

**UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS *PALM WAX* RC-162
SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI
*SOLAR WATER HEATER***

(Skripsi)

OLEH:

AKBAR ZAMZAMI

(2115021027)



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

**UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS *PALM WAX* RC-162
SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI
*SOLAR WATER HEATER***

**OLEH:
AKBAR ZAMZAMI**

Skripsi
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

JI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PALM WAX RC-162 SEBAGAI MATERIAL PENYIMPANAN ENERGI DALAM APLIKASI SOLAR WATER HEATER

Oleh :

Akbar Zamzami

Pemanfaatan *phase change material* (PCM) sebagai media penyimpanan energi termal merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan kinerja dan kontinuitas suplai panas pada sistem *solar water heater*. Penelitian ini bertujuan untuk menguji karakteristik perpindahan panas palm wax RC 162 sebagai material penyimpanan energi termal pada aplikasi *solar water heater*. Pengujian dilakukan menggunakan sistem penukar kalor tipe *shell and tube* horizontal, di mana air berfungsi sebagai fluida kerja dan palm wax RC 162 ditempatkan sebagai PCM di sisi *shell*. Parameter yang dianalisis meliputi profil temperatur, laju perpindahan panas, energi termal yang diserap dan dilepaskan, serta karakteristik proses *charging* (peleburan) dan *discharging* (pembekuan) PCM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa palm wax RC 162 memiliki kemampuan penyimpanan energi termal yang signifikan melalui mekanisme panas laten selama proses perubahan fasa. Energi yang diserap PCM pada proses pemanasan relatif lebih besar dibandingkan energi yang dilepaskan pada proses pendinginan, yang dipengaruhi oleh resistansi termal, konduktivitas termal PCM yang rendah, serta terbentuknya lapisan padat selama proses pembekuan. Selain itu, laju perpindahan panas pada proses *charging* lebih tinggi dibandingkan *discharging* akibat perbedaan mekanisme konveksi alami di dalam PCM. Secara keseluruhan, palm wax RC 162 berpotensi digunakan sebagai material penyimpanan energi termal pada sistem *solar water heater* untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas suplai panas.

Kata kunci: Palm Wax RC 162, *Phase Change Material*, Perpindahan Panas, Penyimpanan Energi Termal, *Solar Water Heater*.

ABSTRAK

TESTING THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PALM WAX RC-162 AS AN ENERGY STORAGE MATERIAL IN SOLAR WATER HEATER APPLICATIONS

By :

Akbar Zamzami

The utilization of phase change material (PCM) as a medium for thermal energy storage is one solution to improve performance and continuity of heat supply in solar water heater systems. This study aims to examine the heat transfer characteristics of palm wax RC 162 as a thermal energy storage material in solar water heater applications. Testing was carried out using a horizontal shell and tube heat exchanger system, where water serves as the working fluid and palm wax RC 162 is placed as the PCM on the shell side. The parameters analyzed include temperature profiles, heat transfer rate, thermal energy absorbed and released, and the characteristics of PCM charging (melting) and discharging (freezing) processes. The results show that palm wax RC 162 has significant thermal energy storage capacity through latent heat mechanisms during the phase change process. The energy absorbed by PCM during the heating process is relatively greater than the energy released during the cooling process, which is influenced by thermal resistance, the low thermal conductivity of PCM, as well as the formation of a solid layer during the freezing process. In addition, the heat transfer rate during the charging process is higher than during discharging due to differences in the natural convection mechanism within the PCM. Overall, palm wax RC 162 has the potential to be used as a thermal energy storage material in solar water heater systems to improve efficiency and the stability of heat supply.

Keywords: *Palm Wax RC 162, Phase Change Material, Heat Transfer, Thermal Energy Storage, Solar Water Heater.*

Judul Skripsi : UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS
PALM WAX RC-162 SEBAGAI MATERIAL
PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI
SOLAR WATER HEATER

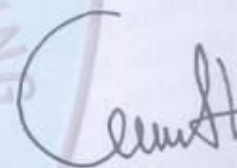
Nama Mahasiswa : Akbar Zamzami
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021027
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

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

NIP. 197112142000121001

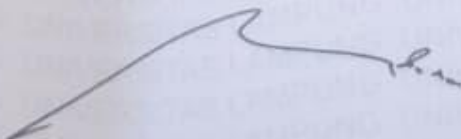
**Ahmad Yonanda, S.T., M.T.**

NIP. 199301102019031008

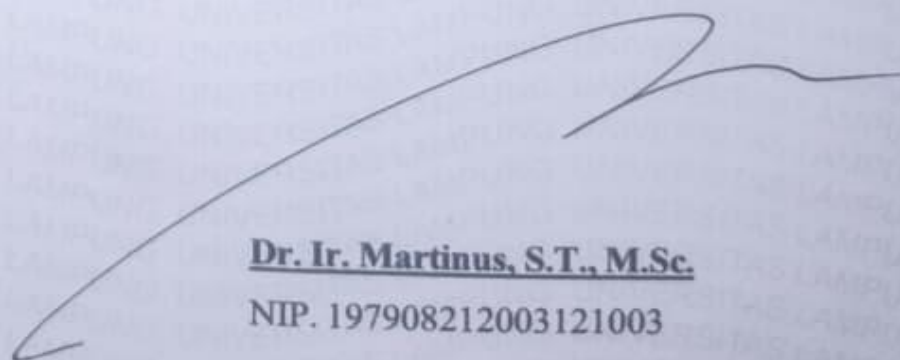
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

**Ahmad Su'udi, S.T., M.T.**

NIP. 197408162000121001

**Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.**

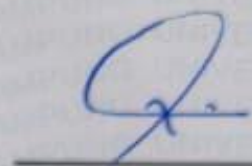
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

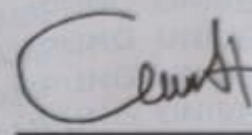
Ketua

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



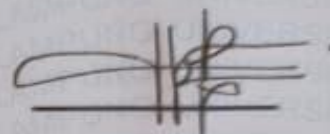
Anggota Penguji

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



Penguji Utama

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



2. Dekan Fakultas Teknik


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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 27 Januari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi berjudul "UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS *PALM WAX* RC-162 SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI *SOLAR WATER HEATER*" merupakan hasil karya saya sendiri. Skripsi ini tidak berisi materi yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik pada perguruan tinggi mana pun, dan sejauh pengetahuan saya tidak mengandung karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Saya bertanggung jawab sepenuhnya atas keaslian dan kebenaran isi skripsi ini sesuai dengan etika keilmuan dan ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 30 Januari 2026

Pembuat pernyataan



Akbar Zamzami

NPM. 2115021027

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, pada tanggal 11 September 2002 sebagai anak terakhir, dari pasangan Bapak Marsito (alm) dan Ibu Nirmayanti. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD NEGERI 03 Kaliawi hingga tahun 2015, lalu dilanjutkan di MTS NEGERI 1 Bandar Lampung yang diselesaikan tahun 2018 dan SMK NEGERI 2 Bandar Lampung yang diselesaikan tahun 2021, hingga pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Selain aktif dalam HIMATEM, penulis pernah menjadi bagian panitia kegiatan yang ada di Jurusan Teknik Mesin. Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di PTPN 1 Regional VII Pagaralam Tahun 2024 dengan judul laporan **“ANALISIS PERFORMANSI MESIN *ROTOR VANE* TERHADAP PROSES PENCACAHAN DAUN TEH HITAM CTC (*CRUSHING TEARING CURLING*) DI PTPN. 1 REGIONAL VII PAGARALAM”**.

Pada tahun 2025 penulis melakukan penelitian dengan judul **“UJI KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS *PALM WAX RC-162* SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI DALAM APLIKASI *SOLAR WATER HEATER*”** dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan Ahmad Yonanda, S.T., M.T. Serta bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. sebagai pembahas.

MOTTO

“Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sampai mereka mengubah diri mereka sendiri.”

(QS. Ar-Ra’d: 11)

“Kesempatan tidak datang dua kali tapi kesempatan datang kepada siapa yang tidak pernah berhenti mencoba”

(Dzawin)

“You have to fight to reach your dream. You have to sacrifice and work hard for it.”

(Lionel Messi)

PERSEMBAHAN



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

SKRIPSI INI PENULIS PERSEMBAHKAN KEPADA

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

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

Seluruh Keluarga Besar Teknik Mesin 2021

Serta

Almamater Tercinta Universitas Lampung

SANWANCANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam dijunjungkan kepada Baginda Rasulllah SAW yang memberikan tuntunan dan syafaatnya kepada umatnya agar berada pada jalan yang lurus. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan lebih lanjut. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ayah Marsito (Alm) dan Ibu Nirmayanti yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ahmad Suudi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. Dosen Pembimbing utama yang telah membimbing serta memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir di perkuliahan.
6. Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.

