

**KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL MATERIAL PARAFIN WAX
SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA DENGAN *MELTING POINT*
58°C**

SKRIPSI

Oleh:

ARDIKA KUSUMA

2115021023



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL MATERIAL PARAFIN *WAX*
SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA DENGAN *MELTING POINT*
58°C**

**Oleh:
ARDIKA KUSUMA**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
Sarjana Teknik**

Pada

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

KARAKTERISTIK KESTABILAN TERMAL MATERIAL PARAFIN *WAX* SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA DENGAN *MELTING POINT*

58°C

oleh

ARDIKA KUSUMA

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik termal parafin sebagai *Phase Change Material* (PCM) melalui pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), *T-History*, analisis konduktivitas termal, serta karakterisasi kimia menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Pengujian dilakukan menggunakan metode siklus termal dipercepat *accelerated thermal cycling* dimana 600 siklus laboratorium ekuivalen dengan 600 hari penggunaan pada kondisi aplikasi nyata *solar water heater*. Pendekatan ini digunakan untuk memahami stabilitas jangka panjang parafin sebagai penyimpan panas laten. DSC menunjukkan bahwa pada siklus ke 0 proses pelelehan terjadi pada temperatur *onset peak endset* dengan panas laten 142,77 J/g. Setelah 600 siklus percepatan dengan panas laten menurun menjadi 126,02 J/g. Pada fase pembekuan siklus 0 menghasilkan panas laten 139,25 J/g sedangkan pada siklus 600 nilai panas laten menjadi 147,55 J/g. Pengujian ini menggunakan 3 sampel yaitu siklus 0, 200, 400, dan 600. Metode *T-History* hingga 25 siklus pertama memperlihatkan kurva pemanasan-pendinginan yang stabil.

Kata kunci: Parafin, *Phase Change Material*, *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), panas laten, siklus termal.

ABSTRACT

THERMAL STABILITY CHARACTERISTICS OF PARAFFIN WAX AS A PHASE CHANGE MATERIAL WITH A MELTING POINT OF 58 °C

By

ARDIKA KUSUMA

This study aims to evaluate the thermal characteristics of paraffin wax as a Phase Change Material (PCM) through Differential Scanning Calorimetry (DSC), T-History analysis, thermal conductivity measurement, and chemical characterization using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The experiments were conducted using an accelerated thermal cycling method, in which 600 laboratory cycles are equivalent to approximately 600 days of operation under real solar water heater applications. This approach was used to assess the long-term stability of paraffin as a latent heat storage material. DSC results show that at cycle 0, the melting process occurs at the onset–peak–endset temperatures with a latent heat of 142.77 J/g. After 600 accelerated cycles, the latent heat decreased to 126.02 J/g. In the solidification phase, cycle 0 produced a latent heat of 139.25 J/g, whereas cycle 600 showed an increased latent heat of 147.55 J/g. The accelerated cycling test was conducted using four samples at cycle 0, 200, 400, and 600. The T-History method up to the first 25 cycles demonstrated stable heating–cooling curves without significant deviation.

Keywords: *Paraffin, Phase Change Material, Differential Scanning Calorimetry (DSC), latent heat, thermal cycling.*

Judul Skripsi

**KARAKTERISTIK KESETABILAN
TERMAL MATERIAL PARAFIN WAX
SEBAGAI MATERIAL BERUBAH FASA
DENGAN MELTING POINT 58 °C**

Nama Mahasiswa

: Ardika Kusuma

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115021023

Program Studi

: S-1 Teknik Mesin

Jurusan

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

Pembimbing I

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

Pembimbing II

Hadi Prayitno, S.T., M.T.
NIP. 198805142019031012

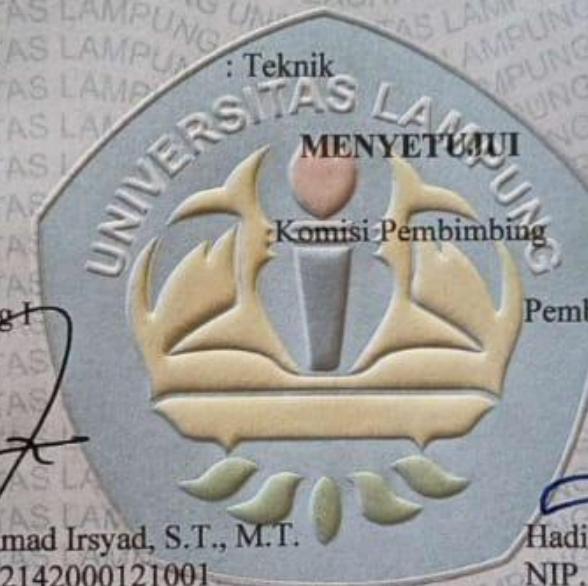
Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin
FT Unila,

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

Ketua Program Studi S1
Teknik Mesin,

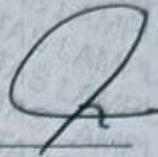
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003



MENGESAHKAN

1. Tim Pengudi

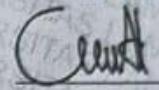
Ketua : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



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



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

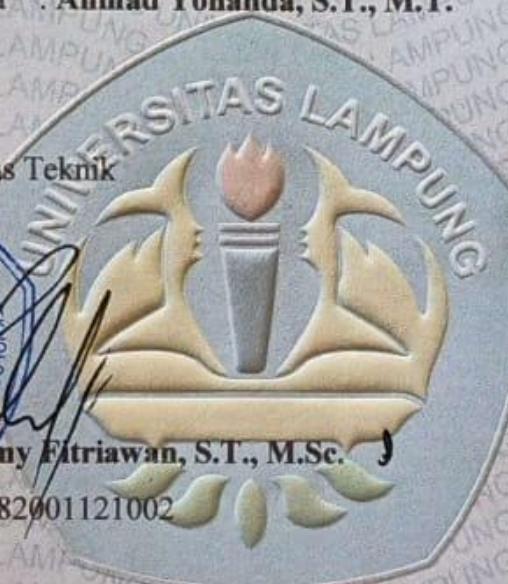


2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Etriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509282001121002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 4 Desember 2025

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

TUGAS AKHIRINI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN DARI HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN PERTURAN REKTOR No. 13 TAHUN 2019.

Bandar Lampung, Desember 2025

demembuat pernyataan,



Ardika Kusuma

NPM. 2115021023

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Natar, Kabupaten Lampung Selatan, merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Sutarjo Ibu Nursidah dan Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 1 Natar hingga tahun 2015, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Wiyata Karya Natar yang selesai pada 2018, dan melanjutkan pendidikan tingkat menengah atas di SMA Negeri 1 Natar dan lulus pada 2021.

Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama proses perkuliahan, penulis aktif tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota divisi Penelitian dan pengembangan periode 2022/2023 dan divisi kerohanian periode 2023/2024. Penulis berkesempatan untuk melakukan Kerja Praktek (KP)/Magang pada tahun 2024 di PT. Perkebunan Nusantara IV Unit Bekri, Lampung Tengah dengan judul laporan "**Analisis Efisiensi Boiler Water Tube Dengan Menggunakan Bahan Bakar Serabut Kelapa Sawit Dan Cangkang Di PTPN IV Regional VII Unit Bekri**".

Pada tahun 2025 penulis menyelesaikan program studi S1 Teknik Mesin dengan judul skripsi "**Karakteristik Kestabilan Termal Material Parafin Wax Sebagai Material Berubah Fasa Dengan Melting Point 58 °C**". bimbingan Bapak Dr. Muhammad Irsyad, ST., MT., dan Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. serta Bapak Hadi Prayitno, S.T., MT serta Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T. sebagai pembahas.

MOTO HIDUP

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah ayat 5)

”Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar, tetapi milik mereka yang senantiasa berusaha”

(Bacharuddin Jusuf Habibie)

"Bermimpilah setinggi langit. Jika engkau jatuh, engkau akan jatuh di antara bintang-bintang"

(Bung Karno)

PERSEMPAHAN

Alhamdulillahirobbil'alamiiin.

Telah Engkau Ridhoi Ya Allah langkah hamba-Mu, sehingga pada akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan.

Teriring shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, semoga kelak skripsi ini dapat memberikan ilmu yang bermanfaat

dan

Dengan ketulusan dan kerendahan hati, Kupersembahkan karya sederhana ini kepada:

Ayahanda dan Ibunda tercinta

Sutarjo dan Nursidah

Untuk adikku tercinta

Naila Agni

Terimakasih untuk saudara-saudara seperjuangan di Jurusan Teknik Mesin yang telah menemani dalam suka dan duka, berbagi ilmu, tawa, dan semangat selama masa perkuliahan. Semoga amal kebaikan yang telah dilakukan mendapat balasan dari Allah SWT.

Almamater yang Penulis banggakan

Universitas Lampung

SANWACANA

Bismillahirrahmanirrahim.

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, yang senantiasa memberikan rahmat serta hidayah yang sangat luar biasa, sehingga Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Karakteristik Kestabilan Termal Material Parafin *Wax* Sebagai Material Berubah Fasa Dengan *Melting Point* 58 °C”. Tak lupa shalawat serta salam selalu tercurah kepada junjungan besar Nabi Muhammad SAW sebagai suri teladan yang baik dan pemimpin kaumnya.

