta stabilitas termal. Sifat-sifat tersebut dapat dianalisis menggunakan berbagai metode analisis termal, salah satunya adalah *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Berikut ini dapat dilihat alat DSC-60 Plus yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Alat DSC-60 Plus
(Ermawati, 2022)

DSC merupakan metode analisis termal yang digunakan untuk mengukur perbedaan aliran panas antara sampel dan referensi sebagai fungsi temperatur atau waktu. Teknik ini banyak digunakan untuk menganalisis sifat termal material seperti T_g , T_m , T_c , dan perubahan entalpi. Keunggulan DSC terletak pada kemampuannya memberikan informasi kuantitatif dan kualitatif mengenai peristiwa termal dengan akurasi yang tinggi serta waktu analisis yang relatif singkat. Pada pengujian DSC, sampel dan referensi dipanaskan atau didinginkan secara bersamaan dengan laju temperatur yang terkontrol. Ketika sampel mengalami peristiwa termal, seperti transisi gelas, peleburan, atau kristalisasi, akan terjadi perbedaan aliran panas yang kemudian direkam sebagai kurva DSC (Janovszky dkk., 2022).

2.3 *Phase Change Materials (PCM)*

Material yang mengalami perubahan fasa, atau yang dikenal sebagai *Phase Change Materials* (PCM), merupakan bahan yang memiliki kemampuan untuk menyimpan dan melepaskan energi panas dalam jumlah besar tanpa menyebabkan perubahan

suhu yang signifikan dalam jangka waktu lama. Proses perubahan fasa ini dapat melibatkan transisi antara keadaan padat dan cair. Contoh umum PCM yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari meliputi asam lemak, minyak nabati, garam hidrat, dan palmitat, yang juga digunakan dalam pembuatan lilin. Ketika suhu meningkat, ikatan antar molekul PCM akan terputus, menyebabkan bahan tersebut meleleh atau berubah menjadi cair, suatu proses yang bersifat endotermik. Sebaliknya, saat suhu menurun, PCM akan membeku dan melepaskan panas selama proses pembekuan berlangsung, yang bersifat isotermik (Ariwibowo, 2022).

PCM merupakan salah satu metode penyimpanan energi panas yang paling efisien. Bahan ini dapat digunakan untuk menyimpan energi serta mengontrol suhu. PCM menarik perhatian karena memiliki kelebihan, yaitu rasio tinggi antara panas yang dilepaskan dan variasi suhu. Dibandingkan dengan bahan penyimpan energi konvensional seperti air atau batu, PCM mampu melepaskan panas hingga 4-5 kali lebih banyak per satuan volume. Keuntungan lainnya dari PCM adalah harga yang terjangkau, ketersediaan yang mudah, dan kemampuannya untuk digunakan secara berkelanjutan selama strukturnya tetap stabil. PCM memanfaatkan panas laten pada perubahan fasa untuk menyerap dan melepaskan panas, dengan jumlah energi yang diserap jauh lebih besar dibandingkan dengan panas sensibel.

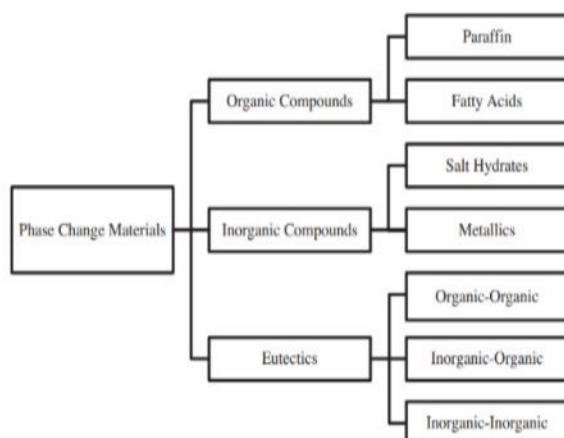
PCM memiliki sifat-fisik yaitu keseimbangan fasa, dimana stabilitas fase selama peleburan dan pembekuan akan menguntungkan dalam pengaturan temperatur penyimpan kalor. Kemudian massa jenis material yang tinggi, yang mana akan memperkecil ukuran dari bejana penampung. Serta perubahan volume yang kecil, dan tekanan penguapan yang rendah akan mengurangi masalah dalam penampungan. PCM juga memiliki sifat kimia yaitu tidak beracun dan tidak menimbulkan kebakaran (Nouban, 2017).

PCM memiliki dua karakteristik utama, yaitu densitas penyimpanan panas yang sangat tinggi dan kemampuan untuk menyimpan serta melepaskan panas dalam jumlah besar pada suhu yang konstan. Hal ini menjadikan PCM sebagai alternatif yang sangat baik untuk media penyimpanan panas dalam berbagai aplikasi. Selain

itu, PCM memiliki keuntungan dalam bekerja pada penurunan suhu yang kecil dan tekanan uap rendah selama suhu operasional. Beberapa sifat penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan PCM antara lain harga yang terjangkau, stabilitas kimia, dan sifat non-korosif.

2.4 Klasifikasi PCM

Berdasarkan perubahan fasanya, PCM dapat dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu padat-cair, cair-gas, dan padat-gas. Di antara ketiga jenis tersebut, PCM padat-cair adalah yang paling umum digunakan untuk penyimpanan energi panas. Secara umum, PCM padat-cair dibagi menjadi tiga kategori, yaitu PCM berbasis komposisi organik, anorganik, dan eutektik. Klasifikasi PCM organik, anorganik, dan eutektik dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Klasifikasi PCM
(Kulkarni dkk., 2021)

2.4.1 PCM Organik

Palm wax merupakan PCM organik berbasis minyak nabati yang tersusun dari campuran asam lemak jenuh dan ester asam lemak, seperti palmitat dan stearat. Palm wax menyimpan dan melepaskan energi panas melalui mekanisme kalor laten selama perubahan fase padat-cair, sehingga berpotensi digunakan sebagai material penyimpanan energi termal. Palm wax memiliki keunggulan berupa sifat ramah lingkungan, tidak beracun, serta berasal dari sumber terbarukan. Selain itu, material

ini menunjukkan stabilitas kimia yang cukup baik selama siklus pemanasan dan pendinginan. Namun, palm wax memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah dan rentang suhu leleh yang lebih lebar dibandingkan asam palmitat murni. Secara keseluruhan, palm wax dapat dikategorikan sebagai PCM organik yang dapat digunakan dalam sistem penyimpanan energi panas suhu rendah hingga menengah (Kamaruddin dkk., 2023).

2.4.2 PCM Anorganik

PCM anorganik diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu logam (*metallic*) dan garam hidrat, yang umumnya berasal dari garam alami yang ditemukan di laut, endapan mineral, atau sebagai hasil samping dari proses industri lainnya. PCM anorganik memiliki sejumlah keunggulan, seperti kapasitas panas laten volumetrik yang tinggi, konduktivitas termal yang lebih baik, performa fusi termal yang unggul, harga yang relatif rendah, ketersediaan yang melimpah, serta sifat yang tidak mudah terbakar. Namun demikian, kelemahan utama dari jenis PCM ini adalah potensi pendinginan super yang tinggi serta sifatnya yang korosif terhadap material lain.