8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah kalian berikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
9. Kakak-kakak Saya yaitu Arief Hidayatullah (alm), Imam Setiawan dan Pipit Sabrina terima kasih banyak sudah hadir menjadi keluarga yang baik dan pengertian.
10. Keluarga besar grup TA Thermal Storage yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
11. Teman-teman angkatan 2021 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat.
12. Teruntuk Zahra Nur Malita yang sudah membantu dalam pengerjaan skripsi ini walaupun hanya dalam bentuk keluh kesah, cerita dan bantuan logistik kepada penulis, namun tidak bisa dipungkiri bahwa ia telah menyemangati dengan cara lewat belakang layar yang tak kasat mata oleh penulis. Sekali lagi terima kasih banyak.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
PERNYATAAN PENULIS	v
RIWAYAT HIDUP	vi
PERSEMBAHAN.....	viii
SANWANCANA	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Pustaka	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Solar Water Heater (SWH).....	6
2.2 Perpindahan Panas (<i>Heat Transfer</i>)	9
2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	10
2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi.....	11
2.2.3 Perpindahan Panas Radiasi	12
2.3 Phase Change Material (PCM).....	13
2.3.1 Klasifikasi PCM.....	14
2.4 <i>Palm wax</i> Sebagai PCM Alternatif.....	17
2.4.1 Kelebihan dan Kekurangan <i>Palm wax</i> sebagai PCM	18
2.4.2 Sifat-Sifat PCM <i>Palm wax</i>	19
2.5 Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchanger</i>)	22
2.5.1 Aliran Searah Dan Berlawanan Arah.....	22
2.5.2 Jenis-Jenis Alat Penukar Kalor	24
2.5.3 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Tempat Pelaksanaan	29
3.2 Waktu Pelaksanaan.....	29
3.3 Alat dan Bahan	30
3.4 Diagram Alir.....	39
3.5 Jenis Skema Pengujian	41
3.6 Penempatan Titik Pengukuran.....	42
3.7 Metode Pengambilan Data	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Hasil Pengambilan Data	46
4.1.1 Temperatur <i>Palm wax</i>	46

4.2 Hasil Perhitungan	51
4.2.1 Laju Perpindahan Panas	51
4.2.2 Bilangan Reynolds	55
4.2.3 Perhitungan Energi	57
BAB V PENUTUP.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Solar Water Heater System	7
Gambar 2. 2 Perpindahan Panas Konduksi	10
Gambar 2. 3 Perpindahan Panas Konveksi	12
Gambar 2. 4 Klasifikasi Phase Change Material	15
Gambar 2. 5 Palm Wax	18
Gambar 2. 6 Profil Temperatur Aliran Parallel Flow	23
Gambar 2. 7 Profil Temperatur Aliran Counter-Current	24
Gambar 2. 8 Plate-frame heat exchanger	25
Gambar 2. 9 Shell And Tube Heat Exchanger	26
Gambar 3. 1 Pemanas Air	31
Gambar 3. 2 Pompa Air	31
Gambar 3. 3 Penampung Air	33
Gambar 3. 4 Selang Pipa Air Panas	33
Gambar 3. 5 Water Flow Meter	34
Gambar 3. 6 Kontroler suhu dan SSR (Solid state relay)	35
Gambar 3. 7 Data logger dan thermocouple	36
Gambar 3. 8 Shell and Tube Exchanger	37
Gambar 3. 9 Palm wax	38
Gambar 3. 10 Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 3. 11 Skema Sistem Close Loop	41
Gambar 3. 12 Skema Sistem Open Loop	42
Gambar 3. 13 Penempatan titik pengukuran	43
Gambar 4. 1 Perbandingan rata-rata Palm wax suhu 70°C	47
Gambar 4. 2 Perbandingan Rata-rata Palm wax suhu 30°C	49
Gambar 4. 3 Perbandingan laju perpindahan panas	53
Gambar 4. 4 Perbandingan energi air proses pemanasan	60
Gambar 4. 5 Perbandingan energi air proses pendinginan	62

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Pompa Air.....	32
Tabel 3. 2 Spesifikasi Water Flow Meter.....	34
Tabel 3. 3 Spesifikasi kontroler dan SSR	35
Tabel 3. 4 Spesifikasi data logger	36
Tabel 3. 5 Spesifikasi thermocouple	36
Tabel 4. 1 Data Laju Perpindahan Panas Pada Proses Pemanasan	51
Tabel 4. 2 Data Laju Perpindahan Panas Pada Proses Pendinginan	52
Tabel 4. 3 Perhitungan bilangan Reynolds pada suhu 70°C	55
Tabel 4. 4 Perhitungan bilangan Reynolds pada suhu 30°C	55
Tabel 4. 5 Energi Air Pada Proses Pemanasan Dan Proses Pendinginan	57
Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Energi Palm wax Pada Proses Pemanasan	58
Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Energi Palm wax Pada Proses Pendinginan	59

BAB 1

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Kebutuhan air panas dalam kehidupan sehari-hari terus mengalami peningkatan, baik untuk keperluan domestik seperti mandi, mencuci, dan sanitasi, maupun untuk sektor komersial seperti rumah sakit, hotel, dan industri jasa. Pemenuhan kebutuhan air panas tersebut hingga saat ini masih banyak bergantung pada energi listrik dan bahan bakar fosil yang tidak hanya meningkatkan biaya operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan degradasi lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi pemanas air yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Strategi energi berkelanjutan yang akan mengatasi permasalahan kekurangan energi dan memperlambat laju pemanasan global dengan mengurangi CO₂ adalah melalui pemanfaatan energi surya (Marausna dan Waluyo, 2019).

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena letaknya di wilayah tropis dengan intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun. Kondisi ini menjadikan *Solar Water Heater* (SWH) sebagai solusi yang sangat relevan untuk pemanfaatan energi terbarukan dalam memenuhi kebutuhan air panas sehari-hari. Sistem *Solar Water Heater* bekerja dengan mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi panas melalui kolektor surya, yang selanjutnya digunakan untuk memanaskan air. Meskipun demikian, performa sistem SWH konvensional sangat dipengaruhi oleh kondisi

cuaca dan waktu penyinaran matahari, sehingga ketersediaan air panas tidak selalu stabil. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pengembangan *Solar Water Heater* dengan sistem penyimpanan energi termal menjadi fokus utama penelitian dalam beberapa dekade terakhir. Penyimpanan energi sensibel menggunakan air sebagai media masih memiliki keterbatasan dalam kapasitas penyimpanan panas dan laju pelepasan energi. Oleh karena itu, *Phase Change Material* (PCM) mulai banyak dikaji sebagai media penyimpanan energi termal alternatif karena kemampuannya menyimpan energi dalam bentuk kalor laten selama proses perubahan fase, sehingga kapasitas penyimpanan energinya lebih tinggi dibandingkan material sensibel.

Di antara berbagai jenis PCM, *palm wax* menjadi material yang menarik untuk diteliti dalam aplikasi *Solar Water Heater*. *Palm wax* memiliki temperatur leleh yang berada pada rentang suhu kerja air panas domestik, kapasitas kalor laten yang relatif tinggi, serta bersifat ramah lingkungan dan berasal dari sumber daya terbarukan. Selain itu, ketersediaan *palm wax* yang melimpah di Indonesia menjadikannya sebagai kandidat PCM lokal yang ekonomis dan berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap PCM sintetis berbasis minyak bumi. penggunaan PCM berbasis wax dalam sistem *Solar Water Heater* mampu meningkatkan kestabilan temperatur air panas dan memperpanjang durasi pelepasan panas setelah intensitas radiasi matahari menurun. Namun demikian, karakteristik perpindahan panas PCM *palm wax*, khususnya pada proses pemanasan dan pendinginan dalam konfigurasi sistem tertentu seperti *heat exchanger tipe shell and tube*, masih memerlukan kajian lebih lanjut. Perbedaan sifat termofisik antara fase padat dan cair pada *palm wax* dapat memengaruhi laju perpindahan panas, efisiensi penyimpanan energi, serta performa keseluruhan sistem *Solar Water Heater*. Menurut Kurniawati dkk. (2024) *Palm wax* sebagai PCM untuk solar water heater telah diteliti dan dibandingkan dengan paraffin, menunjukkan bahwa *Palm wax* dapat berperan sebagai *bio-PCM* alternatif, terutama di negara tropis. Pada penelitian dari Mofijur dkk. (2019) menyatakan bahwa material bio-based seperti *Palm wax* menawarkan keuntungan lingkungan dibanding paraffin berbasis minyak bumi, karena sumbernya terbarukan dan lebih ramah lingkungan. Penelitian

dari Fort dkk. (2015) menunjukkan bahwa *Palm wax* yang di-impregnasi dengan material berpori menghasilkan PCM komposit yang lebih stabil dan cocok untuk latar belakang aplikasi penyimpanan panas pada rentang suhu yang relevan dengan SWH. Temuan ini sangat penting karena mengungkapkan bahwa di samping peningkatan konduktivitas melalui komposit, pengoptimalan aliran fluida juga memiliki dampak signifikan pada performa PCM, khususnya dalam sistem penukar panas. Pada penelitian dari Douvid kk. (2021) mengenai PCM pada sistem *solar water heater* mencakup *Palm wax* sebagai salah satu kandidat *bio-based* PCM yang relevan karena titik leleh-nya yang dekat dengan rentang suhu kerja SWH (sekitar 45 – 65 °C).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai uji karakteristik perpindahan panas *palm wax* sebagai material penyimpanan energi dalam aplikasi *Solar Water Heater* menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai perilaku termal *palm wax*, kontribusinya terhadap peningkatan kinerja sistem *Solar Water Heater*, serta potensi pemanfaatannya sebagai PCM lokal yang berkelanjutan dan aplikatif dalam kehidupan sehari-hari. Untuk memanfaatkan PCM secara maksimal dalam sistem termal seperti pemanas air tenaga surya (SWH), diperlukan rancangan penukar panas (*heat exchanger*) yang efektif guna memastikan proses penyerapan dan pelepasan panas berjalan optimal. Salah satu jenis yang paling sering dipakai adalah penukar panas tipe *shell-and-tube*, di mana fluida panas mengalir melalui pipa bagian dalam (*tube side*), sedangkan PCM ditempatkan di bagian luar (*shell side*). Konfigurasi ini memfasilitasi perpindahan panas yang efisien tanpa adanya kontak langsung antara kedua fluida. Penelitian ini fokus pada analisis sifat perpindahan panas dari *Palm wax* sebagai bahan perubahan fasa (PCM) dalam penerapan pemanas air tenaga surya dengan menggunakan penukar panas tipe *shell-and-tube*.