Suatu pencapaian yang luar biasa bagi peneliti dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mendapat gelar Sarjana Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih banyak terdapat kekurangan dan keterbatasan kemampuan serta pengetahuan yang Penulis miliki. Skripsi ini dapat terselesaikan atas bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Sebagai rasa syukur, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
2. Bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin;
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1;
4. Bapak Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan bimbingan, arahan, serta kritik dan saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya, semoga Bapak senantiasa diberikan kesehatan dan selalu berada dalam lindungan Allah SWT;
5. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan bimbingan, arahan,

serta kritik dan saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya, semoga Bapak senantiasa diberikan kesehatan dan selalu berada dalam lindungan Allah SWT;

6. Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan bimbingan, arahan, serta kritik dan saran yang membangun sehingga penulis dapat menyempurnakan skripsi ini dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya, semoga Bapak senantiasa diberikan kesehatan dan selalu berada dalam lindungan Allah SWT;
7. Bapak Ir. A.Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., IPM., selaku Dosen Pembimbing Akademik Penulis, terima kasih Bapak atas segala ilmu, pengalaman, dan pembelajarannya selama penulis menjalani perkuliahan;
8. Seluruh Dosen Jurusan Fakultas Teknik Universitas Lampung, yang penulis tidak dapat sebutkan satu persatu, tetapi tidak mengurangi rasa hormat Penulis kepada bapak dan ibu semua. Terima kasih atas ilmu yang telah Bapak dan Ibu berikan kepada penulis, sehingga penulis bisa sampai ke posisi saat ini. Terima kasih atas segala pengalaman semasa kuliah yang Bapak dan Ibu berikan;
9. Teristimewa kepada kedua orang tuaku tercinta sebagai penyemangat supaya penulis terus berjuang, Bapak Sutarjo dan Ibu Nursidah yang telah memberikan kasih sayang dan mencintai penulis, serta selalu mengiringi setiap langkah penulis, terima kasih atas segala perjuangan dan pengorbanan Bapak dan Ibu yang telah menjadi tempat penulis bercerita. Terima kasih atas do'a, pengertian, motivasi, support, mengingatkan, dan mengarahkan penulis hingga sampai di titik ini. Terima kasih telah memberikan pendidikan yang menjadikan penulis pribadi yang tangguh, pantang menyerah, dan tidak takut kegagalan hingga penulis dapat menggapai setiap mimpi-mimpinya.
10. Kepada Adik yang penulis sayangi, Naila Agni. Terima kasih atas segala kebersamaan, motivasi, dan bantuan kepada Penulis;
11. Kepada Sahabat Penulis di Jurusan Teknik Mesin. Sahabat Metfis yaitu Santri Adi S.T., Fitra Ballack Albana S.T., M. Sajid Adzmar S.T., M. roni Saputra, Nabil Faiq Arkaan, Abel Yusuf Ibrahim, M. Revi Tirtajaya. Namun demikian,

kalian adalah sahabat yang selalu ada pada saat senang maupun sedih penulis. Terima kasih telah bersama, mengingatkan, dan selalu memberikan nasehat serta saran baik sehingga Penulis dapat menjadi pribadi yang lebih baik, kalian bukan hanya sekedar teman melainkan keluarga baru bagi Penulis;

12. Kepada rekan-rekan TA *thermal storage* yaitu Gandi, Akmal, Zami, Agum. Terima kasih telah bersama, mengingatkan, dan selalu memberikan nasehat serta saran baik sehingga Penulis dapat menjadi pribadi yang lebih baik, kalian bukan hanya sekedar teman melainkan keluarga baru bagi Penulis.;
13. Kepada seluruh teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu kalian bukan hanya sekedar teman melainkan keluarga baru bagi Penulis;
14. Kepada Anggun Zairatul Arifa, terima kasih telah menjadi tempat penulis berdiskusi dan bercerita menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan serta selalu ada di sisi penulis melewati segala rintangan yang ada selama di semester akhir. Terima kasih semoga di kemudian hari Anggun di berikan kelancaran dalam hal apapun dan dapat menggapai setiap mimpi-mimpinya;
15. Kepada diri sendiri, Ardika Kusuma. Terima kasih atas segala perjuangan dan ketekunan yang telah dilalui hingga akhirnya penulis mampu menuntaskan tanggung jawab dalam menyelesaikan skripsi dan mencapai tahap ini. Tidak ada yang lebih mengetahui seluruh proses, pengorbanan, dan usaha tersebut selain Allah SWT dan penulis sendiri. Pencapaian ini bukanlah akhir, melainkan sebuah awal, dengan harapan penulis dapat terus berkembang dan memperbaiki diri menjadi pribadi yang lebih baik di masa mendatang.

Akhir kata Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih jauh dari kata kesempurnaan. Akan tetapi Penulis berharap karya sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, Aamiin.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025
Penulis

Ardika Kusuma

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Perpindahan panas	6
2.1.1 Konduksi	6
2.1.2 Konveksi	7
2.1.3 Radiasi.....	8
2.2 <i>Phase change material</i>	10
2.2.1 Jenis <i>Phase change material</i>	11
2.2.2 Sifat Termal Material Paraffin	13
2.3 Pemilihan PCM Paraffin	16
2.3.1 Stabilitas termal	17

BAB III METODE PENELITIAN	18
3.1 Tahap Penelitian.....	18
3.1.1 Diagram alur penelitian.....	19
3.2 Alat dan Bahan	21
3.3 Skema Pengujian	29
3.4 Penempatan Titik Pengukuran	30
3.5 Metode Pengambilan Data	32
3.5.5. Prosedur Pengujian Densitas	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Data T-History	39
4.2 Pembahasan.....	48
4.2.1 T-History.....	48
4.3 Data dan Grafik DSC Siklus 0, 200, 400, dan 600.	49
4.3.1 Pembahasan Hasil DSC Siklus 0	50
4.3.2 Pembahasan Hasil DSC Siklus 200	52
4.3.2 Pembahasan Hasil DSC Siklus 400	53
4.3.2 Pembahasan Hasil DSC Siklus 600	54
4.4 Pembahasan Differential Sceanning Calorimetry	55
4.5 Data Densitas Siklus 0, 200, 400, dan 600.....	57
4.5.1 Pembahasan Densitas	58
4.6 Pembahasan FTIR	59
4.7 Pembahasan Konduktifitas.....	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA.....	641

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 karakteristik sifat material paraffin	17
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>data logger</i>	22
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>thermocouple</i>	22
Tabel 3.3 Spesifikasi pompa air	23
Tabel 3.4 Spesifikasi <i>water flowmeter</i>	24
Tabel 3.5 Spesifikasi SSR.....	25
Tabel 4.1 Temperatur pelelehan siklus 0, 200, 400, dan 600.....	39
Tabel 4.2 Temperatur pembekuan siklus 0, 200, 400, dan 600.....	40
Tabel 4.3 Titik pelelehan dan pembekuan.....	48
Tabel 4.4 Hasil Pengujian pelelehan DSC siklus 0,200,400, dan 600.....	50
Tabel 4.5 Hasil Pengujian pemanasan DSC siklus 0,200,400, dan 600.....	50
Tabel 4.6 Densitas Parafin.....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konduksi.	6
Gambar 2.2 Konveksi.....	7
Gambar 2.3 Radiasi.....	9
Gambar 2.4 Gambar Material Parafin.....	13
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.	20
Gambar 3.2 <i>Heater</i>	21
Gambar 3.3 <i>Data logger</i> dan <i>thermocouple</i>	22
Gambar 3.4 Pompa air.....	23
Gambar 3.5 <i>Water flow</i>	24
Gambar 3.6 Arduino dan SSR.....	25
Gambar 3.7 Selang pipa air panas.	26
Gambar 3.8 Katup air.....	26
Gambar 3.9 <i>Relay 10 ampere</i>	27
Gambar 3.10 <i>Max6675</i>	27
Gambar 3.11 Wadah Parafin dan Wadah sirkulasi.	28

Gambar 3.12 Parafin.	28
Gambar 3.13. Instalasi alat pengujian.	29
Gambar 3.14. Penempatan titik pengukuran.	30
Gambar 4.1 Grafik leleh dan beku siklus 1-25.....	40
Gambar 4.2 Grafik leleh dan beku siklus 1-100.	42
Gambar 4.3 Grafik leleh dan beku siklus 101-200.	43
Gambar 4.4 Grafik leleh dan beku siklus 201-300.	44
Gambar 4.5 Grafik leleh dan beku siklus 301-400.	45
Gambar 4.6 Grafik leleh dan beku Siklus 401-500.....	46
Gambar 4.7 Grafik peleahan dan pebekuan siklus 501-600.	47
Gambar 4.8 Grafik perbandingan siklus.	49
Gambar 4.9 Grafik DSC siklus 0.	51
Gambar 4.10 Grafik DSC siklus 200.	52
Gambar 4.11 Grafik DSC siklus 400.	53
Gambar 4.12 Grafik DSC siklus 600.	54
Gambar 4.13 Grafik DSC perbandingan siklus 0, 200, 400, 600.....	56
Gambar 4.14 (a) penelitian terdahulu dengan (b) Perbandingan pengujian FTIR.59	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi termal merupakan salah satu bentuk energi yang memiliki peran penting dalam sistem penyimpanan dan konversi panas. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi global upaya untuk mengembangkan teknologi penyimpanan energi yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan semakin mendapat perhatian luas. Penyimpanan energi termal (*Thermal Energy storage* disingkat TES) menjadi salah satu solusi potensial untuk mengatasi fluktuasi ketersediaan energi serta meningkatkan efisiensi sistem konversi panas baik pada aplikasi industri, sistem pendingin maupun sistem pemanas. Melalui sistem TES energi termal dapat disimpan saat ketersediaan melimpah dan dilepaskan kembali saat dibutuhkan, sehingga mampu mengoptimalkan penggunaan energi dan menekan kehilangan panas (Herlambang dkk, 2023).

Salah satu pendekatan yang paling banyak dikaji dalam sistem TES adalah penggunaan material perubahan fasa atau (*Phase change material* disingkat PCM). Material ini mampu menyerap dan melepaskan energi termal melalui proses perubahan fasa dari padat ke cair dan sebaliknya. Keunggulan utama PCM terletak pada kemampuannya menyimpan energi dalam bentuk panas laten yang memungkinkan penyimpanan energi dalam jumlah besar pada rentang temperatur yang relatif sempit dan stabil. Karena itu PCM banyak diaplikasikan dalam sistem penyimpanan energi termal sistem pendingin pasif bangunan transportasi berpendingin dan perangkat elektronik yang membutuhkan kestabilan temperatur (Eleiwi dkk, 2023).

Perkembangan penelitian menunjukkan parafin menjadi salah satu jenis PCM organik menjadi pilihan karena kestabilan termal yang baik tidak korosif, tidak beracun, serta memiliki tekanan uap rendah. Penelitian oleh (Rajkant dan Manish, 2019) menunjukkan bahwa parafin mampu mempertahankan titik leleh dan panas laten dengan perubahan minimal setelah melalui hingga 1500 siklus leleh-beku. (Bora dan Joshi, 2023) juga melaporkan bahwa setelah 500 siklus termal parafin hanya mengalami sedikit perubahan karakteristik kristalin dan kimia. Selain itu (Chen dkk, 2023) menemukan bahwa penambahan bahan komposit pada parafin dapat meningkatkan konduktivitas termal hingga 1,2 W/m·K tanpa menurunkan kestabilan termal secara signifikan. (Irsyad dkk., 2023) menggambarkan pentingnya pengujian temperatur awal dan akhir serta pengamatan visual terhadap proses pembekuan dan pencairan untuk menilai kinerja PCM.