2.4.3 PCM *Eutectic*

Eutectic merupakan komposisi minimum peleburan dari dua atau lebih komponen, melebur dan membeku secara sejalan membentuk campuran darkristal komponen selama proses kristalisasi. *Eutectic* dapat dikatakan juga gabungan antara dua material PCM atau lebih untuk menghasilkan material PCM baru. PCM eutectic dapat dibuat dengan menggabungkan antara material PCM *organic-organic*, dan *inorganic-inorganic*.

Agar dua material dapat digabungkan secara optimal dalam sistem PCM, diperlukan beberapa kriteria penting. Pertama, kedua material tersebut harus mampu membentuk campuran yang homogen tanpa terjadi pemisahan fasa. Kedua, kombinasi material tersebut perlu memiliki temperatur leleh dan beku yang serupa,

sehingga proses peleburan dan pembekuan dapat berlangsung secara bersamaan dan konsisten selama siklus perubahan fasa berlangsung. Jenis-jenis material PCM *eutectic* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis-jenis material PCM *eutectic*

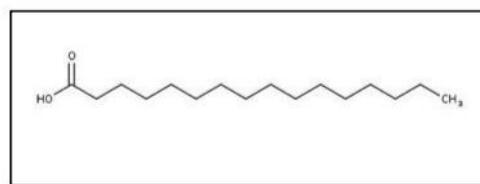
Nama	Komposisi (%)	Titik Leleh (°C)	Panas Laten (kJ/kg)
$C_{14}H_{28}O_2 + C_{10}H_{20}O_2$	34+66	24	147.7
$AlCl_3 + NaCl + ZrCl_2$	79+17+4	68	234
$AlCl_3 + NaCl + KCl$	66+20+14	70	209
$NH_2CONH_2 + NH_4Br$	66.6+33.4	76	151
$AlCl_3 + NaCl + KCl$	60+26+14	93	213
$AlCl_3 + NaCl$	66+34	93	213

2.5 *Palmitic Acid*

Palmitat disebut sebagai senyawa turunan dari asam palmitat (asam lemak jenuh dengan 16 atom karbon) yang sering ditemukan dalam bentuk ester, seperti metil palmitat atau etil palmitat. Senyawa ini banyak digunakan dalam industri kosmetik, farmasi, dan makanan karena sifat emolien dan kestabilannya. Dalam bidang energi dan material, palmitat juga digunakan sebagai material PCM karena memiliki titik leleh yang sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi termal, serta menunjukkan kestabilan termal dan kimia yang baik dalam siklus peleahan dan pembekuan berulang. Palmitat dari sumber nabati, seperti minyak sawit, menjadi pilihan populer karena bersifat terbarukan dan ramah lingkungan (Zainal dkk., 2020).

Palmitat terbentuk melalui proses biosintesis asam lemak di dalam tubuh, dimulai dari asetil-KoA yang diubah menjadi malonil-KoA dan kemudian dirangkai menjadi asam palmitat oleh enzim *fatty acid synthase*. Setelah terbentuk, asam palmitat dapat melepaskan proton dan menjadi palmitat (anion). Secara industri, palmitat diperoleh dari hidrolisis minyak nabati seperti minyak sawit, kemudian

dinetralkan menjadi bentuk garamnya (Apriani, 2020). Berikut dapat dilihat struktur kimia senyawa palmitat yang disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Senyawa Palmitat
(Mulyono, 2022)

Gambar diatas merupakan senyawa palmitat yang memiliki titik leleh umumnya berada pada kisaran 62–64°C, dengan titik beku yang sangat berdekatan, sekitar 60–63°C, tergantung pada kemurnian dan kondisi lingkungan. Bentuk ester seperti metil palmitat memiliki titik leleh yang lebih rendah, sekitar 30–35°C, sehingga cocok untuk aplikasi penyimpanan panas pada suhu rendah hingga sedang. Perbedaan kecil antara titik leleh dan titik beku disebabkan oleh fenomena *supercooling*, di mana cairan tetap dalam fase cair di bawah titik beku normalnya sebelum proses kristalisasi terjadi. Sifat ini sangat penting dalam pemilihan dan pengembangan palmitat sebagai bahan penyimpan energi termal yang efisien dan berulang (Mulyono, 2022).

Penggunaan palmitat sebagai penyimpan energi termal memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan yang dimiliki palmitat dapat memberikan keuntungan bagi pengguna, namun kekurangan dari penggunaannya bisa menjadi masalah yang perlu diatasi. Oleh karena itu, pemilihan material PCM sebagai penyimpanan energi termal perlu dipertimbangkan dengan cermat. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan palmitat sebagai penyimpan energi termal.

a. Kelebihan Palmitat

PCM palmitat memiliki beberapa kelebihan yaitu titik leleh yang stabil dan sesuai untuk aplikasi suhu rendah hingga sedang, kapasitas penyimpanan energi laten yang tinggi, serta stabilitas termal dan kimia yang baik selama siklus pencairan hingga pembekuan. Selain itu, palmitat memiliki sifat non-toksik, ramah lingkungan, dan dapat diperoleh dari sumber nabati seperti

minyak sawit, sehingga cocok digunakan sebagai material penyimpanan energi panas pada bangunan, sistem surya, dan perangkat elektronik (Isyanti, 2021)

b. Kekurangan Palmitat

Kekurangan yang dimiliki PCM palmitat tidak dapat diremehkan karena dapat merugikan pengguna seperti masalah *supercooling* yang dapat menghambat proses pembekuan dan mengurangi efisiensi pelepasan panas. Selain itu, konduktivitas termalnya relatif rendah, sehingga memerlukan tambahan material konduktif agar dapat mempercepat proses transfer panas. Palmitat juga dapat mengalami perubahan volume selama fase transisi, yang berpotensi menimbulkan tekanan pada wadah penyimpanan. Dalam penggunaan jangka panjang, beberapa jenis palmitat mungkin mengalami degradasi termal atau oksidasi jika tidak dilindungi dengan baik dari udara atau cahaya.

2.6 Sifat-sifat Palmitat

Sifat-sifat palmitat merupakan karakteristik fluida yang terdapat pada palmitat. Karakteristik tersebut dapat berupa masa jenis, panas spesifik, konduktivitas termal, panas laten hingga temperatur leleh palmitat. Beberapa sifat-sifat palmitat dijelaskan sebagai berikut.

a. Massa Jenis

Masa jenis yang dimiliki PCM palmitat dalam kondisi padat berkisar antara $0,85\text{--}0,88\text{ g/cm}^3$ pada suhu ruang. Dalam bentuk cair masa jenis PCM palmitat turun menjadi sekitar $0,80\text{--}0,82\text{ g/cm}^3$ pada suhu di atas titik lelehnya (sekitar 63°C). Penurunan ini mencerminkan adanya ekspansi volume saat senyawa tersebut mengalami transisi dari padat ke cair.