1.2 Tujuan Pustaka

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan durasi yang diperlukan *Palm wax* untuk mengalami perubahan fasa dalam kondisi operasional sistem pemanas air tenaga surya.
2. Menganalisis karakteristik perpindahan panas dari air panas ke *Palm wax* sebagai *phase change material* (PCM) dalam sistem pemanas air tenaga surya yang menggunakan *type shell and tube exchanger*.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Material PCM yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Palm wax* . Penelitian ini tidak membandingkan material perubahan fasa lainnya seperti paraffin, palmitat, asam stearat maupun campuran PCM lainnya.
2. Alat penukar panas yang digunakan pada penelitian ini adalah *shell and tube exchanger tipe horizontal*.
3. Suhu yang digunakan pada penelitian ini adalah pemanasan 30°C dan pendinginan 70°C. Parameter yang digunakan juga bervariasi yaitu 8, 10, dan 12 liter per menit (L/menit).
4. Fluida yang digunakan adalah air dengan pH sekitar 7,5 yang berfungsi sebagai media pemanasan dan pendinginan pada penelitian ini.
5. Pengukuran yang dilakukan hanya suhu, waktu, laju aliran dan energi air serta energi PCM *Palm wax* .
6. Pengujian ini dilakukan di luar ruangan (outdoor) tanpa mempertimbangkan pengaruh terhadap perubahan suhu lingkungan.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematik penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. PENDAHULUAN

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

2. TINJAUAN PUSTAKA

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

3. METODOLOGI PENELITIAN

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

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

5. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

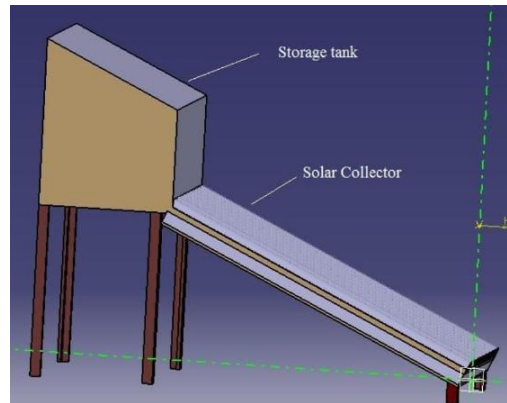
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Solar Water Heater* (SWH)

Pemanas air tenaga surya merupakan sistem konversi energi yang menggunakan radiasi matahari sebagai sumber panas untuk meningkatkan temperatur air sehingga dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi. Efisiensi termal *solar water heater* bergantung pada jenis kolektor, intensitas radiasi matahari, dan temperatur air yang dibutuhkan. Kolektor surya dengan beberapa modifikasi dapat mempengaruhi pantulan radiasi matahari yang datang dan meningkatkan jumlah panas yang diterima sehingga efisiensi termal dapat ditingkatkan. Pemanas air tenaga surya telah menarik perhatian karena manfaatnya yang besar dalam hal pelestarian sumber daya, pengurangan investasi peralatan, biaya, dan jangka waktu pengoperasian.

Sistem aktif pada *solar water heater* adalah sistem pemanas air tenaga surya yang menggunakan peralatan tambahan seperti pompa dan kontroler untuk mengalirkan fluida kerja dari kolektor surya ke tangki penyimpanan. Sirkulasi fluida pada sistem ini tidak bergantung pada perbedaan massa jenis akibat perubahan suhu, melainkan dikendalikan secara mekanis atau elektrik. Sedangkan sistem pasif pada *solar water heater* adalah sistem pemanas air tenaga surya yang bekerja tanpa menggunakan pompa atau perangkat mekanis tambahan, melainkan memanfaatkan sirkulasi alami (termosifon) akibat perbedaan massa jenis fluida karena perbedaan suhu.



Gambar 2. 1 *Solar Water Heater System*

Sumber : (Vijay dkk, 2013)

Pada gambar 2.1 merupakan gambar dari sistem pemanas air tenaga surya. Dimana pemanas air tenaga surya adalah perangkat yang terutama digunakan untuk memanaskan air. Perangkat ini dioperasikan oleh matahari, oleh karena itu disebut sebagai pemanas air tenaga surya. Pemanas air ini terdiri dari berbagai komponen seperti pelat penyerap, casing, pipa, tangki penyimpanan, dan lain-lain. Adapun dua jenis utama system pemanas air tenaga surya yaitu sistem pasif dan sistem aktif (Vijay dkk., 2013).

Prinsip kerja *solar water heater* didasarkan pada penyerapan radiasi matahari oleh kolektor surya yang kemudian dikonversi menjadi energi panas dan ditransfer ke fluida kerja, umumnya air. Proses perpindahan panas dalam sistem ini melibatkan mekanisme radiasi saat energi matahari diserap oleh permukaan kolektor, konduksi panas melalui material kolektor, serta konveksi panas antara kolektor dan fluida yang mengalir di dalamnya. Kinerja solar water heater dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, desain dan jenis kolektor, kondisi lingkungan, serta konfigurasi sistem penyimpanan energi panas yang digunakan. Komponen utama dalam sistem solar water heater terdiri atas kolektor surya, tangki penyimpanan air panas, pipa saluran fluida, sistem penukar panas, dan perangkat pendukung lainnya. Kolektor surya berfungsi sebagai alat utama penyerap energi matahari, yang umumnya berupa kolektor pelat datar (*flat plate collector*) atau kolektor tabung vakum (*evacuated tube collector*), di mana permukaan absorber dilapisi material selektif untuk meningkatkan penyerapan panas dan mengurangi kehilangan

energi. Tangki penyimpanan berfungsi menyimpan air panas hasil pemanasan, sehingga air dapat digunakan meskipun radiasi matahari sudah berkurang. Pipa saluran fluida berperan mengalirkan air dari kolektor menuju tangki dan sebaliknya, baik secara alami melalui sirkulasi termal (*thermosiphon*) maupun secara paksa menggunakan pompa.

Selain komponen utama tersebut, *solar water heater* juga dilengkapi dengan sistem penukar panas, terutama pada sistem yang terintegrasi dengan media penyimpanan energi termal seperti *phase change material* (PCM). Penukar panas, misalnya *tipe shell and tube*, berfungsi memfasilitasi perpindahan panas antara air dan media penyimpanan tanpa mencampurkan kedua fluida tersebut. Perangkat pendukung lainnya meliputi pompa sirkulasi yang berfungsi mengatur laju aliran fluida, katup dan kontrol temperatur untuk menjaga keamanan serta kestabilan operasi, isolasi termal untuk mengurangi kehilangan panas ke lingkungan, serta rangka penyangga kolektor yang berfungsi menjaga posisi dan sudut kemiringan kolektor agar optimal terhadap arah datangnya radiasi matahari. Keseluruhan komponen tersebut bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan sistem solar water heater yang efisien, stabil, dan andal dalam menyediakan air panas. Kinerja keseluruhan *solar water heater* dievaluasi berdasarkan beberapa parameter, antara lain temperatur air masuk dan keluar, laju aliran fluida, energi panas yang diserap dan dilepaskan, serta efisiensi termal sistem. Kehilangan panas dapat terjadi melalui radiasi, konveksi, dan konduksi ke lingkungan, terutama pada kolektor, pipa, dan tangki penyimpanan, sehingga penggunaan isolasi termal yang baik menjadi faktor penting dalam perancangan sistem.