Penelitian oleh (Irsyad dkk, 2020) menunjukkan bahwa sifat termal PCM seperti konduktivitas, panas laten, dan densitas berpengaruh besar terhadap kemampuan material menyimpan dan melepaskan energi termal. (Nadjib dan Santosa, 2022) menambahkan bahwa perubahan volume selama transisi fasa memengaruhi kestabilan dan efisiensi penyimpanan, sedangkan (Rahmatunnissa dan Hasannah, 2023) menemukan bahwa meskipun parafin mengalami sedikit degradasi setelah siklus berulang material ini tetap stabil untuk penggunaan jangka menengah. (Taha dan Khalifa, 2023) membuktikan bahwa parafin efektif mempertahankan temperatur air selama proses pemanasan dan pendinginan sementara (Eleiwi dkk., 2023) mengkonfirmasi pentingnya pengujian siklus berulang untuk menilai degradasi termal PCM.

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan terhadap PCM berbasis parafin sebagian besar studi masih berfokus pada variasi jenis bahan atau aditif untuk meningkatkan konduktivitas termal. Namun masih terdapat keterbatasan dalam penelitian yang membahas ketahanan termal dan kestabilan sifat fisik-kimia parafin setelah mengalami siklus perubahan fasa berulang dengan variasi wadah penampung yang berbeda. Selain itu sebagian penelitian dilakukan dengan sumber panas alami seperti sinar matahari yang tidak sepenuhnya memberikan kondisi termal yang terkendali. Hal ini membuka peluang penelitian baru untuk

mengkaji kestabilan termal parafin pada kondisi pemanasan buatan (*heater*) dan pendinginan menggunakan air bersirkulasi dengan jumlah siklus tertentu dalam skala laboratorium untuk mempersingkat waktu 600 siklus yang setara dengan 600 hari jika dilakukan pada pengujian di lapangan sedangkan dengan pengujian skala laboratorium memerlukan waktu 16 menit dalam 1 siklus.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh siklus pemanasan dan pendinginan berulang terhadap kestabilan termal material parafin wax dengan titik leleh 58°C serta menganalisis perubahan sifat-sifat termalnya seperti panas laten konduktivitas termal, densitas, titik leleh, dan titik beku. Pengujian dilakukan menggunakan sistem tertutup dengan sumber panas buatan dan pendinginan terkontrol untuk mendapatkan hasil yang konsisten. Variasi wadah PCM juga digunakan untuk menilai pengaruh media penampung terhadap performa penyimpanan energi termal.

Adapun manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai ketahanan termal parafin pada kondisi siklus berulang serta menjadi acuan dalam pengembangan sistem penyimpanan energi termal yang efisien dan berkelanjutan. Selain itu hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan teknologi penyimpanan panas di Indonesia khususnya pada sistem berbasis energi terbarukan seperti pemanfaatan energi surya.

1.2 Rumusan Masalah

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

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

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pengujian T-*history*, DSC dan Kesetabilan material *paraffin*, setiap sampel parafin memiliki berat yang seragam,

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah Menganalisis karakteristik sifat PCM *paraffin* meliputi: panas laten, titik leleh dan titik beku serta kerapatan setelah melewati siklus pelelehan dan pembekuan. Komposisi molekul awal material serta konduktivitasnya.

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 *paraffin* untuk mengetahui panas yang tersimpan pada *Phase change material* untuk mencegah potensi panas yang terbuang.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan oleh penulis dalam Menyusun laporan kerja praktik ini adalah sebagai berikut:

a. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan secara garis besar tentang latar belakang masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah dan sistematika proposal yang akan ditulis dalam penulisan penelitian.

b. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menerangkan secara singkat tentang teori yang berkaitan dengan masalah yang akan dibahas serta merupakan tinjauan kepustakaan yang menjadi kerangka dan landasan berfikir dalam proses penulisan laporan dalam kerja praktik yang dilakukan.

c. BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang metode-metode yang digunakan penulis dalam melaksanakan penelitian. Beberapa tahapan yang dilakukan, yaitu pengenalan, pengamatan langsung, penentuan studi kasus, pengujian, pengumpulan data, studi literatur dan Analisa *Phase change material* dengan aplikasi pengujian berulang.

d. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan hasil dari penelitian yang dilakukan penulis tentang data masukan yang diperlukan dalam Analisa material penyimpan panas, pemilihan jenis material, pemilihan peralatan, dan data spesifikasi alat.

e. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran dari data yang diperoleh dan pembahasan dari penulis tentang studi kasus yang diambil dalam penelitian yang dilakukan penulis.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan tentang referensi yang digunakan dalam penulisan dan penyusunan proposal skripsi ini.

LAMPIRAN

Merupakan lampiran perhitungan dari penelitian yang dilakukan, serta data-data yang mendukung dalam penulisan laporan ini.

BAB II

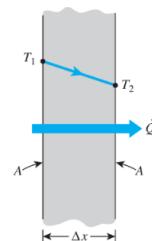
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan panas

Perpindahan panas adalah proses yang umum ditemui dalam dikehidupan sehari-hari. Perpindahan panas melibatkan perpindahan energi termal dari material atau fluida yang memeliki temperatur lebih tinggi yang berpindah ke temperatur yang lebih rendah karena perbedaan temperatur. Perpindahan panas yang umumnya terjadi yaitu: konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.1.1 Konduksi

Laju perpindahan panas konduksi merupakan proses berpindahnya panas dari media padat. Perbedaan gradien temperatur akan menghasilkan panas yang berpindah dalam material padat (Reza dkk., 2023). Gambar 2.1 di bawah menandakan panas berpindah dari titik T_1 menuju T_2 pada material padat tanda panah menunjukkan arah ke kanan sebagai proses perpindahan panas dan melambangkan perbedaan temperatur panas.



Gambar 2.1 Konduksi.

(Sumber: Cengel, 2015)

Konduksi adalah satu-satunya mekanisme perpindahan panas yang dapat terjadi pada materi padat yang tidak dapat ditembus oleh cahaya. Selain itu, konduksi juga berperan penting dalam fluida, di mana pada media yang tidak padat proses ini biasanya berinteraksi dengan konveksi, dan dalam beberapa kasus juga berkaitan dengan radiasi. Persamaan dasar untuk konduksi satu dimensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dL} \quad (2.1)$$

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

A : Luas penampang (m^2)

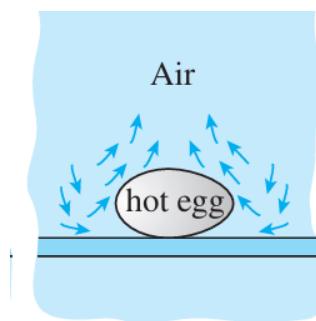
k : Konduktivitas termal (W/m.K)

T : Temperatur (K)

L : Tebal (m)

2.1.2 Konveksi

Konveksi merupakan mekanisme perpindahan panas yang melibatkan material atau zat yang dapat berubah-ubah bentuk sesuai wadah. Fluida memiliki bentuk gas dan cairan yang membawa energi termal dari sumber panas ke tempat lain (Wang dkk., 2024). Dalam *Phase change material* (PCM) konveksi panas yang lebih cepat dalam fase cair sehingga didapatkan laju peleahan yang optimal.



Gambar 2.2 Konveksi.

(Sumber: Cengel, 2015)

Konveksi menunjukkan temperatur inlet dan orientasi aliran fluida dapat mempengaruhi kinerja sistem penyimpanan energi termal (Nishad dkk., 2025). Pada umumnya konveksi dapat dibagi menjadi dua yaitu konveksi alami dan paksa dimana konveksi alami terjadi karena perbedaan densitas akibat temperatur yang berbeda sedangkan konveksi paksa melibatkan alat untuk melakukan konveksi secara paksa seperti pompa. Gambar 2.2 diatas menunjukkan konveksi alami pada sebuah telur yang memiliki *temperature* yang lebih tinggi dari udara sekitar. Di bawah ini merupakan rumus umum dari perpindahan panas secara konveksi:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Dimana: \dot{Q}_{conv} : Perpindahan panas konveksi (W)

h : Koefisien konveksi (W/m².K)

A_s : Luas penampang (m²)

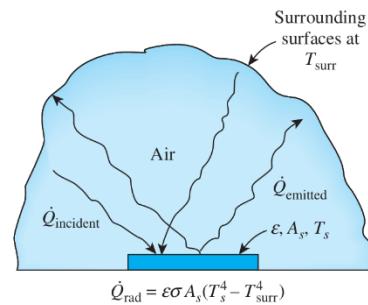
T_s : Temperatur Permukaan (°C)

T_∞ : Temperatur fluida di sekitarnya (°C)

2.1.3 Radiasi

Radiasi melibatkan transfer panas melalui emisi gelombang elektromagnetik (Chaichan dkk., 2021). Tidak seperti perpindahan panas dengan cara konduksi dan konveksi, perpindahan panas radiasi tidak memerlukan medium perantara dan dapat berlangsung dalam ruang vakum. Gambar tersebut memperlihatkan mekanisme perpindahan panas melalui radiasi termal antara suatu permukaan dengan luas A_s , temperatur T_s , dan emisivitas ϵ terhadap permukaan sekitarnya pada temperatur T_{surr} . Dalam radiasi termal setiap benda bertemperatur di atas nol mutlak memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Meskipun berada dalam medium udara

proses yang ditunjukkan hanya mempertimbangkan radiasi sedangkan konduksi dan konveksi diabaikan. Pertukaran energi radiasi meliputi radiasi yang dipancarkan permukaan \dot{Q}_{emitted} dan radiasi yang diterima dari lingkungan $\dot{Q}_{\text{incident}}$ dengan besarnya laju radiasi mengikuti hukum Stefan–Boltzmann yang disesuaikan dengan emisivitas permukaan.



Gambar 2.3 Radiasi.

(Sumber: Cengel, 2015)

Radiasi bersih yang meninggalkan permukaan dirumuskan sebagai dimana suku pertama merepresentasikan radiasi yang dipancarkan, dan suku kedua radiasi yang diterima dari lingkungan. Jika $T_s > T_{\text{surr}}$ perpindahan panas bersih terjadi dari permukaan ke lingkungan sedangkan jika $T_s < T_{\text{surr}}$ permukaan menerima panas bersih dari lingkungan. Adapun rumus umum radiasi adalah sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2.2)$$

Dimana: \dot{Q}_{rad} : Perpindahan panas radiasi (W)

ϵ : Emisivitas

σ : Konstanta Stefan-bolzmann $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴)

2.2 *Phase change material*

Phase change material adalah bahan yang dapat digunakan untuk menyimpan dan melepaskan energi termal melalui perubahan fase ataupun tidak berubah fase misalnya material pelat logam yang dipanaskan untuk memanaskan steik kemudian pada material lain dari padat ke cair atau sebaliknya yang terjadi pada temperatur tertentu. PCM berfungsi sebagai medium penyimpanan energi dalam jumlah besar pada perubahan temperatur yang relatif kecil berbeda dengan bahan penyimpanan energi termal konvensional seperti air. Dalam sistem material penyimpan panas dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemanasan air dengan menyimpan panas (Darwin dkk., 2013).