Perubahan massa jenis ini menjadi penting dalam desain sistem termal karena dapat mempengaruhi volume wadah, kapasitas penyimpanan panas, dan stabilitas struktural dari media penyimpanan PCM. Selain itu, untuk bentuk ester seperti metil palmitat, massa jenis umumnya sedikit lebih rendah

dibandingkan asam palmitat, yaitu sekitar $0,86 \text{ g/cm}^3$ pada suhu 25°C . Nilai-nilai ini perlu diperhatikan saat menentukan jumlah material yang dibutuhkan dan saat mengantisipasi perubahan volume yang terjadi selama siklus leleh-beku agar sistem tetap efisien dan aman (Widyasaputra dkk., 2022).

b. Panas Spesifik

Panas spesifik PCM palmitat dalam bentuk padat berkisar antara $2,1\text{--}2,5 \text{ J/g}\cdot\text{K}$, sedangkan dalam bentuk cair meningkat menjadi sekitar $2,8\text{--}3,0 \text{ J/g}\cdot\text{K}$. Perbedaan ini disebabkan oleh mobilitas molekul yang lebih tinggi dalam fase cair, yang memungkinkan penyimpanan energi panas lebih besar. Nilai panas spesifik ini penting dalam perhitungan energi total yang dapat disimpan atau dilepaskan oleh palmitat selain dari panas laten saat terjadi perubahan fasa, terutama dalam aplikasi sebagai material penyimpanan energi termal.

c. Panas Laten

Nilai panas laten lelehnya palmitat berkisar antara $190\text{--}210 \text{ J/g}$, menjadikannya salah PCM yang unggul dibandingkan PCM lainnya dalam material penyimpanan energi termal. Nilai panas laten yang tinggi memungkinkan palmitat menyimpan dan melepaskan energi dalam jumlah besar selama proses peleahan dan pembekuan, sehingga sangat efisien dalam aplikasi seperti sistem pendingin pasif, penyimpanan panas surya, dan pengatur suhu ruangan. Stabilitas termal dan kemampuan menyerap energi secara berulang juga menjadi alasan utama penggunaannya dalam berbagai teknologi energi berkelanjutan.

d. Konduktivitas termal

Konduktivitas termal palmitat merupakan kemampuan material untuk menghantarkan panas. Palmitat memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah, yaitu sekitar $0,2\text{--}0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ dalam fase padat maupun cair. Nilai ini tergolong rendah dibandingkan dengan logam atau bahan konduktif lainnya, sehingga dapat membatasi kecepatan perpindahan panas selama proses peleahan atau pembekuan. Oleh karena itu, dalam aplikasi sebagaimaterial

PCM, palmitat sering dikombinasikan dengan bahan aditif konduktif seperti serbuk logam, karbon, atau graphene untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Peningkatan konduktivitas termal ini penting agar palmitat dapat lebih cepat menyerap dan melepaskan energi panas dalam sistem penyimpanan energi termal yang berulang (Amin, 2016).

e. Temperatur leleh dan beku

Temperatur leleh palmitat merupakan perubahan dari padat menjadi cair dengan menyerap energi panas laten tanpa peningkatan suhu. Temperatur leleh palmitat umumnya berada pada kisaran 62–64°C, tergantung pada kemurnian dan kondisi lingkungan. Proses peleahan ini sangat penting dalam aplikasi material PCM, karena saat mencair, palmitat dapat menyimpan sejumlah besar energi panas yang dilepaskan kembali saat proses pembekuan. Stabilitas suhu leleh yang konsisten menjadikan palmitat efektif sebagai penyimpan energi termal pada aplikasi suhu menengah seperti pemanas pasif dan sistem penyimpanan panas surya.

Temperatur beku palmitat merupakan perubahan dari cair menjadi padat dengan melepaskan energi panas laten yang tersimpan. Temperatur beku asam palmitat biasanya berkisar antara 60–63°C, sedikit di bawah titik lelehnya karena adanya kemungkinan *supercooling*, yaitu kondisi di mana zat tetap cair di bawah titik beku normalnya sebelum mengkristal. Perbedaan kecil ini dapat memengaruhi efisiensi pelepasan energi dalam sistem termal. Oleh karena itu, dalam desain sistem PCM, stabilitas dan kesesuaian antara temperatur leleh dan beku sangat penting untuk memastikan performa termal yang optimal dan berulang (Astika dkk., 2021).

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berfokus pada analisis karakteristik perpindahan panas dari material perubahan fasa *Phase Change Material* (PCM), yaitu palmitat, yang digunakan dalam alat penukar panas sebagai media penyimpanan dan pelepasan kalor. Palmitat dipilih sebagai material pengujian karena harganya yang relatif murah, tersedia di seluruh indoneisa, dan sifat termal yang dimiliki cocok untuk sistem penyimpanan energi panas. Perangkat utama yang digunakan dalam studi ini adalah karakteristik PCM palmitat, di mana palmitat akan diuji untuk mengetahui tempratur leleh dan beku, panas laten, juga kerapatan pcm palmitat. Penelitian ini bersifat eksperimental, sehingga pelaksanaannya membutuhkan waktu dan lokasi tertentu untuk proses pengujian. Penjabaran mengenai waktu pelaksanaan, lokasi, serta aspek lain yang berkaitan dengan penelitian akan dijelaskan pada bagian berikutnya.

3.1 Tahap Penelitian

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

3.2 Fokus Penelitian

Adapun waktu pelaksanaannya dilakukan dari bulan Agustus sampai dengan bulan September. Adapun deskripsi penelitian dapat dilihat pada uraian berikut.

1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah mempelajari mengenai perpindahan panas, material berubah fasa, sifat termal, palmitat dan karakteristiknya.

2. Persiapan Alat

Pengujian Mempersiapkan alat pengujian dan bahan yang dibutuhkan seperti wadah penampung air panas-dingin, penyimpanan air, palmitat, dan lain sebagainya yang akan dijelaskan lebih rinci pada bagian alat dan bahan

3. Pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan.

4. Penulisan Laporan

Penulisan laporan merupakan tahapan akhir dari penelitian ini. Penulisan laporan ditujukan untuk melaporakan hasil penelitian yang telah dilakukan.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:
 - a. Pemanas air

Pemanas air yang digunakan adalah koil pemanas, dimana alat ini dipakai untuk menghangatkan air atau udara. Umumnya menggunakan listrik, koil pemanas berfungsi mirip dengan resistor besar, di mana ketika arus listrik mengalir melaluiinya, koil ini mulai memanas. Daya dari koil pemanas yang digunakan adalah 650 Watt. Kemudian, koil pemanas ini akan dihubungkan ke sumber listrik dan dicelupkan ke dalam air untuk memanaskan air hingga mencapai suhu tertentu. Pemanas air yang digunakan dapat dilihat seperti pada Gambar 6. berikut:



Gambar 6. Pemanas air

b. *Data Logger*

Data Logger berperan dalam mengambil pengukuran suhu pada palmitat, temperatur fluida yang masuk dan keluar, serta temperatur fluida yang masuk dan keluar dari tabung penyimpanan air. Fluktuasi suhu ini akan dicatat oleh *data logger* dan dapat diarsipkan dalam SD Card. *Data logger* yang digunakan dapat dilihat seperti pada Gambar 7. dan spesifikasi *data logger* disajikan pada Tabel 2.