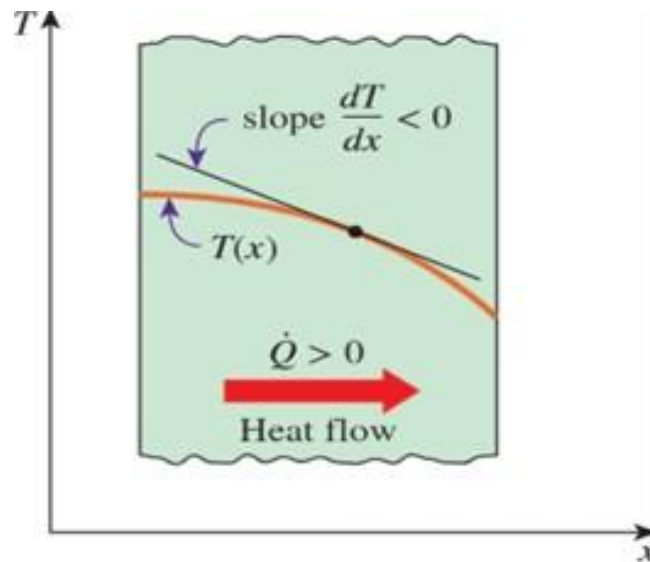
2.2 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Peristiwa dimana energi bergerak dari suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah disebut dengan perpindahan panas. Temperatur adalah besaran fisika yang dimiliki oleh dua atau lebih benda yang berada didalam kesetimbangan termal. Karakteristik material yang berhubungan dengan termal sangat menentukan keberhasilan jumlah panas yang dipindahkan (Jamilah dkk., 2021). Penukar kalor, Pemanas air, dan sistem pendingin sangat bergantung pada seberapa efisien proses perpindahan panas yang terjadi didalamnya. Secara umum tiga mekanisme perpindahan panas utama adalah konduksi, konveksi, dan radiasi. Masing-masing mekanisme memiliki fitur dan cara kerjanya sendiri. Perpindahan panas melalui suatu medium padat karena suhu yang berbeda antara partikel dalam material disebut konduksi. Konveksi adalah perpindahan panas bersama dengan gerakan massa fluida. Radiasi, disisi lain adalah proses perpindahan panas yang terjadi tanpa medium. Sebaliknya, itu terjadi melalui gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh permukaan benda.

Dalam proses konduksi, perpindahan panas dipengaruhi oleh laju aliran fluida dan perbedaan suhu antara permukaan dua fluida. Dalam mekanisme konveksi, Perpindahan panas dipengaruhi oleh suhu absolut permukaan dan sifat optik material, seperti emisivitas. Dalam penerapannya, sering kali ketiga mekanisme perpindahan panas tersebut terjadi secara bersamaan. Sebagai contoh, pada sistem perpipaan uap air, energi panas dari uap berpindah ke dinding pipa melalui mekanisme konduksi, kemudian ke udara luar melalui konveksi, dan sebagian panas juga dipancarkan ke lingkungan melalui radiasi. Oleh karena itu, dalam perancangan dan analisis sistem perpindahan panas, ketiga mekanisme tersebut harus diperhitungkan secara komprehensif guna memperoleh performa sistem yang optimal dan efisien (Cengel & Ghajar, 2022).

2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi merupakan salah satu mekanisme perpindahan panas yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur pada suatu medium padat, tanpa disertai perpindahan massa atau pergerakan makroskopik dari partikel-partikelnya. Energi panas bergerak dari suhu tinggi ke suhu rendah diantara partikel dalam material dan proses ini terjadi di dalam material. Fenomena konduksi sangat bergantung pada karakteristik material yang dilalui, seperti jenis bahan, struktur mikroskopiknya, serta tingkat kekonduksian termalnya.



Gambar 2. 2 Perpindahan Panas Konduksi

Sumber : (Cengel dan Ghajar, 2020)

Persamaan dasar Perpindahan panas secara konduksi dasar Hukum Fourier dapat dinyatakan dengan persamaan:

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

Dimana :

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

A : Luas penampang (m^2)

K : Konduktivitas termal (W/m.K)

T : Temperatur (K)
 X : Tebal (m)

Konduksi melalui *shell* bentuk silinder (pipa) dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A_r \frac{dT}{dr} = -2k\pi r l \frac{dT}{dr} \quad (2.2)$$

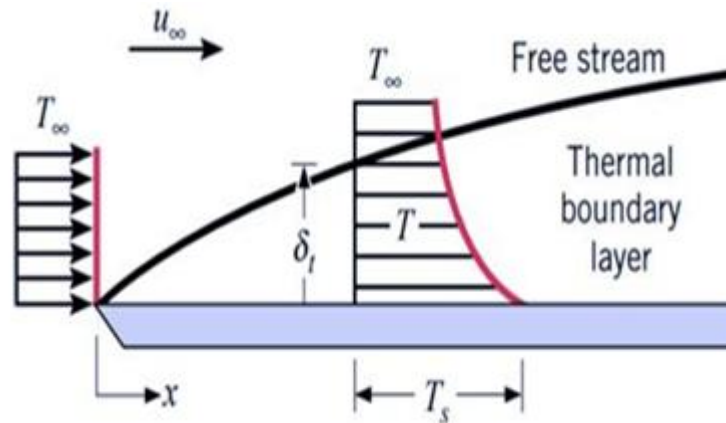
Dimana:

A_r : Luas permukaan silinder (cm²)
 r : Jari-jari silinder (cm)
 l : Panjang silinder (cm)

2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi

Dalam interaksi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak, perpindahan panas konveksi adalah mekanisme penting dalam proses transfer energi termal. Selama proses ini, energi panas bergerak melalui media fluida, yang dapat berupa cairan atau gas. Arah aliran dan perbedaan suhu antara permukaan padat menentukan posisi media penghantar. Fenomena ini banyak ditemui pada berbagai sistem teknik seperti pemanas fluida, pendingin udara, dan sistem penukar kalor. Secara umum, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu konveksi alami (*natural convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Konveksi alami terjadi apabila aliran fluida disebabkan oleh perbedaan kerapatan akibat gradien suhu dalam sistem, tanpa adanya pengaruh dari gaya luar. Sebaliknya, konveksi paksa terjadi ketika aliran fluida dipengaruhi atau dibangkitkan oleh gaya eksternal, seperti kipas, pompa, atau alat penggerak mekanis lainnya. Kedua jenis konveksi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda dan penggunaannya tergantung pada kebutuhan sistem termal yang dirancang.

Karakteristik aliran fluida seperti kecepatan, viskositas, dan jenis aliran (laminar dan turbulen) sangat mempengaruhi perpindahan panas melalui konveksi. Oleh karena itu, dalam sistem termal yang mengandalkan konveksi, pengendalian kecepatan aliran fluida menjadi salah satu parameter penting untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas.



Gambar 2. 3 Perpindahan Panas Konveksi

Sumber : (Incropera, 2007)

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

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (2.3)$$

Dimana:

- $\dot{Q}_{\text{conv}}$: Laju perpindahan panas konveksi (W)
- h : Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
- A_s : Luas permukaan perpindahan panas (m^2)
- T_s : Suhu Permukaan ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{∞} : Suhu fluida di sekitarnya ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.3 Perpindahan Panas Radiasi

Karena terjadinya melalui perambatan gelombang elektromagnetik, Radiasi adalah salah satu cara perpindahan panas yang sangat berbeda yang tidak memerlukan media perantara. Radiasi dapat terjadi di ruang

hampa, Ini berbeda dengan konduksi yang membutuhkan kontak antar partikel dan konveksi yang membutuhkan pergerakan fluida. Energi panas berpindah dari suhu yang tinggi ke suhu yang rendah tanpa kontak fisik dalam proses ini. Fenomena ini terjadi karena aktivitas molekul dan atom didalam material dengan suhu diatas 0 Kelvin memancarkan radiasi termal. Efektivitas perpindahan panas melalui radiasi meningkat secara signifikan dalam kondisi ruang hampa, karena tidak adanya media lain yang dapat menyerap atau memantulkan gelombang elektromagnetik tersebut. Sebagai ilustrasi nyata, sinar matahari yang merambat dari permukaan matahari menuju bumi merupakan bentuk radiasi termal yang sangat efisien menempuh jarak sekitar 150 juta kilometer di ruang hampa dan tetap mampu memanaskan permukaan bumi secara signifikan (Incropera, 2011). Dengan rumus perpindahan panas secara radiasi adalah sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.4)$$

Dimana:

- $\dot{Q}_{\text{rad}}$: Laju perpindahan panas radiasi (W)
- ε : Koefisien Emisivitas ($0 < \varepsilon < 1$)
- σ : Konstanta Stefan-Bolzman $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m².K⁴)
- A : Luas permukaan (m²)
- T : Suhu permukaan benda (°K)

2.3 Phase Change Material (PCM)

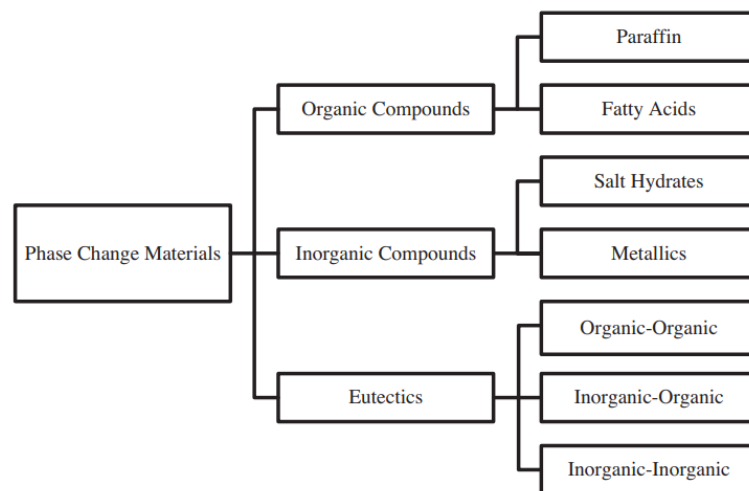
Phase Change Material (PCM) merupakan salah satu jenis material penyimpan energi termal yang memiliki kemampuan untuk mengalami perubahan fasa, biasanya dari bentuk padat ke cair atau sebaliknya, dengan menyerap atau melepaskan energi dalam jumlah besar selama proses tersebut berlangsung. Proses perubahan fasa ini terjadi pada rentang suhu yang relatif konstan, yang

dikenal sebagai titik leleh atau titik beku. Pada kondisi ini, PCM menyerap panas saat mencair dan melepaskan panas saat membeku, tanpa mengalami perubahan suhu yang signifikan. PCM dianggap sebagai material yang efektif untuk menyimpan energi termal, terutama untuk pemanas air tenaga surya (Nadjib dkk., 2022).