Penyimpanan energi termal dengan menggunakan PCM penting karena memberikan solusi untuk masalah energi termal yang terbuang. Ketika panas terjadi akan memanaskan air dan juga PCM dengan energi termal yang diserap dari panas. Ketika temperatur air lebih rendah dari PCM pada kondisi tersebut PCM akan melepaskan energi yang disimpan untuk terus memanaskan air dalam sistem. Proses ini dikenal sebagai *charge* (penyerapan energi) dan *discharge* (pelepasan energi). Pada tahap *charge* PCM menyerap panas dari *heater* melalui media air dengan *temperature* lebih tinggi. Energi termal yang dihasilkan akan diserap PCM sehingga terjadi perubahan fase dari padat menjadi cair. Karena PCM memiliki kapasitas panas laten yang tinggi PCM mampu menyimpan jumlah energi yang lebih besar dibandingkan dengan bahan penyimpan energi lainnya. Sebagai contoh PCM berbasis parafin memiliki titik lebur 58 °C atau yang dapat disesuaikan untuk berfungsi pada rentang temperatur yang sesuai dengan pemanasan air. Pada tahap *discharge* PCM melepaskan energi yang telah disimpan sebelumnya ketika temperatur air turun atau ketika tidak ada panas yang didapat *paraffin* yang cukup untuk menjaga temperatur air dalam sistem. Saat temperatur air di dalam tangki turun, PCM mulai menjadi padat kembali melepaskan panas yang tersimpan selama fase pencairan. Proses pelepasan panas ini menjaga temperatur air tetap stabil meskipun pasokan energi termal tidak tersedia.

Penelitian yang dijelaskan oleh (Taha dan Khalifa, 2023) kemampuan PCM dalam sistem pemanas air mengurangi ketergantungan. Dengan menggunakan PCM ini berguna dalam memastikan ketersediaan air panas yang stabil untuk kebutuhan rumah tangga atau industri. Pemahaman mengenai laju aliran massa kapasitas panas spesifik fluida, serta titik leleh PCM menjadi faktor penting dalam perancangan sistem yang optimal (Hossain dkk, 2021). Faktor seperti konduktivitas termal PCM ketahanan terhadap siklus *charge-discharge* dan kestabilan jangka panjang menjadi pertimbangan utama dalam memilih PCM yang sesuai untuk aplikasi yang digunakan secara berulang.

2.2.1 Jenis *Phase change material*

Material penyimpan panas memiliki banyak jenis yang umum ditemui dalam ilmu penyimpanan energi termal, *Phase change material* secara umum dibedakan menjadi tiga kelompok utama, yaitu PCM organik, PCM anorganik, dan PCM eutektik. PCM organik mencakup parafin dan asam lemak. Kelompok organik umumnya memiliki kestabilan kimia yang baik, tidak beracun, serta tidak bersifat korosif. Berikut jenis-jenis PCM yang umumnya digunakan:

2.2.1.1 PCM *organic*

PCM organik yang paling banyak diteliti karena kemampuannya mempertahankan sifat termal dalam siklus fasa berulang PCM organik seperti *paraffin* merupakan material yang dapat diperoleh dari diekstraksi batu bara, kayu, dan serpih minyak sebagian besar diperoleh dari penyulingan minyak bumi. Berbagai teknik telah dikembangkan untuk meningkatkan konduktivitas termal *paraffin* termasuk penambahan aditif seperti grafit yang dimodifikasi terbukti. efektif dalam memperbaiki laju perpindahan panas (Nadjib dan Santosa, 2022).

2.2.1.2 PCM anorganik

Material anorganik seperti garam hidrat contohnya kalsium klorida dan natrium sulfat memiliki nilai kalor laten dan konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan PCM organik, tetapi cenderung bersifat korosif dan rentan mengalami superpendinginan. PCM anorganik merupakan jenis material berasal dari material bukan organik. Jenis PCM anorganik masih terdapat masalah seperti *supercooling*. Penelitian terus dilakukan untuk mengeksplorasi berbagai bentuk dan gabungan PCM untuk mendapatkan efisiensi maksimum dalam aplikasi penyimpanan (Yu dan Song, 2023).

2.2.1.3 PCM eutektik

PCM eutektik merupakan campuran dua atau lebih zat kimia, baik organik maupun anorganik yang memiliki titik leleh tetap lebih rendah daripada titik leleh masing-masing komponennya. Jenis PCM ini sering digunakan dalam aplikasi yang memerlukan kestabilan temperatur tinggi dan karakteristik pelelehan yang konsisten. PCM eutektik umumnya dapat dikombinasikan antara material organic dan material anorganik untuk menciptakan sistem penyimpanan energi yang lebih fungsional dan efisien. Keunggulan utama dari PCM semacam ini adalah stabilitas termalnya dan kemampuannya untuk menjaga temperatur yang diinginkan dengan lebih baik (Chaichan dkk, 2021). Penyesuaian komposisi PCM dapat dilakukan untuk meningkatkan daya penyerapan termal sesuai dengan kebutuhan aplikasi (Nadjib dan Santosa, 2022).

2.2.2 Sifat Termal Material *Paraffin*

Pemilihan jenis parafin dalam suatu sistem bergantung pada kebutuhan temperatur operasi. Misalnya, n-parafin dengan 18 atom karbon (n-oktedekana) memiliki titik leleh sekitar 28°C sedangkan n-eikosana (20 atom karbon) memiliki titik leleh sekitar 36–38°C. Titik leleh parafin yang tajam memberikan keuntungan tersendiri dibandingkan material PCM lainnya yang mengalami transisi fase dalam rentang temperatur yang lebih lebar. Seiring bertambahnya jumlah atom karbon dalam rantai n-parafin titik leleh material ini cenderung meningkat secara bertahap.

Parafin dengan n-docosana (22 atom karbon) memiliki titik leleh sekitar 44° sementara n-tetracosana (24 atom karbon) berada di kisaran 50–52°C. Selanjutnya n-heksakosana (26 atom karbon) memiliki titik leleh sekitar 54–56°C dan n-oktakosana (28 atom karbon) berada di kisaran 58–60°C. Parafin dengan rantai karbon sedang hingga panjang seperti ini umumnya digunakan dalam aplikasi yang memerlukan temperatur kerja yang lebih tinggi seperti sistem penyimpanan panas untuk pengeringan industri atau pemanas pasif untuk ruangan berinsulasi.



Gambar 2.4 Gambar Material Parafin.

Material *paraffin* umumnya memiliki beberapa karakteristik seperti dibawah ini:

1. Titik Lebur (*Melting Point*)

Titik lebur parafin adalah temperatur saat material mulai beralih dari bentuk padat menjadi cair. Biasanya titik lebur parafin berkisar antara 45°C hingga 65°C tergantung pada jenis parafin yang digunakan. Dalam aplikasi pemanas air tenaga surya temperatur ini harus disesuaikan untuk mengoptimalkan penyimpanan panas (Pandey dkk., 2023).

2. Titik Beku (*Freezing Point*)

Titik beku adalah temperatur dimana parafin kembali beralih dari bentuk cair menjadi padat saat kehilangan panas. Titik beku biasanya sedikit lebih rendah dari titik lebur berkisar antara 28 °C tergantung pada jenis parafin. Perbedaan antara titik lebur dan titik beku adalah salah satu alasan mengapa parafin efektif dalam menyimpan energi termal. Ketika temperatur turun parafin melepaskan energi yang disimpannya dan kembali menjadi padat (Asif dkk., 2024).

3. Densitas

Densitas padat parafin berkisar antara 0.85 hingga 0.90 g/cm³ tergantung pada komposisi kimianya. Densitas ini berperan dalam menentukan massa jenis dari PCM pada temperatur rendah yang memengaruhi seberapa banyak energi yang bisa disimpan per satuan volume. Semakin tinggi densitas semakin besar kapasitas penyimpanan energi dalam volume tertentu (Goh dkk., 2022).

4. Kapasitas Panas Spesifik (Cp)

Kapasitas panas spesifik merupakan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur satu kilogram material sebesar satu derajat Celsius. Untuk parafin kapasitas panas spesifik berkisar antara 2.1 hingga 2.5 kJ/kg·K pada temperatur sekitar titik lebur. Kapasitas panas spesifik yang relatif rendah dibandingkan dengan air dapat mengurangi kemampuan parafin untuk menyimpan energi

secara langsung dengan kapasitas laten tinggi mengantikan hal tersebut (Zhang dkk., 2023).

5. *Latent heat* (Kalor Laten)

Kalor laten parafin menunjukkan jumlah energi yang disimpan atau dilepaskan selama perubahan fase (dari padat ke cair atau sebaliknya). Angka ini tinggi dibandingkan dengan material lain seperti air yang menjadikan parafin efisien dalam menyimpan energi termal. Energi ini dapat digunakan kembali saat PCM melepaskan panasnya selama perubahan fase dari cair menjadi padat (Chang dkk., 2022).

6. Konduktivitas Terma

Konduktivitas termal parafin relatif rendah (antara 0.25 hingga 0.40 W/m·K). Hal ini berarti bahwa parafin tidak seefisien bahan seperti logam dalam mentransfer panas. Konduktivitas termalnya yang rendah tidak mengurangi kinerjanya secara signifikan terutama ketika digunakan dalam aplikasi penyimpanan energi termal jangka Panjang (Tang dkk., 2022).

7. *Viscositas*

Viskositas menunjukkan kekentalan cairan saat parafin berada dalam keadaan cair pada temperatur tinggi. Viskositas parafin berkisar antara 0.1 hingga 0.3 Pa·s, tergantung pada temperatur dan jenis parafin. Viskositas yang rendah memungkinkan parafin mengalir dengan mudah dalam sistem penyimpanan, yang memudahkan proses pengisian dan pengosongan energi termal (Fan dkk., 2022).

8. Stabilitas Termal

Parafin memiliki stabilitas termal yang cukup baik, biasanya hingga temperatur sekitar 100 hingga 120°C. Sistem penyimpanan energi termal dengan PCM harus tahan terhadap temperatur dalam jangka panjang tanpa mengalami kerusakan atau degradasi yang signifikan. Meskipun stabil penggunaan parafin di atas temperatur stabilitasnya dapat menyebabkan degradasi pada kualitas material dan pengurangan kapasitas penyimpanan energi (Dong dkk., 2022).