Gambar 7. *Data logger*

Tabel 2. Spesifikasi *data logger*

Spesifikasi	Nilai
Merk	LU BTM-4208SD
Suhu min/max	-50° s/d 1300 °C
Record external	SD Card
Ketelitian	0,1° C
Maks. Input	12 Saluran

c. *Pompa air*

Pompa air ini berfungsi untuk mensirkulasi air untuk masuk dan keluar dari alat penukar kalor hingga perpindahan panas maksimal terjadi. Pompa air yang dipakai adalah pompa air akuarium, seperti yang terlihat pada Gambar 8 berikut:



Gambar 8. Pompa air

Pompa air yang dipakai adalah pompa Shimge ZPS 15-9-140, serta memiliki spesifikasi yang disajikan pada Tabel 3. berikut

Tabel 3. Spesifikasi pompa air

Spesifikasi	Nilai
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	¾ inch

d. *Water flow meter*

Water flow meter berfungsi mengukur debit fluida yang mengalir dari keluaran pompa ke alat penukar kalor, sehingga besar laju aliran massa fluida dapat diketahui. *Water flow meter* yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 9 berikut ini:



Gambar 9. *Water flow meter*

e. Arduino dan *solid state relay* (SSR)

Arduino dan SSR digunakan sebagai pengontrol suhu pada pengujian *T-history* untuk menjaga pemanasan tetap stabil dan terkontrol. Arduino membaca suhu dari sensor, membandingkannya dengan suhu target, lalu mengirim sinyal kendali ke SSR. SSR berfungsi sebagai saklar elektronik yang mengatur daya ke elemen pemanas bertegangan tinggi sesuai perintah Arduino. Kombinasi ini memungkinkan pengendalian suhu yang presisi, mengurangi fluktuasi, dan meningkatkan akurasi serta keandalan data pada pengujian *T-history* (Aulia dkk., 2024). Arduino dan SSR yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 10. berikut ini:



Gambar 10. Arduino dan SSR

f. Selang air

Dalam penelitian ini, digunakan selang air yang dirancang khusus untuk mengalirkan fluida dingin ataupun panas dalam rangka menghubungkan aliran fluida seperti yang tertera dalam skema pengujian. Jenis selang yang digunakan adalah *westpex* R dengan diameter 16 mm atau setara dengan 5/8 inch, dan mampu menahan suhu hingga 110°C. Dengan karakteristik ini, selang *westpex* untuk pipa menjadi pilihan yang andal dan efektif dalam mengatasi kebutuhan aliran fluida pada berbagai sistem perpipaan sebagaimana terlihat pada Gambar 11 di bawah ini:



Gambar 11. Selang air

g. Katup air

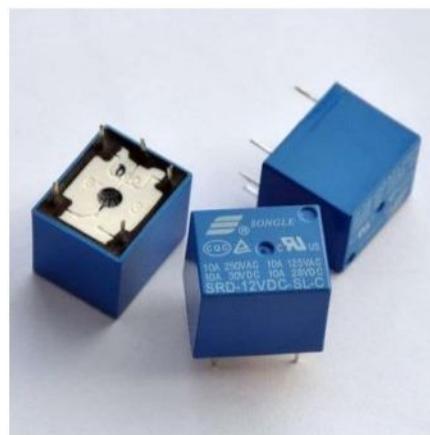
Katup air berfungsi mengontrol jumlah fluida yang mengalir seperti memperbesar dan memperkecil serta memutus aliran fluida dengan cara memutar pegangannya. penelitian ini menggunakan keran air sistem putar yang di dalamnya terdapat bola sebagai penutup seperti terlihat pada Gambar 12 berikut ini:



Gambar 12. Katup air

h. Relay 10 ampere

Relay 10 ampere pada pengujian *T-history* digunakan sebagai saklar untuk menghubungkan dan memutus daya listrik ke elemen pemanas sesuai perintah sistem kontrol. Relay ini mampu menangani arus pemanas pada pengujian *t-history* serta memisahkan rangkaian kontrol dan daya, sehingga pemanasan dapat berlangsung aman, stabil, dan terkendali untuk memperoleh data suhu yang akurat. Relay 10 ampere yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 13. berikut ini:



Gambar 13. Relay 10 ampere

i. Max 6675 dan termocople

Pada pengujian ini termokopel digunakan sebagai sensor untuk mengukur suhu sampel PCM dan referensi secara langsung, sedangkan MAX6675 berfungsi sebagai modul penguat dan konverter sinyal dari termokopel agar dapat dibaca oleh mikrokontroler. Termokopel menghasilkan tegangan sangat kecil yang sebanding dengan suhu, sehingga MAX6675 diperlukan untuk melakukan penguatan sinyal, kompensasi sambungan dingin (*cold junction compensation*), dan konversi analog ke digital. Data suhu digital dari MAX6675 kemudian dikirim ke Arduino untuk pencatatan dan analisis perubahan suhu terhadap waktu. Kombinasi termokopel dan MAX6675 memungkinkan pengukuran suhu yang akurat, stabil, dan respons cepat, yang sangat penting untuk menentukan karakteristik termal PCM selama proses pemanasan dan pendinginan pada pengujian *T-history* (Prastyadi dkk., 2023). Max 6675 dan termocople yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 14. berikut ini:



Gambar 14. Max 6675 dan termocople

j. Wadah penampung air

Wadah penampung air digunakan sebagai penampung air dengan suhu normal sebelum air memasuki wadah sirkulasi yang berisi pcm dalam tabung reaksi. Air dalam wadah penampung akan mengalir ke wadah sirkulasi ketika pompa hidup setelah proses pelelehan selesai dan memasuki proses pembekuan. Wadah ini akan terus terisi air selama proses pengujian *t-history* berlangsung. Wadah penampung air yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 15. berikut ini:



Gambar 15. Wadah penampung air

k. Wadah sirkulasi

Wadah sirkulasi berfungsi sebagai tempat berlangsung sirkulasi pertukaran air selama proses pengujian *t-history* berlangsung. Wadah ini berisi *heater*, termocouple dan juga tabung reaksi yang berisi pcm. Ukuran wadah ini dapat menampung air sebanyak 4 liter dan berbahan akrilik tebal yang dapat menahan suhu panas air hingga 80°C. Wadah sirkulasi yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 16. berikut ini:



Gambar 16. Wadah sirkulasi

l. Tabung reaksi

Tabung reaksi yang digunakan memiliki bentuk silinder kecil berukuran 10ml. Penggunaan tabung reaksi sebagai wadah PCM pada pengujian *T-history* dipilih karena terbuat dari kaca yang bersifat inert dan memiliki konduktivitas termal yang cukup baik memungkinkan proses perpindahan panas berlangsung secara merata. Penggunaan tabung reaksi juga memudahkan pemasangan sensor suhu, seperti termokopel, secara tepat di dalam PCM dan berperan penting dalam menjamin ketelitian hasil pengujian *T-history* PCM. Tabung reaksi yang

digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 17. berikut ini:



Gambar 17. Tabung reaksi

m. Neraca Analitik

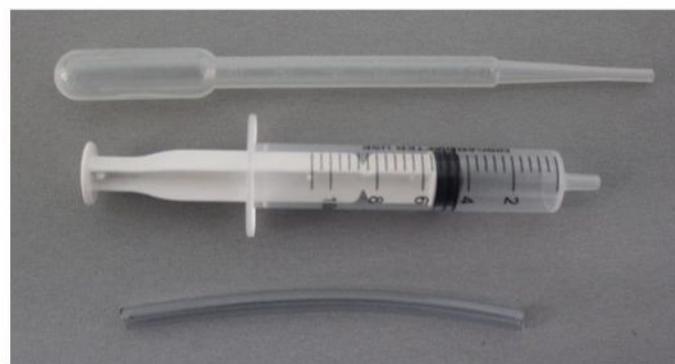
Alat ini digunakan untuk menimbang massa dengan hasil yang presisi dan akurat. Neraca analitik sangat cocok digunakan pada pengujian densitas karena nilai densitas pada massa sampel yang dihitung lebih konsisten dan valid. Neraca analitik yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 18. berikut ini:



Gambar 18. Neraca Analitik

n. Pipet/syringe

Alat ini digunakan sebagai alat bantu untuk menambahkan dan membuang fluida cair pem palmitat yang akan dimasukan ke dalam tabung reaksi. Pipet/syringe sangat membantu dalam meminimalisir adanya gelembung udara yang masuk karena densitas yang terukur nantinya akan lebih rendah dari seharusnya. Pipet/syringe yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 19. berikut ini:



Gambar 19. Pipet/syringe

o. Pipa air

Pipa air digunakan untuk menyalurkan air masuk dan keluar pada pengujian *t-history*. Jenis pipa yang digunakan adalah pipa PVC yang memiliki kelebihan tidak berkarat, tahan korosi, mudah ditemukan dan harganya yang terjangkau. Pipa air yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 20. berikut ini:



Gambar 20.Pipa air

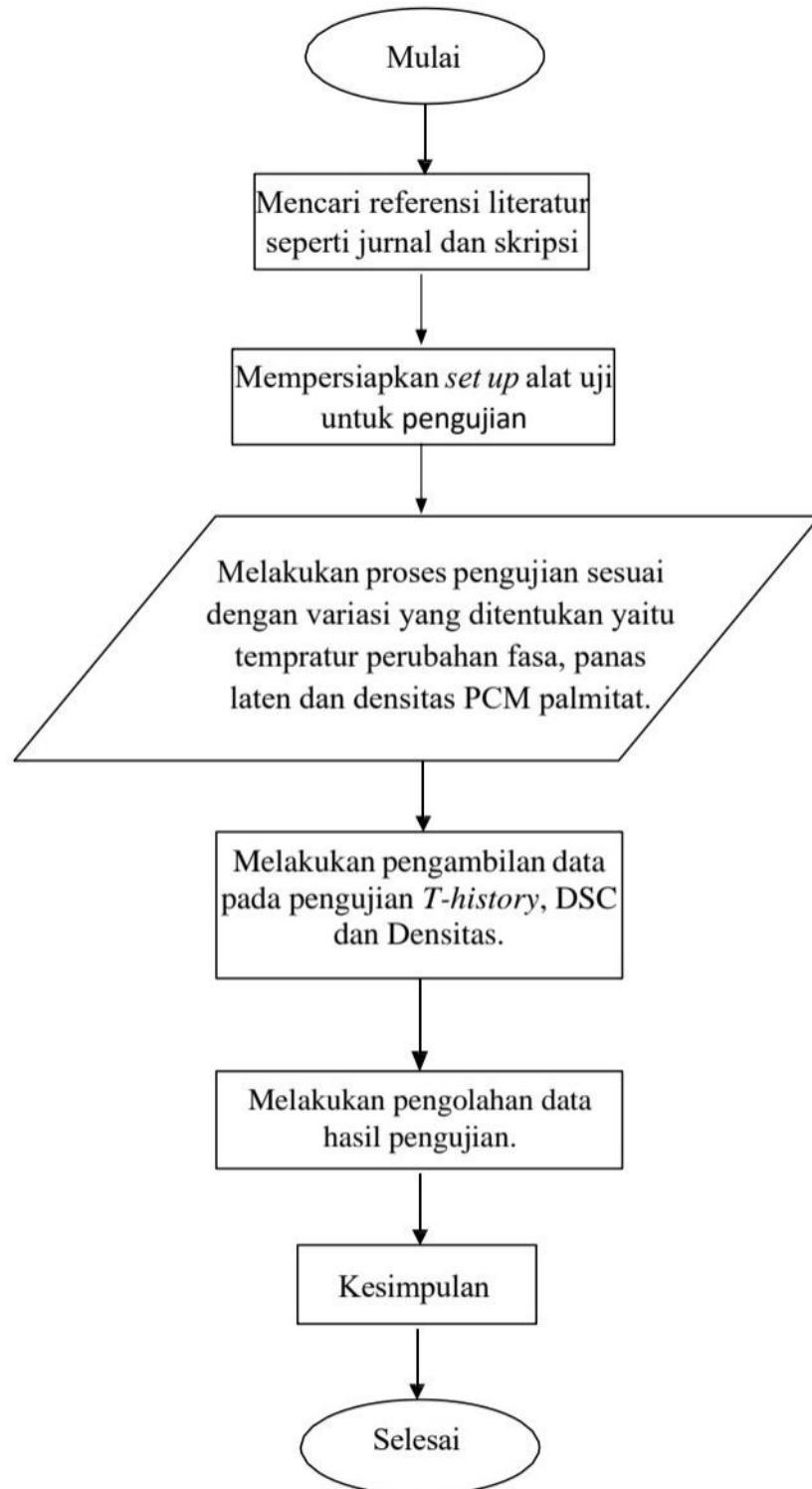
2. Bahan

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah air dan *Palmitic Acid*. Air disirkulasikan oleh pompa dari penampungan air menuju alat penukar kalor kemudian kembali ke penampungan air. *Palmitic Acid* sebagai material berubah fasa yang digunakan berjenis padat yang kemudian diletakkan di dalam tabung lalu akan mengalami peleahan dan pembekuan secara berkala selama proses pengujian. *Palmitic acid* yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 21. berikut ini:



Gambar 21. *Palmitic Acid*

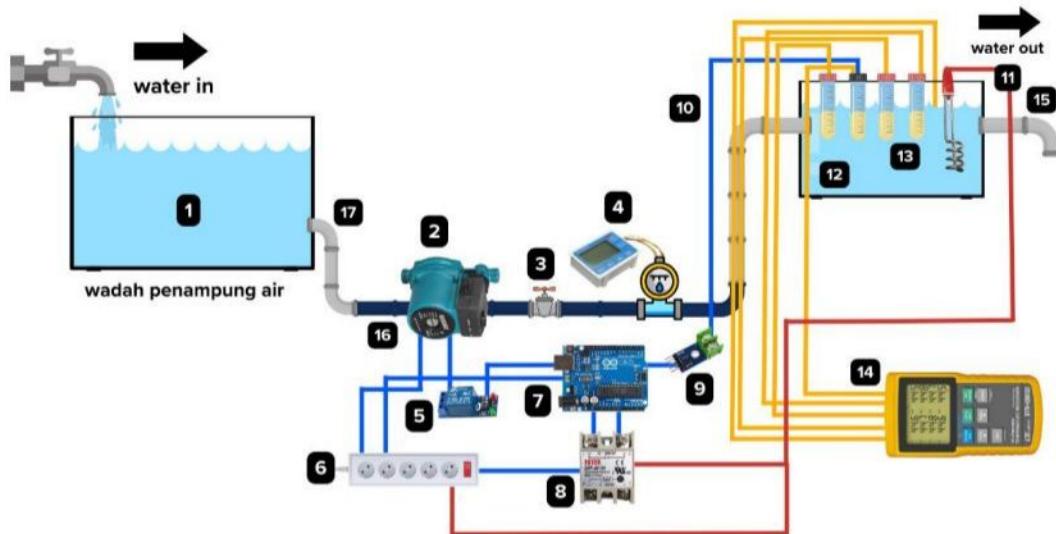
3.4 Diagram Alir



Gambar 22. Diagram alir penelitian

3.5 Skema Pengujian

Skema pengujian dalam penelitian ini dapat dilihat dalam bentuk instalasi alat pada Gambar 23 berikut:



Gambar 23. Instalasi alat pengujian

Keterangan :

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. Sumber air dan tangki | 10. <i>Thermocouple</i> |
| 2. Pompa | 11. <i>Heater</i> |
| 3. Katup | 12. Wadah sirkulasi |
| 4. <i>Flowmeter</i> | 13. Tabung reaksi |
| 5. Relay 10 A | 14. <i>Data logger</i> |
| 6. Sumber listrik | 15. Keluar air panas |
| 7. Pengontrol arduino | 16. Selang air |
| 8. SSR | 17. Pipa air |

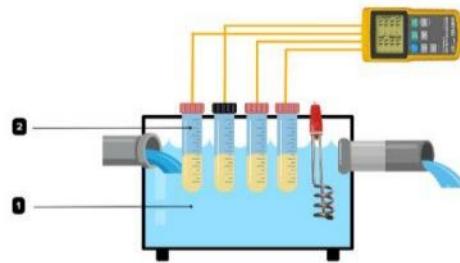
Penelitian ini dilakukan skema pengujian yang dimulai dari palmitat masih dalam bentuk padat kemudian dicairkan dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi lalu dilakukan penimbangan agar ke tiga tabung reaksi memiliki selisih yang sangat kecil. PCM palmitat akan mengalami siklus bergantian yaitu peleahan dan pembekuan. Proses peleahan diawali dengan fluida berupa air dipanaskan di dalam

wadah sirkulasi yang akan mencairkan PCM palmitat. Ketika aliran proses peleahan dihentikan fluida dingin dialirkan untuk mendinginkan palmitat hingga palmitat berubah fase menjadi padat. Kecepatan aliran air dikontrol menggunakan katup air serta kecepatan alirannya dilihat melalui *water flow meter* sensor serta temperatur air dapat diketahui dengan *thermocouple* dan data logger.

3.6 Penempatan Titik Pengukuran

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air menggunakan *water flow meter*. Termokopel digunakan untuk melakukan pengukuran temperatur. Pengujian diawali dengan penggunaan kontrol otomatis berupa arduino sebagai kontrol hidup dan mati pada alat pemanas dan pompa yang dimana pemanas dilengkapi dengan SSR dan pompa dilengkapi dengan relay 10A. Proses pemanasan terjadi saat temperatur PCM berada di bawah 35°C membuat sensor arduino dan SSR mengaktifkan *heater* untuk mulai memanaskan PCM hingga suhu 75°C.

Kemudian setelah proses pemanasan sensor arduino dan SSR akan mematikan *heater* dan menghidupkan pompa untuk melakukan proses pendinginan dari suhu 75°C hingga mencapai suhu 35°C. Selama proses pendinginan tersebut pompa akan mengalirkan air dingin dan air panas hasil dari proses pemanasan akan dibuang keluar. Pengambilan data temperatur dilakukan persiklus dengan menggunakan data *logger*. Percobaan dilakukan sebanyak 600 siklus dengan waktu 8 menit/siklus. Keterangan letak pengukuran dapat dilihat pada gambar 24 berikut ini:



Gambar 24. Penempatan titik pengukuran

Keterangan:

1. Air dalam wadah
2. Wadah palmitat

3.7 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.7.1 Prosedur pengujian *T-history*

Metode pengambilan data pengujian temperatur *T-history* yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pemanas air, pompa air, *thermocouple*, data *logger*, *water flow meter*, arduino dan SSR, selang pipa, relay 10 ampere, max 6675 dan termokopel, wadah penampung air, wadah sirkulasi, selang air, pipa air, katup air, tabung reaksi, fluida cair (air) dan PCM palmitat.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Mengisi tabung reaksi dengan sampel cair (PCM palmitat) menggunakan pipet atau syringe hingga mencapai ± 6 mL kemudian tutup dengan rapat.
4. Menghidupkan data logger kemudian menyambungkan kabel ekstansi CH1 data logger ke *thermocouple* yang sudah terpasang pada material palmitat di dalam tabung reaksi, kemudian kabel ekstansi CH2, CH3, CH4 disambungkan

- pada tabung reaksi yang berisi PCM palmitat dan menyambungkan kabel ekstansi CH5 pada temperatur fluida di dalam wadah sirkulasi berisi palmitat,
5. Memanaskan air yang berada pada wadah sirkulasi hingga temperatur 75°C.
 6. Menghidupkan secara otomatis pompa air.
 7. Melakukan seting pada kontrol temperatur untuk mengatur saat temperature 35 °C *heater* hidup dan kondisi pompa air mati, kemudian saat temperatur 75°C *heater* mati selanjutnya pompa air hidup untuk melakukan sirkulasi pendinginan sampai palmitat mencapai temperatur 35 °C. Proses peleahan dan pembekuan terhitung dalam satu siklus sistem. Sirkulasi air dingin dimulai dari wadah penampung air yang mengalirkan air dingin dengan pompa melalui selang menuju wadah sirkulasi berisi palmitat yang telah mencair di dalam tabung reaksi kemudian air yang telah bersirkulasi (air panas) di dalam wadah sirkulasi akan dibuang keluar melalui selang pembuangan supaya yang sudah bersirkulasi (air panas) tidak berpengaruh terhadap temperature pada saat proses pendinginan terjadi.
 8. Merekam data perubahan temperatur pada data *logger* setiap 10 detik sebagai rentang perubahan fasa peleahan dan pembekuan material palmitat.
 8. Menghidupkan *water flow* meter sensor untuk melihat kecepatan aliran air dingin.
 9. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air atau pada kecepatan 1,5 l/min.
 10. Biarkan air bersiklus hingga temperatur air di dalam tempat penampung air mengalami pemanasan optimal dari palmitat yang menyimpan panas dengan memantau perubahan fasa pada siklus 200, 400 hingga 600 siklus.
 11. Memasukkan data hasil rekaman data logger kedalam Ms. Excel.
 12. Melakukan perbandingan antara beberapa siklus.
 13. Membuat hasil Kesimpulan dari data yang didapat.
 14. Pengujian DSC dan Densitas.
 15. Selesai.