Ketika suhu lingkungan meningkat dan melebihi titik transisi fasa, PCM menyerap kalor dari lingkungan dan berubah menjadi fase cair, sehingga energi termal disimpan dalam bentuk panas laten. Kemampuan PCM dalam mempertahankan kestabilan suhu menjadikannya berperan penting dalam sistem manajemen energi. Sebaliknya, ketika suhu menurun di bawah titik transisi, PCM mengalami pembekuan dan melepaskan energi yang tersimpan ke lingkungan. Siklus perubahan fasa ini berlangsung secara *reversibel* dan berulang, menjadikan PCM sangat efektif untuk mengatur fluktuasi suhu. Oleh karena itu, PCM banyak diterapkan dalam sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*), pengendalian suhu bangunan, transportasi termal, serta sistem pendinginan elektronik (Nejat dkk., 2022).

2.3.1 Klasifikasi PCM

Phase Change Material (PCM) merupakan bahan yang mampu menyerap dan melepaskan energi dalam bentuk panas laten selama proses perubahan fasanya. Namun, karena masalah kebocoran PCM selama proses perubahan fase, masa pakai penambahan PCM dalam elemen bangunan menjadi terbatas (Fořt dkk., 2015). Secara umum, PCM dapat diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimianya menjadi tiga kelompok utama, yaitu organik, anorganik, dan eutektik. Pengelompokan ini didasarkan pada karakteristik termal seperti titik leleh dan kapasitas panas laten yang dimiliki oleh masing-masing jenis PCM.



Gambar 2. 4 Klasifikasi *Phase Change Material*

Sumber : (Zhou dkk., 2012)

a. *Phase Change Material* (PCM) Organik

Phase Change Material (PCM) organik merupakan kelompok bahan penyimpan energi termal yang umumnya terdiri dari senyawa hidrokarbon, seperti *Palm wax* dan asam lemak. *Palm wax* merupakan turunan dari minyak kelapa sawit, memiliki struktur kimia yang stabil dan tidak reaktif, menjadikannya pilihan yang populer dalam aplikasi penyimpanan energi termal. Asam lemak, yang berasal dari sumber alami seperti minyak nabati, juga menunjukkan potensi sebagai PCM karena sifat biodegradabilitasnya dan ketersediaannya yang melimpah.

Keunggulan utama dari PCM organik meliputi kestabilan kimia yang baik, tidak bersifat korosif, dan memiliki siklus pembekuan-pencairan yang dapat diulang tanpa degradasi signifikan. Selain itu, PCM organik umumnya tidak mengalami supercooling atau pemisahan fasa selama siklus termal, yang dapat meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi. Namun, kelemahan utama dari PCM organik adalah konduktivitas termal yang relatif rendah, yang dapat

membatasi laju transfer panas selama proses penyimpanan dan pelepasan energi. Selain itu, beberapa PCM organik, seperti *Palm wax*, bersifat mudah terbakar, yang dapat menimbulkan risiko kebakaran dalam aplikasi tertentu.

b. *Phase Change Material (PCM) Anorganik*

PCM anorganik, seperti garam hidrat, memiliki kapasitas panas laten yang tinggi dan konduktivitas termal yang lebih baik dibandingkan PCM organik. Garam hidrat terdiri dari senyawa anorganik yang mengandung air dalam struktur kristalnya, yang memungkinkan penyimpanan energi dalam jumlah besar selama proses perubahan fasa. Keunggulan lain dari PCM anorganik termasuk ketersediaan yang luas dan biaya yang relatif rendah.

Namun, PCM anorganik juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu masalah utama adalah fenomena supercooling, di mana material harus didinginkan ke suhu yang lebih rendah dari titik lelehnya sebelum mengalami kristalisasi, yang dapat menghambat pelepasan panas laten dan menurunkan efisiensi sistem penyimpanan energi. Selain itu, PCM anorganik dapat bersifat korosif terhadap material tertentu, yang dapat membatasi pilihan bahan untuk wadah atau sistem penukar panas. Pada saat air panas mencapai temperatur 40 – 50 °C, maka kolektor surya tidak bekerja secara optimal (Irsyad dkk., 2023).

c. *Phase Change Material (PCM) Eutectic*

PCM eutektik merupakan campuran dari dua atau lebih komponen yang memiliki titik leleh lebih rendah dibandingkan komponen individualnya. Campuran ini dapat berupa kombinasi organik-organik, anorganik-anorganik, atau organik-anorganik, yang

memungkinkan penyesuaian sifat termal sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Keunggulan utama dari PCM eutektik adalah kemampuannya untuk mencair dan membeku pada suhu yang tetap dan tajam, yang menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan kontrol suhu yang presisi.

Selain itu, PCM eutektik umumnya menunjukkan stabilitas termal yang baik dan tidak mengalami pemisahan fasa selama siklus termal, yang dapat meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi. Namun, PCM eutektik juga memiliki beberapa keterbatasan, seperti kapasitas panas laten yang lebih rendah dibandingkan PCM anorganik, dan potensi korosivitas tergantung pada komposisi campurannya. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan sifat termal dan kimia dari PCM eutektik agar dapat digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi penyimpanan energi.

2.4 *Palm wax* Sebagai PCM Alternatif

Palm wax adalah bahan lilin yang berasal dari minyak kelapa sawit yang terdapat pada buah sawit (*Elaeis guineensis*). *Palm wax* tipe RC-162 ini masuk dalam klasifikasi *Phase Change Material* organik dikarenakan berasal dari bahan alami yaitu pohon sawit yang tidak mengandung bahan aditif, Sehingga massa penyimpanannya bisa mencapai waktu 3 tahun. Pada *Palm wax* tipe RC-162 ini memiliki titik leleh nya mencapai 57,55°C dan untuk tipe RC-166 memiliki titik leleh nya mencapai 48°C. *Palm wax* juga memiliki titik lelehnya antara 58 - 60°C (Syahida dkk., 2020) .



Gambar 2. 5 *Palm Wax*

Sumber : (Syahida dkk., 2020)

2.4.1 Kelebihan dan Kekurangan *Palm wax* sebagai PCM

Palm wax sebagai material perubahan fasa (*Phase Change Material*/PCM) banyak memiliki kelebihan dan kekurangan, terutama ketika digunakan untuk penyimpanan energi termal. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan *Palm wax* sebagai penyimpan energi termal.

a. Kelebihan *Palm wax*

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

1. Ramah lingkungan dan terbarukan

Palm wax berasal dari sumber alami (Kelapa sawit) sehingga memiliki kualitas yang tinggi pada material yang digunakan (Iin dkk, 2014).

2. Titik leleh sesuai aplikasi suhu rendah menengah

Palm wax ini mempunyai titik leleh yang besar, mudah memikat aroma dan penguapannya ke udara (Ayu dkk., 2020). Titik leleh *Palm wax* ini berkisar antara 50 - 70 °C, Cocok untuk aplikasi seperti penyimpanan panas air panas domestic atau pendinginan pasif.

3. Stabilitas termal dan kimia baik

Tahan terhadap degradasi dalam siklus pelelehan atau pembekuan berulang, terutama jika dimurnikan. *Palm wax* mempunyai sifat mudah larut dan memiliki tingkat allergen yang kecil (Fitri dkk., 2023).

4. Tidak korosif

Palm wax aman bagi peralatan logam dibandingkan dengan PCM yang berbasis garam.

5. Ketersediaan luas di Negara tropis

Palm wax ini mudah didapat di Negara penghasil kelapa sawit seperti Indonesia dan Malaysia.

b. Kekurangan *Palm wax*

Meskipun memiliki banyak kelebihan, *Palm wax* juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan dalam aplikasinya sebagai PCM:

1. Konduktivitas Termal Rendah

Seperti halnya PCM organik lainnya, *Palm wax* menghantarkan panas dengan buruk, sehingga membutuhkan penambahan enhancer seperti serbuk logam atau grafit.

2. Supercooling dan segregasi komponen

Beberapa jenis *Palm wax* dapat mengalami supercooling atau pemisahan fasa selama siklus yang dapat mengurangi efisiensi penyimpanan panas.

3. Volume perubahan saat fasa berubah

Perubahan volume saat mencair atau membeku bias signifikan, memerlukan desain container yang memperhitungkan ekspansi termal.

4. Stabilitas jangka panjang

Apabila tidak dimurnikan atau dicampur dengan zat aditif yang tepat, sifatnya *Palm wax* bias menurun setelah banyak siklus termal

5. Isu keberlanjutan industry kelapa sawit

Walau secara teknis terbarukan, *Palm wax* menghadapi isu lingkungan (Deforestasi, Biodiversitas) jika tidak dikelola berkelanjutan.