2.3 Pemilihan PCM *Paraffin*

Material Perubahan Fasa (PCM) merupakan komponen penting dalam sistem penyimpanan energi termal. PCM organik seperti parafin dikenal atas kestabilan termalnya dan kemampuannya untuk tidak mengalami permasalahan *supercooling* (Ariwibowo dkk., 2022). PCM *paraffin* umumnya memiliki jenis yang beragam dengan karakteristik yang tidak jauh berbeda dengan menggunakan *paraffin* perpindahan panas dapat terjadi dengan lebih stabil karena konduktifitas material tersebut tidak seperti logam. misalnya pada *paraffin wax melting point* 58 °C. Parafin merupakan salah satu material yang paling umum digunakan sebagai *Phase change material* (PCM) dalam berbagai aplikasi penyimpanan energi termal terutama pada sistem yang membutuhkan pengaturan temperatur pasif seperti jaket tahan panas, sistem pendingin elektronik dan panel surya. Parafin termasuk dalam kelompok hidrokarbon jenuh (alkana) dengan rantai karbon lurus (n-parafin), yang memiliki kemampuan menyimpan dan melepaskan energi dalam bentuk panas laten selama proses perubahan fase padat-cair. Proses ini terjadi dalam kisaran temperatur tertentu tergantung pada panjang rantai karbonnya biasanya antara 20°C hingga 75°C yang menjadikannya sesuai untuk aplikasi dalam temperatur lingkungan.

Keunggulan utama parafin sebagai PCM adalah kestabilan termalnya yang baik, sifat kimia yang relatif tidak beracun, tidak korosif, serta memiliki harga yang ekonomis dan ketersediaan yang melimpah. Secara termofisika parafin memiliki kalor laten peleburan yang tinggi berkisar antara 150 hingga 250 kJ/kg tergantung pada jenis parafin yang digunakan. Hal ini memungkinkan penyimpanan energi dalam jumlah besar dalam volume yang relatif kecil. Selain itu densitas parafin dalam keadaan padat dan cair tidak terlalu berbeda sehingga perubahan volumenya selama transisi fase tidak menyebabkan tekanan besar terhadap wadah penyimpanan. Konduktivitas termal parafin cukup rendah biasanya sekitar 0,2 W/m·K. Material parafin memiliki kestabilan kimia relatif aman karena tidak mudah bereaksi dengan bahan lain dan tidak menghasilkan gas berbahaya selama digunakan.

2.3.1 Stabilitas termal

Stabilitas termal material parafin digunakan untuk mempertahankan kinerja dan sifat-sifatnya saat mengalami pemanasan dan pendinginan berulang dalam jangka waktu yang lama. Karena parafin digunakan sebagai *Phase change material* (PCM), yang mengandalkan perubahan fase dari padat ke cair untuk menyimpan dan melepaskan energi termal, stabilitas termalnya penting dalam memastikan efisiensi dan daya tahan material tersebut dalam berbagai aplikasi sistem penyimpanan energi termal. Dibawah ini merupakan tabel dari penelitian-penelitian sebelumnya.

Tabel 2.1 karakteristik sifat material *paraffin*

Melting point (°C)	Konduktivitas termal (W/m².K)	Densitas (kg/m²)	Panas laten (Kj/kg)	Viskositas (Ns/m²)	Panas spesifik padat	Panas spesifik cair
60	0,4	861	213		1850	778
56	0,2	880	160	0,001	2000	
48,38			194			
46,7			209		947	750
48,85	0,2	880	173	0,0031	2000	
60		790	189		2480	2760
45	0,21	930	190		2384	2490
52	0,24		143		2000	
59,9	0,25	750	190	0,001	2000	1500
44	1,15	1020	102,6		2210	1930

(V. Madadi Avargami dkk., 2021)¹, (M. Mohammed A. S. dkk., 2024)²,
 (W. Su dkk., 2019)³, (G. Marusna dan J. Waluyo, 2019)⁵,
 (R. Anggrainiy dkk., 2021)⁶, (A. A. F. Al – Hamadani dan A. H. Yaseen, 2021)⁷,
 (V. Hendrik dkk. 2022)⁸, (A. D. Korawan, 2019)⁹, (S. Nishad dkk., 2025)¹⁰

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berfokus pada analisis karakteristik perpindahan panas dari material perubahan fasa (*Phase change material/PCM*), yaitu parafin yang digunakan dalam sistem pelehan dan pembekuan sebagai media penyimpanan dan pelepasan kalor. Parafin dipilih sebagai bahan utama karena panas latennya yang cukup tinggi ketahanan sifat karakteristiknya, harganya yang terjangkau ketersediaannya yang melimpah di Indonesia. Perangkat utama yang digunakan dalam studi ini adalah box sirkulasi berisi air dipanaskan menggunakan *heater* yang didalamnya terdapat parafin di dalam tabung reaksi. Stabilitas termal dimana parafin akan diuji untuk mengetahui kestabilan termalnya serta karakteristik lainnya. Penelitian ini bersifat eksperimental sehingga pelaksanaannya membutuhkan waktu dan lokasi tertentu untuk proses pengujian. waktu pelaksanaan pada bulan agustus yang dilakukan pengujian di labolatorium termodinamika.

3.1 Tahap Penelitian

Adapun tahapan penelitian kestabilan sifat termal parafin dapat dilihat pada uraian berikut.

1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah mempelajari mengenai perpindahan panas, *Phase change material*, jenis-jenis parafin dan karakteristiknya.

2. Persiapan Alat

Pengujian Mempersiapkan alat pengujian dan bahan yang dibutuhkan seperti wadah penampung air siklus, penyimpanan air, parafin, dan lain sebagainya yang akan dijelaskan lebih rinci pada bagian alat dan bahan.

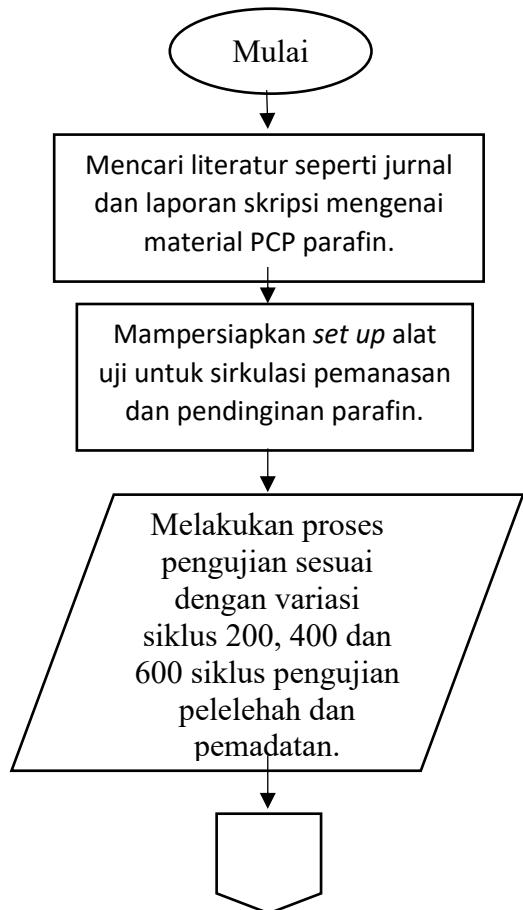
3. Pengujian

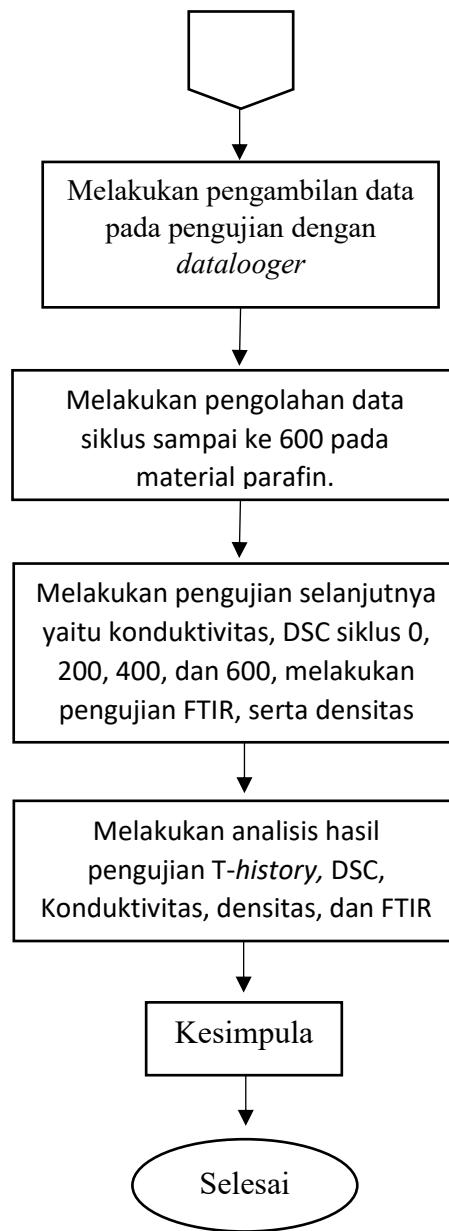
Pengujian ini dilakukan dengan berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan.

4. Penulisan Laporan

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

3.1.1 Diagram alur penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Alat dan Bahan

Lokasi Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

a. Pemanas air

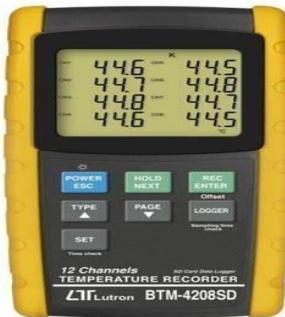
Pemanas air yang digunakan adalah koil pemanas dimana alat ini dipakai untuk memanaskan air. Umumnya menggunakan listrik pemanas berfungsi mirip dengan resistor besar, dimana ketika arus listrik mengalir melalui koil ini mulai memanas. Daya dari koil pemanas yang digunakan adalah 650 Watt. Kemudian pemanas ini akan dihubungkan ke sumber listrik dan dicelupkan ke dalam air untuk memanaskan air kemudian air pansas dari air akan diserap parafin. Pemanas air yang digunakan dapat dilihat seperti pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.2 Heater.

b. *Data Logger* dan *Thermocouple*

Data Logger serta *Thermocouple* digunakan dalam mengambil pengukuran temperatur pada parafin dan air. Temperatur fluida yang ada di dalam wadah sirkulasi. Perubahan temperatur ini akan dicatat oleh *data logger* dan dapat simpan dalam SD Card.