Pengambilan data ini dilakukan secara langsung dengan melakukan eksperimen pada wadah berisi palmitat di dalam tabung reaksi. Sebelum air dialirkan ke alat uji, kita harus menentukan kecepatan aliran air dan temperatur

air yang akan digunakan untuk penelitian. Setelah air pada tempat penampung mencapai temperatur yang diinginkan dan sudah konstan, kemudian air tersebut dialirkan ke kedalam wadah penampung utama berisi palmitat. Untuk mengetahui temperatur pada palmitat dan juga air menggunakan *thermocouple*, serta untuk mengetahui kecepatan aliran air digunakan *flow meter*, sehingga akan didapatkan data data yang diperlukan.

3.7.2 Prosedur pengujian *Differential Sceanning Calorimetry (DSC)*

Pengujian ini dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Mempersiapkan alat dan menghidupkan unit catu daya utama (UPS).
2. Menghidupkan komputer, *stepdown transformer* dan perangkat antarmuka *thermal analyzer*.
3. Menghidupkan alat DSC-60Plus dan *Flow Control Unit*,
4. Memastikan tombol-tombol *Purge* dalam keadaan “close” dan kran regulator gas pada posisi “open”.
5. Menjalankan software “TA-60WS *Collection Monitor*” yang terdapat pada desktop. Setelah muncul jendela “detector” kemudian memilih “DSC-60”. Menutup jendela “detector” dan membiarkan jendela “TA Acquisition” terbuka.
6. Menyiapkan dua buah pan sampel sesuai jenis sampel yang akan diuji (padat/cair). Salah satu pan digunakan sebagai referensi dan yang lain untuk sampel.
7. Menyiapkan plastik ctik untuk wadah pan sampel yang akan diuji dan memberi label kode sampel.
8. Menimbang sampel yang akan diuji sesuai kapasitas volume pan menggunakan timbangan mikro atau semi mikro dan menulis hasilnya pada label plastik.
9. Memasukkan sampel ke dalam pan lalu *crimping/sealing* dengan alat SSC-30, kecuali jenis pan tertentu yang tidak diizinkan untuk di-*crimp/seal*.
10. Membuka penutup *cell* pada alat DSC-60, berikut kedua penutup *furnace*.
11. Menempatkan pan kosong/*reference* pada plat *detector* sebelah kiri dan pan sampel pada plat detektor sebelah kanan.

12. Memasang kembali penutup *furnace* dan penutup *cell*.
13. Membuka setting parameter pada jendela “TA Acquisition” dan mengatur program temperatur sesuai yang ditentukan customer atau sesuai referensi yang ada.
14. Melengkapi informasi terkait sampel yang akan discan pada “*file information*”.
15. Menekan tombol “*START*” pada toolbar lalu mengisi nama file secara spesifik dan memilih folder tempat menyimpan file hasil scan. Kemudian menekan tombol start untuk memulai *scanning*.
16. Memeriksa dan memastikan laju alir gas pada *flow control* unit sesuai dengan yang telah diset.
17. Menunggu proses scan selesai hingga temperatur *furnace* kurang dari 50 °C.
18. Membuka *furnace* cover dan ambil kedua pan.
19. Menutup *furnace* cover dan menjalankan operasi “*cleaning*” untuk membersihkan plat detektor.
20. Menunggu *furnace* turun mencapai temperatur kamar (25 °C).
21. Menjalankan *software* “TA60” dari desktop.
22. Membuka file yang akan dianalisis.
23. Melakukan analisis sesuai buku petunjuk teknis analisis.
24. Menyiapkan file hasil analisis dengan nama baru yang sesuai.
25. Selesai

3.7.3 Prosedur Pengujian Densitas

Adapun prosedur pengujian densitas yang dilakukan secara mandiri oleh penulis di laboratorium termodinamika adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan berupa tabung reaksi kosong 10 mL, sampel cair (PCM palmitat) yang akan melalui pengujian *t-history*, neraca analitik dan pipet atau syringe.
2. Memastikan neraca analitik dalam kondisi stabil dan telah dikalibrasi sebelum digunakan.
3. Menimbang tabung reaksi kosong 10 mL menggunakan neraca analitik, lalu mencatat massa tabung tersebut.

4. Mengisi tabung reaksi dengan sampel cair (PCM palmitat) menggunakan pipet atau syringe hingga mencapai ± 6 mL kemudian tutup dengan rapat.
5. Menimbang kembali tabung reaksi yang sudah berisi PCM palmitat menggunakan neraca analitik, lalu mencatat massa tabung tersebut.
6. Membaca dan mencatat volume tabung pada posisi meniskus bawah sejajar dengan mata. Proses ini dilakukan pada siklus 0, 200, 400, dan 600 pada saat pengujian *t-history*.
7. Menghitung massa total (*m* isi) dengan cara mengurangkan massa tabung berisi PCM palmitat dengan massa tabung kosong.
8. Menghitung densitas sampel dengan rumus:

$$\rho = \frac{m (g)}{V (mL)} \quad (3.1)$$

dimana ρ dalam g/cm³.

9. Pengujian selesai.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai karakteristik kestabilan termal *palmitic acid* sebagai *Phase Change Material* (PCM) untuk penyimpanan energi termal, dapat diketahui bahwa tempratur leleh pada proses pelehan mengalami penurunan sebesar 20,17J/g atau sebanyak 8,7% dan juga terjadi penurunan panas laten sebesar 1,18°C atau sebanyak 1,9%. Tempratur pembekuan selama proses pembekuan juga mengalami penurunan sebesar 15,41J/g atau sebanyak 6,4% dan mengalami penurunan panas laten pada proses pembekuan sebesar 0,66°C atau sebanyak 1,26%. Nilai kerapatan PCM palmitat pada pengujian densitas menunjukkan penurunan sebesar 0,01 g/cm³ atau sebanyak 1,3%. Penurunan yang terjadi tergolong stabil dan masih dalam batas wajar selama penurunan tidak disertai degradasi yang berlebih, menandakan bahwa PCM aman dan layak untuk digunakan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk melanjutkan penelitian yaitu, sebagai berikut;