2.4.2 Sifat-Sifat PCM *Palm wax*

Dalam konteks penyimpanan energi termal, *Palm wax* termasuk dalam kategori PCM organik yang memiliki sejumlah sifat fisik dan termal yang

menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi penyimpanan panas, khususnya pada sistem pemanas air tenaga surya dan pengondisian udara pasif.

1. Titik Leleh

Palm wax memiliki titik leleh yang relatif tinggi di antara senyawa PCM organik, yaitu antara 55,75 °C. Nilai ini tergolong ideal untuk aplikasi penyimpanan panas di rentang suhu menengah (medium temperature thermal storage), seperti sistem pemanas air berbasis tenaga surya, penghangat ruangan berbasis energi terbarukan, dan aplikasi industri ringan yang memerlukan pengendalian suhu yang stabil. Titik leleh yang berada di atas suhu ruang juga memastikan bahwa material ini stabil dalam bentuk padat pada kondisi lingkungan umum, sehingga tidak memerlukan sistem pendingin tambahan untuk mempertahankan fasa padatnya.

2. Panas Laten Leleh

Panas laten leleh adalah jumlah energi yang diserap atau dilepaskan oleh suatu material ketika mengalami perubahan fasa tanpa perubahan suhu. *Palm wax* memiliki panas laten leleh yang tinggi, berkisar 146,2 kJ/kg tergantung pada kemurnian dan kondisi operasionalnya. Nilai ini memungkinkan penyimpanan energi panas dalam jumlah besar dalam volume yang relatif kecil, sehingga sangat efisien untuk digunakan dalam sistem penyimpanan energi termal berbasis fasa. Semakin tinggi panas laten suatu PCM, semakin besar pula kapasitas penyimpanan energi dalam sistem termal tersebut.

3. Kapasitas Panas Jenis

Kapasitas panas jenis (c_p) dari *Palm wax* berada dalam kisaran 1,8 - 2,1 kJ/kg·K, yang cukup baik untuk senyawa organik. Kapasitas panas jenis ini mencerminkan kemampuan material dalam menyerap energi sebelum mencapai titik lelehnya. Artinya, sebelum mengalami perubahan fasa, *Palm wax* tetap mampu menyimpan sejumlah energi melalui peningkatan suhu. Gabungan antara kapasitas panas jenis yang cukup tinggi dan nilai

panas laten yang besar menjadikan *Palm wax* sebagai material penyimpanan energi yang efisien dalam dua tahapan proses pemanasan: fase sensibel dan fase laten.

4. Konduktivitas Termal

Salah satu kekurangan umum dari PCM organik termasuk *Palm wax* adalah konduktivitas termalnya yang rendah, yaitu hanya sekitar 0,2 W/m·K. Nilai ini menyebabkan perpindahan panas dari fluida kerja ke material menjadi kurang efisien, yang dapat memperlambat proses pengisian (*charging*) dan pelepasan (*discharging*) energi.

5. Stabilitas Termal dan Kimia

Palm wax menunjukkan stabilitas termal dan kimia yang sangat baik, bahkan setelah mengalami ratusan hingga ribuan siklus perubahan fasa. Dalam berbagai studi, *Palm wax* tetap mempertahankan titik leleh, panas laten, serta integritas strukturalnya setelah digunakan berulang kali dalam sistem penyimpanan energi termal. Kestabilan ini penting untuk menjaga efisiensi jangka panjang dari sistem dan mengurangi kebutuhan penggantian material. Hal ini juga menandakan bahwa *Palm wax* memiliki degradasi termal yang sangat rendah, menjadikannya pilihan andal untuk aplikasi jangka panjang.

6. Non-Korosif dan Ramah Lingkungan

Berbeda dengan beberapa PCM anorganik seperti garam hidrat, *Palm wax* tidak bersifat korosif terhadap logam, sehingga tidak memerlukan penggunaan material pelindung atau pelapis khusus pada alat penukar panas. Selain itu, karena *Palm wax* berasal dari sumber alami dan bersifat biodegradable, penggunaannya dalam sistem penyimpanan energi dianggap ramah lingkungan dan sesuai dengan prinsip pengembangan teknologi berkelanjutan. Ini sangat mendukung integrasi *Palm wax* dalam sistem energi hijau, khususnya pada skala rumah tangga dan komersial kecil.

2.5 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

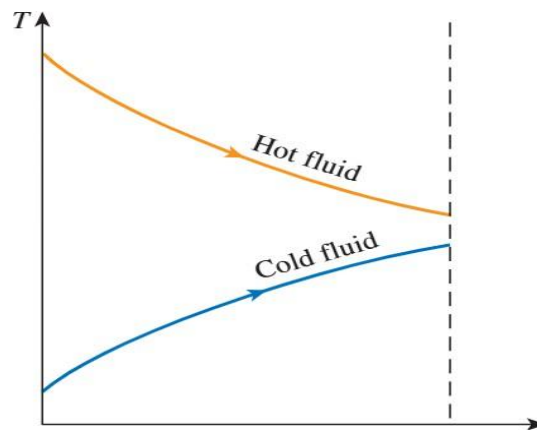
Alat penukar panas secara umum dikenal sebagai *heat exchangers*, merupakan perangkat teknik yang dirancang khusus untuk mentransfer energi panas antara dua jenis fluida yang memiliki perbedaan temperatur, tanpa mengizinkan terjadinya pencampuran langsung antar fluida tersebut. Fungsi utama dari alat ini adalah untuk mengatur temperatur suatu sistem, baik dengan menurunkannya melalui proses pendinginan maupun meningkatkannya melalui pemanasan, tergantung pada kebutuhan termal dalam proses tersebut. Perencanaan sistem termal membutuhkan pengetahuan tentang nilai proses perpindahan panas (As Syukri dkk., 2023). Transfer energi panas dalam alat ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur, di mana kalor secara alami akan mengalir dari fluida bersuhu lebih tinggi ke fluida bersuhu lebih rendah. Dalam pengoperasiannya, perpindahan panas pada heat exchanger melibatkan dua mekanisme dasar, yaitu konveksi pada sisi fluida panas dan fluida dingin, serta konduksi melalui dinding pemisah (biasanya berupa logam) yang berfungsi sebagai media penghantar panas. Dengan demikian, efisiensi perpindahan kalor sangat dipengaruhi oleh karakteristik termofisik fluida, kecepatan aliran, luas permukaan perpindahan panas, serta konduktivitas termal material dinding.

2.5.1 Aliran Searah Dan Berlawanan Arah

a. Aliran Searah

Dalam sistem penukar panas dengan konfigurasi aliran searah atau aliran parallel, fluida panas dan dingin dimasukkan secara bersamaan dari sisi yang sama dari alat penukar panas. Keduanya mengalir sejajar dalam satu arah dan sisi yang sama juga. Suhu antara kedua fluida secara bertahap berkurang sepanjang penukar kalor dikarenakan pola aliran ini. Karena tidak ada perpotongan suhu secara teoritis dalam kondisi ini, suhu maksimum fluida dingin tidak akan pernah

melampaui suhu akhir fluida panas. Keterbatasan ini sering kali menimbulkan kebutuhan akan unit pemanas atau pendingin tambahan untuk mencapai suhu target tertentu, terutama dalam aplikasi yang menuntut efisiensi termal tinggi. Representasi grafik dari distribusi suhu dalam konfigurasi aliran searah ini dapat dilihat pada gambar 2.3.

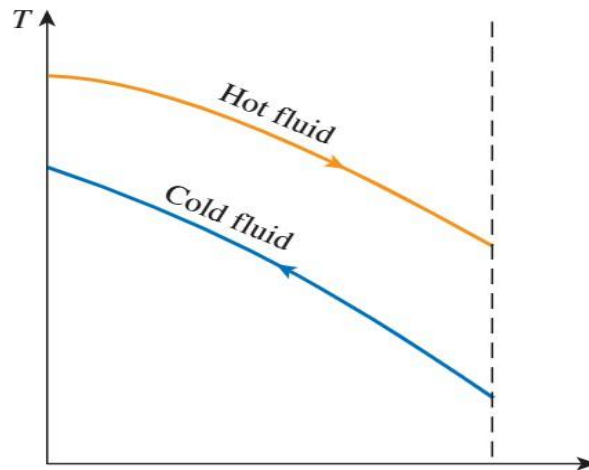


Gambar 2. 6 Profil Temperatur Aliran *Parallel Flow*

Sumber : (Cengel & Ghajar, 2020)

b. Berlawanan Arah

Pada sistem penukar panas dengan konfigurasi berlawanan arah (*Counter flow heat exchanger*), Kedua fluida ini mengalir secara berlawanan, masuk dari sisi yang berlawanan dan keluar dari sisi berseberangan. Dalam sistem ini, perpindahan panas menjadi lebih optimal karena gradien suhu antara kedua fluida dapat dipertahankan sepanjang jalur aliran. Hal ini menyebabkan suhu fluida dingin yang keluar dari penukar panas dapat melebihi suhu fluida panas yang keluar. Dengan keunggulan tersebut, konfigurasi aliran berlawanan arah umumnya dianggap lebih efisien dalam proses pertukaran panas dibandingkan dengan sistem aliran searah, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan efisiensi termal tinggi. Fenomena ini dapat divisualisasikan secara lebih jelas melalui grafik profil suhu aliran berlawanan arah yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Profil Temperatur Aliran *Counter-Current*