Gambar 3.3 *Data logger* dan *thermocouple*.

Tabel 3.1 Spesifikasi data logger

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

Tabel 3.2 Spesifikasi *thermocouple*

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

c. Pompa air

Pompa air merupakan komponen yang berfungsi untuk mensirkulasi air dingin masuk. Kemudian keluar dari wadah sirkulasi hingga perpindahan panas maksimal terjadi pada proses pemadatan parafin. Pompa air yang dipakai adalah pompa air akuarium seperti yang terlihat pada Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.4 Pompa air.

Pompa air yang dipakai adalah pompa Shimge ZPS 15-9-140, serta memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.3 Spesifikasi pompa air

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 air yang mengalir dari keluaran pompa ke wadah sirkulasi sehingga besar laju aliran air dapat diketahui. Aliran air 1,5 l/min untuk mnyesuaikan lama waktu pendinginan supaya tidak terlalu jauh selisih waktu peleahan dan pemanasan. *Water flow meter* yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 3.4 berikut ini:



Gambar 3.5 *Water flow*.

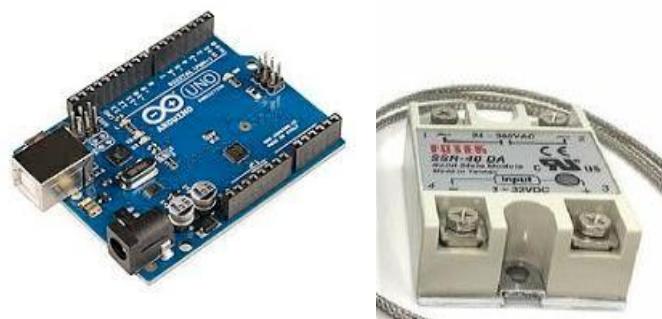
Water flow meter yang digunakan dalam pengujian ini memiliki spesifikasi alat sebagai berikut:

Tabel 3.4 Spesifikasi *water flowmeter*

Merk	ZJ-LCD-M
Satuan	LPM (liter per menit)
Rentang tegangan operasi	DC 24V/1A
Rentang kuantitatif	1-9999 LPM

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

Arduino digunakan untuk mengontrol dan mengatur perangkat elektronik pada penelitian yang dilakukan penulis ada dua instrumen yang di kontrol langsung oleh arduino yaitu pompa dan *heater*. Kontrol berdasarkan instruksi yang diberikan melalui program diatur temperatur kerja dari 35°C sampai 75°C. SSR digunakan untuk saklar elektronik tanpa kontak mekanis untuk mengontrol dan mengendalikan daya pada elemen pemanas.



Gambar 3.6 Arduino dan SSR.

Spesifikasi SSR adalah sebagai berikut:

Tabel 3.5 Spesifikasi SSR

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

f. Selang pipa air panas

Penelitian ini menggunakan selang pipa air panas yang dirancang khusus untuk mengalirkan fluida panas dalam wadah sirkulasi kemudian dibuang ke lingkungan seperti yang tertera dalam skema pengujian. Jenis selang pipa air panas yang digunakan adalah selang silikon dengan 3/4 inch, dan mampu menahan temperatur hingga 110° C. Dengan karakteristik ini selang silikon untuk pipa air panas menjadi pilihan yang baik dalam mengatasi aliran fluida panas.



Gambar 3.7 Selang pipa air panas.

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 sebagai penutup. Katup memudahkan penulis untuk mengatur aliran yang masuk.



Gambar 3.8 Katup air.

h. *Relay 10 Ampere*

Relay 10 ampere adalah komponen saklar listrik otomatis yang digunakan untuk mengendalikan arus besar seperti pompa air menggunakan sinyal arus kecil dari sistem kontrol misalnya Arduino. Relay ini berfungsi sebagai jembatan antara rangkaian kontrol berdaya rendah dan beban listrik berdaya tinggi. Perangkat elektronik kecil dapat menyalakan atau mematikan pompa tanpa harus menanggung arus besar secara langsung.



Gambar 3.9 *Relay 10 ampere*.

i. *Max6675*

Max6675 adalah komponen mengubah sinyal analog dari termokopel menjadi data digital yang bisa dibaca oleh mikrokontroler Arduino. Termokopel menghasilkan tegangan listrik kecil berdasarkan perbedaan temperatur antara ujung sensor dan sambungan referensi. Tegangan kecil ini kemudian diperkuat dan dikonversi menjadi nilai temperatur oleh chip *MAX6675*.



Gambar 3.10 *Max6675*.

j. Wadah PCM dan wadah sirkulasi air

Wadah sirkulasi PCM adalah tempat atau media penampung air dalam sirkulasi. Wadah penampung air menggunakan bahan akrilik yang tahan panas. Tabung reaksi ini berfungsi sebagai pelindung fisik bagi PCM juga sebagai komponen penunjang transfer panas dalam sistem penyimpanan energi termal. Tabung reaksi yang digunakan dapat tahan panas karena kondisi kerja yang menggunakan panas yang berulang.



Gambar 3.11 Wadah Parafin dan Wadah sirkulasi.

2. Bahan

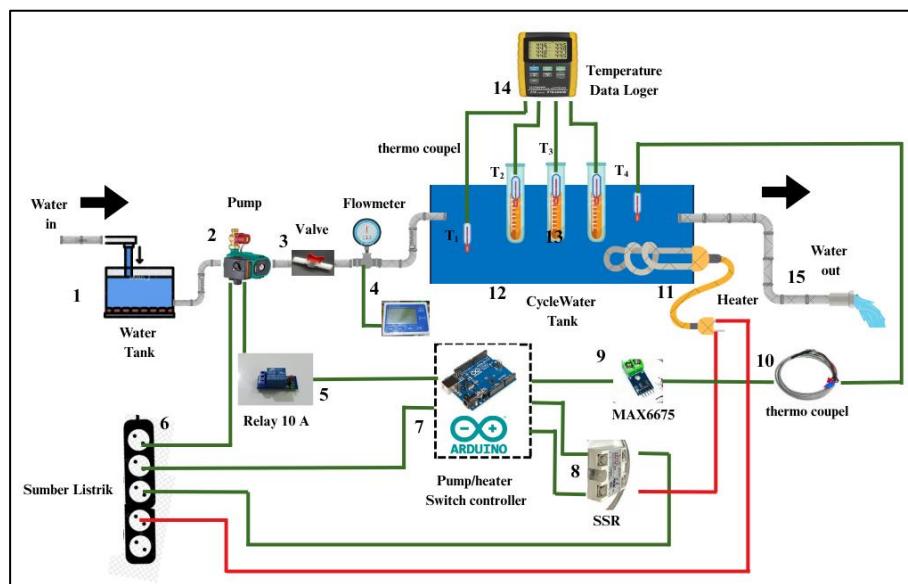
Penelitian yang dilakukan penulis menggunakan material parafin dengan titik leleh 58°C. parafin digunakan karena panas latennya yang tergolong tinggi. Dalam konsep pemanas air dengan panas matahari. Parafin diletakkan didalam tabung reaksi yang diletakan di dalam wadah sirkulasi.



Gambar 3.12 Parafin.

3.3 Skema Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian yang mana bermula dari parafin masih dalam bentuk padat kemudian dicairkan dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi serta dilakukan penimbangan para parafin tersebut supaya ke tiga tabung reaksi memeliki selisih yang sangat kecil. Parafin akan mengalami selama satu siklus bergantian peleahan dan pemadatan dimana fluida berupa air dipanaskan di tempat wadah berisi air yang kemudian panasnya untuk parafin mencair kemudian aliran air panas dihentikan selanjutnya fluida dingin dialirkan untuk mendinginkan parafin hingga parafin 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*. Instalasi alat pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut ini:



Gambar 3.13. Instalasi alat pengujian.

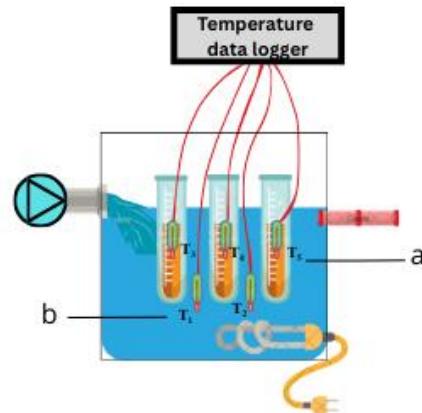
Keterangan:

1. Sumber air dan Tangki air.
2. Pompa.

3. katup.
4. *Flowmeter*.
5. Relay 10 A.
6. Sumber listrik.
7. Pengontrol Arduino.
8. SSR.
9. Max6675.
10. *Thermocoupel*.
11. *Heater*.
12. Wadah sirkulasi.
13. Tabung reaksi.
14. *Data logger*.
15. Keluar air panas.

3.4 Penempatan Titik Pengukuran

Berikut adalah gambar letak pengambilan data:



Gambar 3.14. Penempatan titik pengukuran.

Keterangan letak pengukuran *temperature*:

- a. Wadah parafin bagian dalam nomor
- b. Air dalam wadah nomor

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Digunakan sejumlah termokopel untuk melakukan pengukuran temperatur. Pertama pada pengujian ini penulis menggunakan kontrol otomatis yaitu sebuah arduino untuk mengatur hidup dan mati instrumen pemanas dan pompa dimana pemanas dilengkapi SSR dan pompa dilengkapi dengan relay 10 A.

Proses pemanasan yang terjadi karena pemanas dihidupkan pada temperatur di bawah 35°C atau pada temperatur di atas 75 °C kondisi ini terjadi saat wadah sirkulasi harus dalam kondisi terisi air karena jika tidak maka pemanas akan tetap hidup dan dapat berakibat wadah sirkulasi memuoi karena panas. Setelah temperatur parafin sampai ke 75 °C pemanas akan otomatis mati kemudian pompa akan memasukan air dingin untuk menurunkan temperatur air dalam wadah utama berisi parafin air keluar dari dari wadah utama lalu disirkulasikan keluar wadah ke lingkungan yang telah disiapkan. $T_{1,2,3}$ parafin merupakan temperatur parafin yang diletakkan di dalam botol kaca 10 ml pengujian yang berjumlah 3 pada posisi atas dan tidak dapat dimasuki air dimana ujung tabung reaksi berjarak 3 cm dari air pada wadah. Mengukur debit aliran air dengan *water flow meter* akan disambungkan dengan pipa penghubung diantara dan katup. Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 detik dengan menggunakan data *logger*. Percobaan dilakukan sebanyak 200, 400, dan 600 siklus dan dengan waktu 16 menit/siklus.