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM palmitat.
2. Pengujian dengan jumlah siklus termal yang lebih besar perlu dilakukan untuk mengetahui umur pakai material.
3. Pengembangan palmitat dalam bentuk komposit atau enkapsulasi perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan kinerjanya

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M., & Putra, N. (2016). Karakterisasi Phase Change Material (PCM) Lokal Indonesia. *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XV 2016*, 15, 539–545. <http://prosiding.bkstm.org/prosiding/seminar/2016>
- Apriani, Y. (2020). Pengaruh Penambahan Asam Palmitat pada Karakteristik Edible Film dari Tepung Pati Biji Melinjo (*Gnetum gnemon* L.) sebagai Penghambat Laju Transmisi Uap Air. *Skripsi*, 1–57.
- Ariwibowo, A., & Irsyad, M. (2022). *An Experimental Study of the Use of Coconut Oil-based PCM to Reduce the Thermal Load of Air Conditioners as an Effort to Save Energy Kajian Eksperimental Penggunaan PCM Berbasis Minyak Kelapa untuk Mengurangi Beban Termal AC Sebagai Upaya Penghematan Ener.* 1, 35–44.
- 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), 16. <https://doi.org/10.29303/dtm.v11i1.364>
- Aulia, V., Pakorong, M., & Ali, P. H. C. (2024). Design of an Arduino-Based Inverse Type Overcurrent Relay. *MITOR : Jurnal Teknik Elektro*, 310–317. <https://doi.org/10.23917/emitor.v25i3.13676>
- Ayyagari, V., Shooshtari, A., & Ohadi, M. (2025). Glauber's Salt Composites for HVAC Applications: A Study on the Use of the T-History Method with a Modified Data Evaluation Methodology. *Materials*, 18(13). <https://doi.org/10.3390/ma18132998>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Introduction to Heat Transfer*.
- Cengel, Y. A. (2008). Heat Transference a Practical Approach. *MacGraw-Hill*, 4(9), 874.
- Edy Mulyono, M. (2022). Kajian Teknologi Kristalisasi Fraksional Pada Produksi Minyak Sawit Merah Tinggi Oleat-Rendah Palmitat. *WARTA Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, 27(1), 9–20. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v27i1.63>
- Ermawati, F. U. (2022). Phase Formation, Structural, and Microstructural

- Characterizations of Ilmenite FeTiO₃Nanopowder Prepared from Liquid-Mixing Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2392(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2392/1/012022>
- Fanani Zainal, Panangan A, & Apriyani N. (2020). Uji Kualitas Sabun Padat Transparan Dari Minyak Kelapa Dan Minyak Kelapa Sawit Dengan Antioksidan Ekstrak Likopen Buah Tomat. *Jurnal Penelitian Sains*, 3(3), 108–118.
- Firmansyah, A. F., Gunawan, A. I., Sulistijono, I. A., & Hanurawan, D. (2022). Pengukuran Nilai Densitas pada Minyak Pelumas Sepeda Motor dengan Gelombang Ultrasonik. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 18(1). <https://doi.org/10.17529/jre.v18i1.24919>
- Hermanto, J., & Waluyo, J. (2023). Simulasi Numerik Karakterisasi Solar Water Heater Sistem Aktif Dengan Variasi Jumlah Kapsul. *Prosiding Simposium Nasional Multidisiplin (Sinamu)*, 4, 88. <https://doi.org/10.31000/sinamu.v4i1.7879>
- Irsyad, M., Amrizal, A., Yulian, A. M., & Susila, M. D. (2020). Karakteristik Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Tipe Staggered Fins Berisi Material Fasa Berubah dari Minyak Kelapa pada Proses Pembekuan. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(2), 159–164. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2020.011.02.3>
- Isyanti, M., & D. Sirait, S. (2021). Fraksinasi Asam Laurat, Short Chain Triglyceride (SCT) dan Medium Chain Triglyceride (MCT) dari Minyak Kelapa Murni. *Warta Industri Hasil Pertanian*, 38(2), 160. <https://doi.org/10.32765/wartaihp.v38i2.7455>
- Jamilah, J. J., Oktavia, F. R., & Nafita, S. W. (2021). Pengaruh Material yang Berbeda Terhadap Laju Perpindahan Panas. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Terapannya (JUPITER)*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.31851/jupiter.v3i1.5979>
- Janovszky, D., Sveda, M., Sycheva, A., Kristaly, F., Zámborszky, F., Koziel, T., Bala, P., Czel, G., & Kaptay, G. (2022). Amorphous alloys and differential scanning calorimetry (DSC). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(13), 7141–7157. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11054-0>
- Kamaruddin, Z. H., Jumaidin, R., Kamaruddin, Z. H., Asyraf, M. R. M., Razman, M. R., & Khan, T. (2023). Effect of Cymbopogon citratus Fibre on Physical and Impact Properties of Thermoplastic Cassava Starch/Palm Wax Composites. *Polymers*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/polym15102364>
- Kulkarni, A., Saxena, R., & Tiwari, S. (2021). Phase Change Materials and Its Applications. *Energy Systems in Electrical Engineering, Part F*2133(1), 311–340. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6456-1_13
- Liawan, J. P., Tanujaya, H., & Darmawan, S. (2023). Analisis Aliran Udara dan

- Kenyamanan Termal di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD). *Jurnal Asiimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, 5, 123–134. <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v5i1.3122>
- Nouban, F., & Abazid, M. (2017). Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from Nouban, F. and Abazid, M. (2017) ‘Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from local landfill soil in Medan’, *Iopscience.Iop.Org*, 8(February). *Iopscience.Iop.Org*, 8(February 2018), 68–74. <https://doi.org/10.1088/1755-1315>
- Prastyadi, C., Utomo, B., Ariswati, H. G., Titisari, D., Sumber, S., & Kumar, A. S. (2023). Eight Channel Temperature Monitoring using Thermocouple Sensors (type K) Based on Internet of Thing using ThinkSpeak Platform. *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, 5(1), 33–38. <https://doi.org/10.35882/jeeemi.v5i1.276>
- Purba, W., & Dwi, A. (2021). Indonesia Dalam Ekspor Kelapa Sawit Ke. *Jurnal FISK*, 2(1), 133–140.
- Sumartini, S., Hasibuan, N. E., & Gurusmatika, S. (2021). Karakteristik Thermal Shortening Minyak Biji Karet, Minyak Ikan, dan Stearin Sawit Menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC). *Jurnal Agritechno*, 14(01), 26–35. <https://doi.org/10.20956/at.v14i1.400>
- Wang, X., Zhang, C., & Bao, N. (2023). Molecular mechanism of palmitic acid and its derivatives in tumor progression. *Frontiers in Oncology*, 13(August), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1224125>
- Widyasaputra, R., Bimantio, M. P., Oktavianty, H., Ruswanto, A., & Ngatirah. (2022). Karakteristik Viskositas Dan Titik Leleh Pada Campuran Minyak Sawit Merah Dan Minyak Jagung. *Prosiding Seminar Nasional Instiper*, 1(1), 225–232. <https://doi.org/10.55180/pro.v1i1.258>