3.5 Metode Pengambilan Data

Adapun metode yang digunakan penulis yaitu pengujian *temperature history*, DSC, FTIR, dan konduktivitas.

3.5.1 Metode pengambilan data *temperature history*

Metode pengambilan data pengujian *temperature history* yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pompa air, *thermocouple* dan *data logger*, *water flow meter sensor*, pemanas air, tempat penampung air, parafin, gelas beker dan katup air.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Menghidupkan data logger dengan *thermocouple* yang sudah terpasang pada material parafin, dengan susunan CH_1 temperatur fluida dalam wadah sirkulasi. Temperatur air di dalam wadah utama berisi parafin, CH_2 , CH_3 , CH_4 , adalah temperatur parafin di dalam tabung reaksi.
4. Memanaskan air yang berada pada tempat penampung air panas dengan temperatur 75°C .
5. Menghidupkan secara otomatis pompa air.
6. Melakukan seting pada kontrol *temperature* untuk mengatur saat *temperature* 35°C *heater* hidup dan kondisi pompa air dingin mati, kemudian saat temperatur parafin di *temperature* 58°C pada kondisi parafin telah mencair. Kemudian saat temperatur 75°C heter mati selanjutnya pompa hidup untuk melakukan sirkulasi pendinginan sampai parafin mencapai temperatur 35°C pada kondisi satu kali peleahan dan satu kali pendinginan merupakan satu siklus sistem. Sirkulasi air dingin terjadi ke parafin yang telah mencair kemudian air yang telah bersirkulasi akan masuk ke wadah akhir sirkulasi yang memeliki ukuran yang besar supaya air panas tidak berpengaruh terhadap temperaturnya setelah itu dari wadah penampung air sisa

akan masuk ke wadah air dingin karena adanya perbedaan posisi (posisi wadah air sisa sirkulasi lebih tinggi) dengan menggunakan penghubung pipa/selang.

7. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 10 detik sebagai rentang perubahan fasa peleahan dan pembekuan material parafin.
8. Menghidupkan *water flow meter* sensor untuk melihat kecepatan aliran air dingin.
9. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air atur pada kecepatan 1,5 l/min.
10. Biarkan air bersiklus hingga temperatur air di dalam tempat penampung air mengalami pemanasan optimal dari parafin yang menyimpan panas dengan memantau perubahan fasa sampai pada siklus 200, 400 dan 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 *thermal history*.
15. Selesai.

Pengambilan data ini dilakukan secara langsung dengan melakukan eksperimen pada wadah berisi parafin 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 dikehendaki dan sudah konstan, kemudian air tersebut dialirkan ke kedalam wadah penampung utama berisi parafin. Untuk mengetahui temperatur pada parafin dan juga air digunakan *thermocouple*, serta untuk mengetahui kecepatan

aliran air digunakan *flowmeter*, sehingga akan didapatkan data data yang diperlukan.

3.5.2 Pengujian *Differential Scanning Calorimetry*

Pengujian ini dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Persiapan Alat Hidupkan unit catu daya utama (UPS).
2. Hidupkan komputer, *stepdown transformer* dan perangkat antarmuka *thermal analyzer*.
3. Hidupkan alat DSC-60Plus dan *Flow Control Unit*, pastikan tombol-tombol Purge dalam keadaan “close” dan kran regulator gas pada posisi “open”.
4. Jalankan *software* “TA-60WS Collection Monitor” yang terdapat pada desktop. Setelah muncul jendela “*detector*” pilih “DSC-60”. Tutup jendela “*detector*” dan biarkan jendela “TA Acquisition” terbuka.
5. Preparasi sampel, Siapkan dua buah pan sampel sesuai jenis sampel yang akan diuji (padat/cair). Salah satu pan digunakan sebagai reference dan yang lain untuk sampel.
6. Siapkan plastik ctik untuk wadah pan sampel yang akan diuji dan berilah label kode sampel.
7. Timbanglah sampel yang akan diuji sesuai kapasitas volume pan menggunakan timbangan mikro atau semi mikro. Tulis hasilnya pada label plastik.
8. Masukkan sampel ke dalam pan. Lakukan *crimping/sealing* dengan alat SSC-30, kecuali jenis pan tertentu yang tidak diizinkan untuk di-*crimp/seal*.
9. Bukalah penutup *cell* pada alat DSC-60, berikut kedua penutup *furnace*. Gunakan pinset/tweezers untuk membuka penutup *furnace*.
10. Tempatkan pan kosong/reference pada plat detector sebelah kiri dan pan sampel pada plat detektor sebelah kanan.
11. Pasang kembali penutup *furnace* dan penutup *cell*.

12. *Scanning*, Buka *setting* parameter pada jendela “TA Acquisition” dan aturlah program temperatur sesuai yang ditentukan customer atau sesuai referensi yang ada.
13. Lengkapi informasi terkait sampel yang akan discan pada “*file information*”.
14. Tekan tombol “*START*” pada *toolbar*. Isikan nama file scara spesifik dan pilih folder tempat menyimpan file hasil *scan*. Klik tombol start untuk memulai scanning.
15. Periksa dan pastikan laju alir gas pada *flow control* unit sesuai dengan yang telah diset.
16. Tunggu hingga proses *scan* selesai dan temperatur *furnace* kurang dari 50 °C.
17. Buka *furnace cover* dan ambil kedua pan.
18. Tutup *furnace cover* dan jalankan operasi “*cleaning*” untuk membersihkan plat detektor.
19. Setelah proses “*cleaning*” selesai, tunggu temperatur furnace turun mencapai temperatur kamar (25 °C), alat siap digunakan untuk pengujian sampel berikutnya.
20. Jalankan *software* “TA60” dari desktop atau klik menu *analysis* dari *TA Acquisition*.
21. Buka file yang akan dianalisis.
22. Lakukan analisis sesuai permintaan customer dengan merujuk pada buku petunjuk teknis analisis. Analisis dilakukan untuk tiap-tiap sampel secara terpisah.
23. Simpan file hasil analisis dengan nama baru yang sesuai.

3.5.3. Prosedur Pengujian Konduktivitas *Thermal*

A. Persiapan Sampel

1. Memotong sampel dengan ukuran (10cm x 5cm x 2cm) kemudian dibersihkan dari debu,minyak dan kotoran pada permukaan

2. Sampel yang akan diuji diletakan di ruang labolatorium hingga mencapai temperatur kestibangan dengan lingkungan (± 30 menit)
3. Memastikan permukaan sampel halus dan rata untuk mendapatkan kontak termal yang baik antara probe dengan permukaan sampel.
4. Mengkalibrasi alat konduktivitas termal dengan model QTM-500, dengan cara menjalankan *self-test* dan pengukuran standar dengan material referensi untuk memastikan akurasi alat.
5. Memasang sensor *probe* pada unit QTM-500.
6. Menempatkan sensor probe tegak lurus pada permukaan sampel dengan tekanan ringan dan seragam agar tidak menimbulkan ronggga udara di antar sensor dan permukaan sampel.
7. Menenkan tombol *START* dan alat akan mengukur konsuktivitas termal, Nilai konduktivitas ditampilkan pada layar dalam waktu 60 detik setelah kondisi stabil tercapai.
8. Melakukan pengulangan 3 kali dengan titik permukaan yang berbeda.
9. Membersihkan probe menggunakan kain lembut yang dibasahi alkohol agar tetap steril dan tidak terkontaminasi dari sisa sampel.
10. Selesai.

3.5.4. Prosedur pengujian FTIR

1. Menyiapkan sampel palmitat dan stearid dalam bentuk kristal.
2. Menghidupkan FTIR dan Biarkan warm-up sesuai rekomdasi pabrik.
3. Melakukan background kosong sebelum seri pengukuran tiap batch.
4. Mengkalibrasi wavenumber menggunakan standar polustrien.
5. Menyetting alat dengan parameter; rentan spektral: 4000-650 cm⁻¹, resolusi 4 cm⁻¹, jumlah scan 32-64 *scans* dan *mode single beam*.

6. Membersihkan permukaan kristal ATR dengan *alkohol isopropil* dan kain tanpa serat lalu melakukan *background scan*.
- 7 Meletakan sedikit sampel pada permukaan kristal ATR.
8. Mengambil 3 replikasi dari posisi berbeda setiap sampel.
9. Lakukan pembersihan kristal antara sampel.
10. Selesai.

3.5.5. 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 berskala (ketelitian 0,2 mL), *neraca analitik*, pipet atau *syringe*, tissue tanpa serat, dan sampel cair yang akan diuji.
2. Memastikan neraca analitik dalam kondisi stabil dan telah dikalibrasi sebelum digunakan.
3. Membersihkan tabung reaksi dengan alkohol isopropil dan mengeringkannya menggunakan kain tanpa serat.
4. Menimbang tabung reaksi kosong pada neraca, lalu mencatat massa tabung kosong (m kosong).
5. Mengisi tabung reaksi dengan sampel cair hingga volume tertentu sesuai skala $\pm 3,0$ mL dengan ketelitian pembacaan $\pm 0,2$ mL.
6. Memastikan tidak ada gelembung udara dalam sampel dan membaca volume pada posisi meniskus bawah sejajar dengan mata.
7. Menimbang kembali tabung reaksi yang telah berisi sampel untuk mendapatkan massa total (m isi).
8. Menghitung densitas sampel dengan rumus:

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

dimana ρ dalam g/cm^3 .

9. Melakukan pengulangan pengukuran sebanyak tiga kali pada volume yang sama untuk memperoleh nilai rata-rata dan simpangan baku.
10. Mencatat temperatur pengujian untuk referensi densitas karena perubahan temperatur dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
11. Membersihkan kembali tabung reaksi setelah setiap pengujian dan memastikan alat siap untuk sampel berikutnya.
12. Pengujian selesai.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun Kesimpulan dari penelitian mengenai kesetabilan termal parafin adalah sebagai berikut:

Berdasarkan hasil pengujian, parafin menunjukkan ketabilan termal dan fisik yang baik hingga 600 siklus, dengan titik leleh meningkat dari 65,4 °C menjadi 68,9 °C dan titik beku dari 39,6 °C menjadi 41,2 °C. Nilai panas laten DSC naik dari 142,77 J/g pada siklus ke-0 menjadi 160,88 J/g pada siklus ke-200, kemudian menurun menjadi 157,97 J/g pada siklus ke-400 dan 126,02 J/g pada siklus ke-600. Densitas berubah dari 0,71 g/cm³ menjadi 0,74 g/cm³ mengindikasikan parafin menjadi lebih padat. Analisis FTIR tidak menunjukkan gugus fungsi baru dengan pergeseran kurang dari 4 cm⁻¹ dan didukung konduktivitas termal 0,3443 W/mK. Dengan demikian parafin tetap layak digunakan sebagai PCM untuk aplikasi penyimpanan energi termal jangka menengah.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk penelitian selanjutnya dilakukan pengujian siklus lebih lanjut hingga di atas 1000 kali guna mengetahui batas degradasi termal

maksimum dari parafin serta ketahanan jangka panjangnya dalam aplikasi penyimpanan energi.

2. Perlu dilakukan peningkatan konduktivitas termal parafin dengan menambahkan aditif konduktif seperti serbuk grafit, nanopartikel logam, atau karbon nanotube agar efisiensi perpindahan panasnya meningkat tanpa mengurangi kestabilan kimiawi.
3. Pengujian lanjutan menggunakan metode karakterisasi lain seperti pengujian ftir pada siklus 200, 400, dan 600 untuk mengamati perubahan tingkat kristalinitas parafin setelah melalui siklus termal berulang.
4. Percampuran antara parafin dan PCM lain untuk melihat perbedaan panas latennya akan memberikan pemahaman mengenai perbedaan ketahanan termal, kapasitas penyimpanan energi, dan degradasi antar material.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariwibowo, A., Irsyad, M., dan Amrul, A. (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. *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 4(1), 35–44. <https://doi.org/10.46574/motivection.v4i1.107>
- Asif, M., Rabbi, J., dan Bibi, W. (2024). An experimental investigation of porosity gradient and staggered arrangements in packed bed thermal energy storage. *Energy Storage*, 6(1). <https://doi.org/10.1002/est2.522>
- Bogdanov, I., Morozova, Y., Altynov, A., Titaeva, A., dan Kirgina, M. (2024). Ways to Improve the Effectiveness of Depressant Additives for the Production of Winter and Arctic Diesel Fuels. *Resources*, 13(2), 27. <https://doi.org/10.3390/resources13020027>
- Bora, N., dan Joshi, D. P. (2023). Enhancement in Thermal Properties of Organic Phase Change Material (*Paraffin*) via TiO₂ Foam Doping. *Prabha Materials Science Letters*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.33889/PMSL.2023.2.1.001>
- Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., dan Sopian, K. (2021). *Controlling the melting and solidification points temperature of PCMs on the performance and economic return of the water-cooled photovoltaic thermal system*. *Solar Energy*, 224, 1344–1357. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.003>
- Chang, Z., Wang, K., Wu, X., Lei, G., Wang, Q., Liu, H., Wang, Y., dan Zhang, Q. (2022). Review on the preparation and performance of *paraffin*-based phase change microcapsules for heat storage. *Journal of Energy Storage*, 46, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103840>
- Chen, T., Luo, S., Wang, H., Fu, H., Wang, N., dan Sun, R. (2023). *Paraffin@hBN Phase-Change Thermal Conductive Composite: Preparation and Properties*. *ChemistrySelect*, 8(43). <https://doi.org/10.1002/slct.202301692>
- Darwin, D., Syah, H., dan Yadi, S. (2013). Studi Performansi Alat Pemanas Air dengan Menggunakan Kolektor Surya Plat Datar. *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia*, 5(3). <https://doi.org/10.17969/jtipi.v5i3.1979>
- Dong, K., Gu, X., Peng, L., Liu, P., Jiang, S., dan Bian, L. (2022). Recent advancements in typical mineral-encapsulated form-stable phase change materials for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 52, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104931>

- Eleiwi, M. A., Mokhlif, N. D., dan Saleh, H. F. (2023). *Improving the performance of the thermal energy storage of the solar water heater by using porous medium and phase change material. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 2013–2026. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2185316>
- El-Sebaii, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., Samy, N., El-Sayed, A. R., dan Shalaby, S. M. (2024). Enhancing the thermal properties of *paraffin* wax as latent heat storage material using hybrid nanomaterials. *Characterization and Application of Nanomaterials*, 7(1). <https://doi.org/10.24294/can.v7i1.4912>
- Fan, Z., Zhao, Y., Liu, X., Shi, Y., dan Jiang, D. (2022). Development of a new composite material for building energy storage based on lauric acid-palmitic acid-*paraffin* ternary eutectic and expanded perlite. *Journal of Energy Storage*, 53, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105136>
- Fan, Z., Zhao, Y., Liu, X., Shi, Y., dan Jiang, D. (2022). Thermal properties and reliabilities of myristic acid-*paraffin* wax binary eutectic mixture as a phase change material for solar energy storage. *RSC Advances*, 12(20), 12303–12309. <https://doi.org/10.1039/d1ra09238c>
- Gao, M., Zhao, S., Yang, H., Wu, X., dan Xiao, Y. (2024). An Analysis of the Influence of DSC Parameters on the Measurement of the Thermal Properties of Phase-Change Material. *Materials*, 17(23). <https://doi.org/10.3390/ma17235689>
- Goh, B. H. H., Chong, C. T., Ong, H. C., Seljak, T., Katrašnik, T., Józsa, V., Ng, J.-H., Tian, B., Karmarkar, S., dan Ashokkumar, V. (2022). Recent advancements in catalytic conversion pathways for synthetic jet fuel produced from bioresources. *Energy Conversion and Management*, 251, 114974. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114974>
- Herlambang, Y. D., Prasetyo, B., Wahyono, W., Apriandi, N., Marliyati, M., dan Sutanto, B. (2023). Unjukkerja Panel Surya Tipe Terapung untuk Pembangkit Listrik. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 18(3), 435. <https://doi.org/10.32497/jrm.v18i3.5069>
- Hossain, M. S., Kumar, L., dan Nahar, A. (2021). *A Comparative Performance Analysis between Serpentine-Flow Solar Water Heater and Photovoltaic Thermal Collector under Malaysian Climate Conditions*. *International Journal of Photoenergy*, 2021, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/7176506>
- Irsyad, M., Amrizal, Harmen, Amrul, Susila Es, M. D., dan Diva Putra, A. R. (2023). Experimental study of the thermal properties of waste cooking oil applied as thermal energy storage. *Results in Engineering*, 18, 101080. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101080>
- Irsyad, M., Tobing, A. H. L., dan Susila, M. D. (2020). *Pemanfaatan material fasa berubah untuk mempertahankan kesegaran sayuran*.

- Kraiem, M., Karkri, M., Fois, M., dan Sobolciak, P. (2023). Thermophysical Characterization of *Paraffins* versus Temperature for Thermal Energy Storage. *Buildings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040877>
- Nabwey, H. A., dan Tony, M. A. (2024). Enhancing the performance of *paraffin*'s phase change material through a hybrid scheme utilizing sand core matrix. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71848-8>
- Nadjib, M., dan Santosa, T. H. A. (2022). Pengaruh Variasi Debit Air Terhadap Unjuk Kerja Termal Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi Phase-Change Material. *JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*, 6(1). <https://doi.org/10.18196/jmpm.v6i1.14795>
- Nishad, S., Ouederni, M., dan Krupa, I. (2025). Thermal energy storage materials designed from recycled Tetra Pak waste and *paraffin* waxes with enhanced photothermal conversion efficiencies. *Energy and Built Environment*, 6(3), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.01.003>
- Pandey, S., Anand, A., Buddhi, D., dan Sharma, A. (2023). Development and thermophysical analysis of binary eutectics phase change materials for solar drying application. *F1000Research*, 11, 1277. <https://doi.org/10.12688/f1000research.127268.2>
- Rahmatunnissa, A., dan Hasannah, C. S. (2023). Analisis Perhitungan Nilai Efektivitas Kinerja Kondensor Pada Proses Penguapan di Pabrik Gula X. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 12(2), 231–238. <https://doi.org/10.29103/jtku.v12i2.13247>
- Rajkant, T., dan Manish, R. (2019). Thermal Stability of *Paraffin* Wax as Phase Change Material in Latent Heat Storage Unit. Dalam *IJREAT International Journal of Research in Engineering and Advanced Technology* (Vol. 7, Nomor 2). www.ijreat.orgwww.ijreat.org
- Reza Dyota Ahmad, Donny Ivananda, Ramadhani Santoso, dan Dyah Ratna Wulan. (2023). ANALISIS NILAI TRANSFER PANAS DALAM HEAT EXCHANGER TYPE 1-1 SHELL AND TUBE ALIRAN COUNTER CURRENT MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 9(2), 130–136. <https://doi.org/10.33795/distilat.v9i2.2688>
- Sarcinella, A., Cunha, S., Aguiar, J., dan Frigione, M. (2024). Thermo-Chemical Characterization of Organic Phase Change Materials (PCMs) Obtained from Lost Wax Casting Industry. *Sustainability (Switzerland)*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/su16167057>
- Tang, J., Xie, Y., Chang, S., Yan, Z., Wu, H., dan Zhang, H. (2022). Performance analysis of acceleration effect on *paraffin* melting in finned copper foam. *Applied Thermal Engineering*, 202, 117826. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117826>

- Wadee, A., Walker, P., McCullen, N., dan Ferrandiz-Mas, V. (2025). The effect of thermal cycling on the thermal and chemical stability of *paraffin* phase change materials (PCMs) composites. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 58(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02556-y>
- Wang, C., Jia, X., Zhao, P., Wang, L., dan Shi, L. (2024). *A review of the application of solid-liquid phase change materials in water heaters*. *Thermal Science*, 28(1 Part B), 409–424. <https://doi.org/10.2298/TSCI230311145W>
- Wang, J., Hao, Y., Zhu, B., Han, T., Li, Z., dan Zhang, J. (2022). Crystalline Behavior of *Paraffin* Wax. *The Journal of Physical Chemistry B*, 126(4), 985–995. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.1c10000>
- Yahya F. Taha, dan Abdul Jabbar N. Khalifa. (2023). *Applications of phase change materials in solar water heating systems: A review*. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 8(2), 078–085. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2023.8.2.0081>
- Yu, C., dan Song, Y. (2023). Modified Supporting Materials to Fabricate Form Stable Phase Change Material with High Thermal Energy Storage. *Molecules*, 28(3), 1309. <https://doi.org/10.3390/molecules28031309>
- Zhang, X., Han, Z., Liu, L., Xia, X., Liu, Q., Duan, Y., dan Wang, X. (2023). Experimental Study on Mechanical and Thermal Properties of Backfill Body with *Paraffin* Added. *Energies*, 17(1), 217. <https://doi.org/10.3390/en17010217>