Sumber : (Cengel & Ghajar, 2020)

2.5.2 Jenis-Jenis Alat Penukar Kalor

Secara umum, alat penukar kalor (*heat exchanger*) dapat dibedakan ke dalam beberapa tipe berdasarkan berbagai karakteristik, antara lain desain konstruksi, arah aliran fluida, serta mekanisme perpindahan panas yang terjadi di dalamnya. Klasifikasi ini bertujuan untuk menyesuaikan penggunaan *heat exchanger* dengan kebutuhan operasional suatu sistem termal. Pengelompokannya dapat didasarkan pada pola aliran fluida yang meliputi aliran searah (*parallel flow*), berlawanan arah (*counter flow*), atau aliran silang (*cross flow*); bentuk fisik atau struktur seperti pipa ganda (*double pipe*), pelat dan rangka (*plate and frame*), *spiral*, serta tipe *shell and tube*; serta berdasarkan metode kontak antara fluida kerja, yaitu kontak langsung dan tidak langsung. Berikut ini adalah beberapa jenis *heat exchanger* yang umum digunakan:

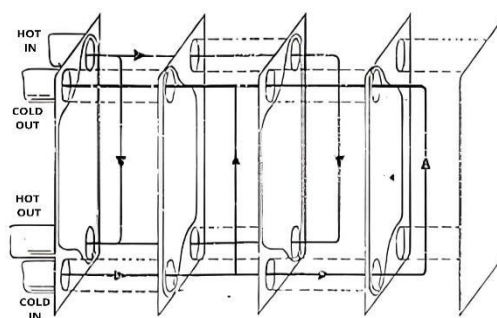
a. Tipe pipa rangkap (*Double pipe heat exchanger*)

Double pipe heat exchanger merupakan salah satu jenis alat penukar kalor yang dirancang dengan dua pipa, dengan satu pipa dimasukkan ke dalam pipa lainnya. Fluida panas dan dingin dapat diatur secara terpisah melalui setiap pipa. Sistem ini biasanya berbentuk memanjang dengan konfigurasi

saluran yang berbentuk 'U' atau melingkar yang menyatu di sepanjang interior pipa, sehingga memudahkan pemindahan fluida tanpa memerlukan sambungan eksternal yang rumit. Aliran fluida dapat diatur secara *parallel flow* (searah) maupun *counter flow* (berlawanan arah), tergantung pada kebutuhan sistem. Salah satu keunggulan dari jenis penukar kalor ini adalah kemampuannya dalam mengakomodasi laju aliran yang rendah, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi skala kecil hingga menengah dengan kebutuhan efisiensi termal yang tinggi serta kemudahan dalam perawatan dan pemasangan.

b. *Tipe plate and frame*

Plate heat exchanger atau penukar panas tipe pelat merupakan salah satu alat penukar kalor yang dirancang untuk memindahkan energi panas secara kontinu dari satu medium ke medium lainnya, tanpa terjadi pencampuran langsung antar fluida. Proses pertukaran kalor berlangsung melalui pelat-pelat tipis yang disusun berlapis, di mana fluida panas dan dingin mengalir secara bergantian di antara celah pelat tersebut. Prinsip kerja alat ini memanfaatkan luas permukaan pelat yang besar untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas.



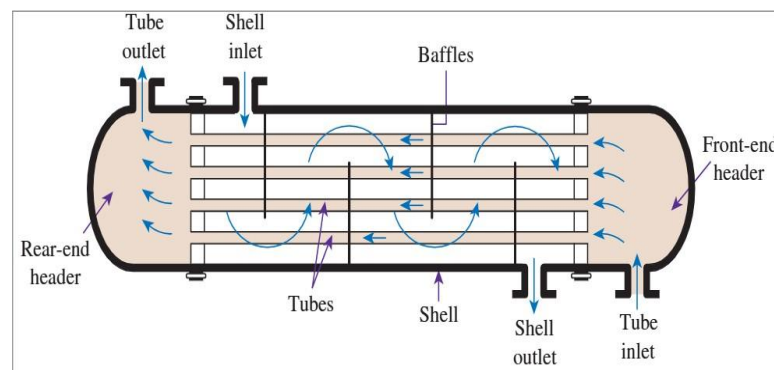
Gambar 2. 8 *Plate-frame heat exchanger*

Sumber : (Syaichurrozi dkk., 2014)

c. *Tipe tabung dan pipa (shell and tube heat exchanger)*

Penukar kalor tipe shell and tube merupakan salah satu jenis alat penukar panas yang paling umum digunakan dalam berbagai industri, termasuk

sistem pemanas air tenaga surya. Alat ini terdiri dari sebuah tabung silinder (shell) yang di dalamnya terdapat sejumlah pipa kecil (tube) yang tersusun sejajar. Pada konfigurasi ini, satu fluida mengalir melalui bagian dalam pipa-pipa tersebut, sementara fluida lainnya mengalir melalui ruang di antara pipa-pipa dalam shell. Proses perpindahan panas terjadi melalui dinding pipa, memungkinkan transfer energi termal tanpa pencampuran langsung antara kedua fluida. Ilustrasi dari aliran dalam penukar panas ini dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2. 9 *Shell And Tube Heat Exchanger*

Sumber : (Cengel & Ghajar, 2020)

2.5.3 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

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

a. Panas Yang Diserap

Dalam disiplin ilmu termodinamika, fokus utama adalah menganalisis perubahan energi internal suatu sistem, terutama yang berkaitan dengan konversi energi dan efisiensi proses. Namun, dalam studi perpindahan panas (*heat transfer*), perhatian difokuskan pada laju perpindahan energi termal dari satu titik ke titik lain akibat perbedaan suhu. Perbedaan ini menjadi dasar pembeda antara kedua bidang tersebut. Ilmu perpindahan panas bertujuan untuk meramalkan laju perpindahan energi dalam bentuk

panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material.

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

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Dimana:

- $\dot{Q}$: Laju perpindahan panas (Watt)
- $\dot{m}$: Laju aliran massa (kg/s)
- c_p : Panas spesifik (J/kg°C)
- ΔT : Perbedaan temperatur (°C)

Kinerja perpindahan panas dalam suatu sistem penukar kalor dapat dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung besarnya energi panas yang diserap atau dilepaskan oleh fluida kerja. Dalam penelitian ini, fluida panas berupa air akan mentransfer kalor ke fluida penyimpan energi termal, yakni *Palm wax* yang berfungsi sebagai *phase change material* (PCM). Besarnya energi yang ditransfer dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kalor sebagai berikut:

$$E_{\text{air}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot t \quad (2.6)$$

Dimana:

- E_{air} : Energi air (Joule)
- t : Waktu perpindahan panas (s)

Perlu diketahui juga dalam menghitung laju perpindahan panas dan juga energi, diperlukan densitas atau massa jenis dari bahan yang digunakan dalam proses perpindahan panas. Dimana persamaan dari massa jenis adalah:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.7)$$

Dimana:

ρ : Massa jenis (Kg/m^3)

m : Massa benda (Kg)

v : Volume benda (m^3)

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

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = \dot{m}H. c_p H. \Delta T_H = \dot{m}C. c_p C. \Delta T_C \quad (2.8)$$

b. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Nilai koefisien ini menggambarkan kemampuan keseluruhan suatu sistem penukar kalor dalam mentransfer energi panas dari satu fluida ke fluida lainnya melalui dinding pemisah. Dengan kata lain, parameter ini merupakan hasil gabungan dari seluruh tahanan termal yang terdapat di antara dua fluida, meliputi tahanan konveksi fluida panas, tahanan konduksi dinding pemisah, serta tahanan konveksi fluida dingin.

$$U = \frac{Q_e}{A \cdot \Delta T} \quad (2.9)$$

Keterangan :

U : Koefisien panas menyeluruh (W/m^2)

c. Efisiensi

Efisiensi sistem *heat exchanger* didefinisikan sebagai rasio antara energi panas aktual yang ditransfer terhadap energi maksimum yang secara teoritis dapat dipindahkan antara dua fluida. Dalam konteks sistem penyimpanan energi termal, efisiensi sangat dipengaruhi oleh laju aliran massa fluida (debit). Debit yang terlalu tinggi dapat menurunkan waktu kontak antara fluida panas dan PCM sehingga proses pelelehan PCM menjadi kurang sempurna. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan debit optimal untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan transfer panas dan efektivitas penyimpanan energi.

$$\eta = \frac{E_{PCM}}{E_{air}} \times 100\% \quad (2.10)$$

Keterangan :

η : Efisiensi termal menyeluruh (%)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Pelaksanaan

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

3.2 Waktu Pelaksanaan

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

1. Studi Literatur

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

2. Persiapan Alat dan Bahan

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

3. Pelaksanaan Pengujian

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

4. Penyusunan Laporan Penelitian

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

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan kebutuhan pengujian karakteristik perpindahan panas *Palm wax* sebagai material penyimpan energi dalam sistem pemanas air tenaga surya. Adapun rincian alat dan bahan yang digunakan dijelaskan sebagai berikut:

1. Alat yang digunakan dalam penelitian

a. Pemanas Air

Pada penelitian ini digunakan pemanas air tipe koil listrik, yaitu alat pemanas yang berfungsi untuk meningkatkan temperatur fluida, khususnya air, hingga mencapai suhu yang diinginkan. Secara prinsip kerja, koil pemanas bekerja serupa dengan elemen pemanas resistif, di mana arus listrik yang mengalir melalui kawat resistif menyebabkan timbulnya panas akibat hambatan listrik. Peran pemanas ini sangat penting dalam menyediakan fluida panas untuk proses perpindahan panas ke material PCM pada sistem pengujian. Adapun pemanas air yang digunakan dalam pengujian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Pemanas Air

b. Pompa Air

Pompa air digunakan untuk mengalirkan air secara kontinu dari penampungan air menuju alat penukar kalor dan kemudian kembali ke penampungan setelah melalui proses perpindahan panas. Dengan adanya sirkulasi ini, distribusi panas dari fluida kerja (air panas) ke material penyimpan energi termal (PCM) dapat berlangsung secara efektif dan merata, sehingga proses perpindahan panas mencapai efisiensi maksimum. Pompa ini bekerja secara kontinu selama pengujian berlangsung guna mempertahankan aliran fluida yang konstan dalam sistem. Dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut:



Gambar 3. 2 Pompa Air

Tabel 3. 1 Spesifikasi Pompa Air

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

c. Penampungan Air

Penampungan air berfungsi sebagai tempat penampungan sementara air sebelum dialirkan ke sistem utama melalui jaringan pipa. Dalam konteks penelitian ini, penampungan air digunakan untuk menyuplai kebutuhan fluida panas secara kontinu ke dalam sistem penukar kalor, khususnya selama proses pelelehan dan pembekuan material perubahan fasa pada *Palm wax*. Air yang disimpan dalam wadah ini dipanaskan terlebih dahulu menggunakan elemen pemanas sebelum dialirkan ke dalam alat penukar kalor untuk mentransfer energi panas ke material PCM. Selain itu, keberadaan penampungan air ini juga mempermudah proses pengisian ulang dan pengontrolan suhu awal air sebelum masuk ke dalam sistem sirkulasi. Penampungan air yang digunakan dapat dilihat seperti pada gambar 3.3 berikut:



Gambar 3. 3 Penampung Air

d. Selang Pipa Air Panas

Dalam sistem pengujian perpindahan panas berbasis material perubahan fasa (PCM), pemilihan komponen pendukung seperti jalur fluida memiliki peranan yang sangat penting guna memastikan efisiensi termal dan keamanan sistem. Pada penelitian ini, digunakan jenis selang pipa khusus yang dirancang untuk mengalirkan fluida panas secara stabil menuju dan dari alat penukar kalor, sesuai dengan skema sistem yang telah dirancang.



Gambar 3. 4 Selang Pipa Air Panas

e. *Water flow meter*

Water flow meter berfungsi untuk mengukur laju aliran volumetrik dari fluida yang mengalir, khususnya dari sisi keluaran pompa menuju alat

penukar kalor. Dengan adanya pengukuran ini, nilai laju aliran massa fluida dapat dihitung berdasarkan hubungan antara laju aliran volumetrik dan massa jenis fluida yang digunakan. Data ini sangat penting dalam analisis perpindahan panas, karena besarnya aliran massa air akan memengaruhi efisiensi transfer energi termal dari fluida panas ke material perubahan fasa (PCM). *Water flow meter* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.5



Gambar 3. 5 *Water Flow Meter*

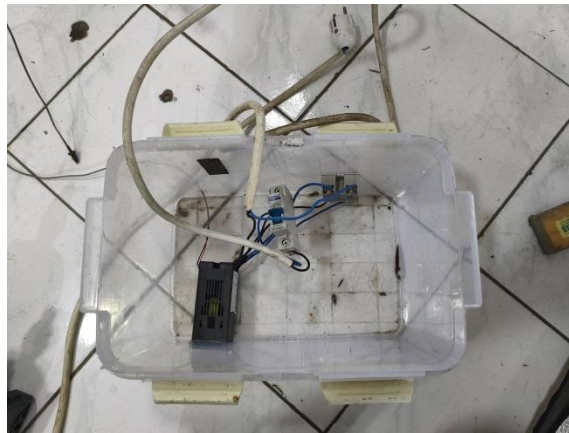
Tabel 3. 2 Spesifikasi *Water Flow Meter*

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

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

Penelitian ini menggunakan *digital dual PID controller* tipe REX-C100 yang dilengkapi dengan sensor suhu berupa termokopel tipe K. Termokopel tipe K dipilih karena memiliki rentang pengukuran suhu yang luas, respons cepat terhadap perubahan suhu, serta tingkat akurasi yang tinggi dalam pembacaan suhu fluida. Kontrol suhu pada penelitian ini berfungsi untuk memantau, mengatur, dan menjaga kestabilan temperatur sistem *solar water heater* selama proses pemanasan dan pendinginan. *Solid State Relay* (SSR) pada penelitian ini berfungsi sebagai saklar elektronik yang menghubungkan dan memutus aliran

listrik ke elemen pemanas atau perangkat pendukung lainnya berdasarkan sinyal dari kontrol suhu.



Gambar 3. 6 Kontroler suhu dan SSR (*Solid state relay*)

Tabel 3. 3 Spesifikasi kontroler dan SSR

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

g. *Data Logger* dan *Thermocouple*

Dalam sistem pengujian perpindahan panas, perangkat *data logger* dan *thermocouple* memiliki peran penting sebagai instrumen pengukuran suhu yang presisi. Termokopel digunakan untuk mendeteksi temperatur pada berbagai titik kritis dalam sistem, seperti suhu material perubahan fasa (PCM) berupa *Palm wax*, temperatur fluida panas yang masuk dan keluar dari alat penukar kalor, serta suhu fluida yang masuk dan keluar dari tangki penampungan air. Penggunaan kombinasi antara termokopel dan *data logger* memungkinkan pemantauan dinamika termal secara kontinu, termasuk fluktuasi suhu selama proses pengisian dan pelepasan energi termal oleh PCM. Informasi ini sangat penting dalam

mengevaluasi performa perpindahan panas serta efisiensi sistem penyimpanan energi yang diuji.



Gambar 3. 7 *Data logger dan thermocouple*

Tabel 3. 4 Spesifikasi *data logger*

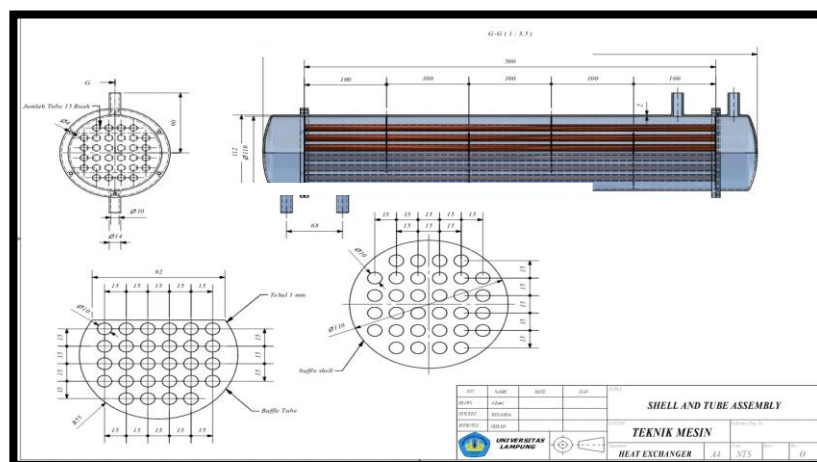
Merk	LU BTM-4208SD
Suhu <i>min/max</i>	-50° s/d 1300 °C
<i>Record external</i>	<i>SD Card</i>
Ketelitian	0,1° C
Maks. <i>Input</i>	12 Saluran

Tabel 3. 5 Spesifikasi *thermocouple*

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

h. Alat Penukar Kalor

Penelitian ini memanfaatkan alat penukar kalor tipe *shell and tube* yang dirancang untuk mengevaluasi kinerja perpindahan panas dari material perubahan fasa berbasis *Palm wax*. Dalam sistem ini, *Palm wax* ditempatkan pada sisi *shell* (bagian luar), sedangkan fluida kerja berupa air mengalir melalui pipa-pipa pada sisi *tube* (bagian dalam). Bagian *tube* terdiri dari sejumlah pipa tembaga yang disusun sejajar di dalam tabung luar. Tembaga digunakan karena memiliki konduktivitas termal tinggi, yang mampu mempercepat transfer energi panas dari fluida ke material perubahan fasa. Sementara itu, sisi *shell* menggunakan tabung berbahan PVC yang berfungsi sebagai wadah penyimpan *Palm wax* dan pelindung sistem secara keseluruhan. Seluruh percobaan dilakukan dalam orientasi horizontal guna menjaga kestabilan distribusi termal dan kestabilan posisi dari material PCM. Konfigurasi alat dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3. 8 *Shell and Tube Exchanger*

2. Bahan yang digunakan dalam penelitian

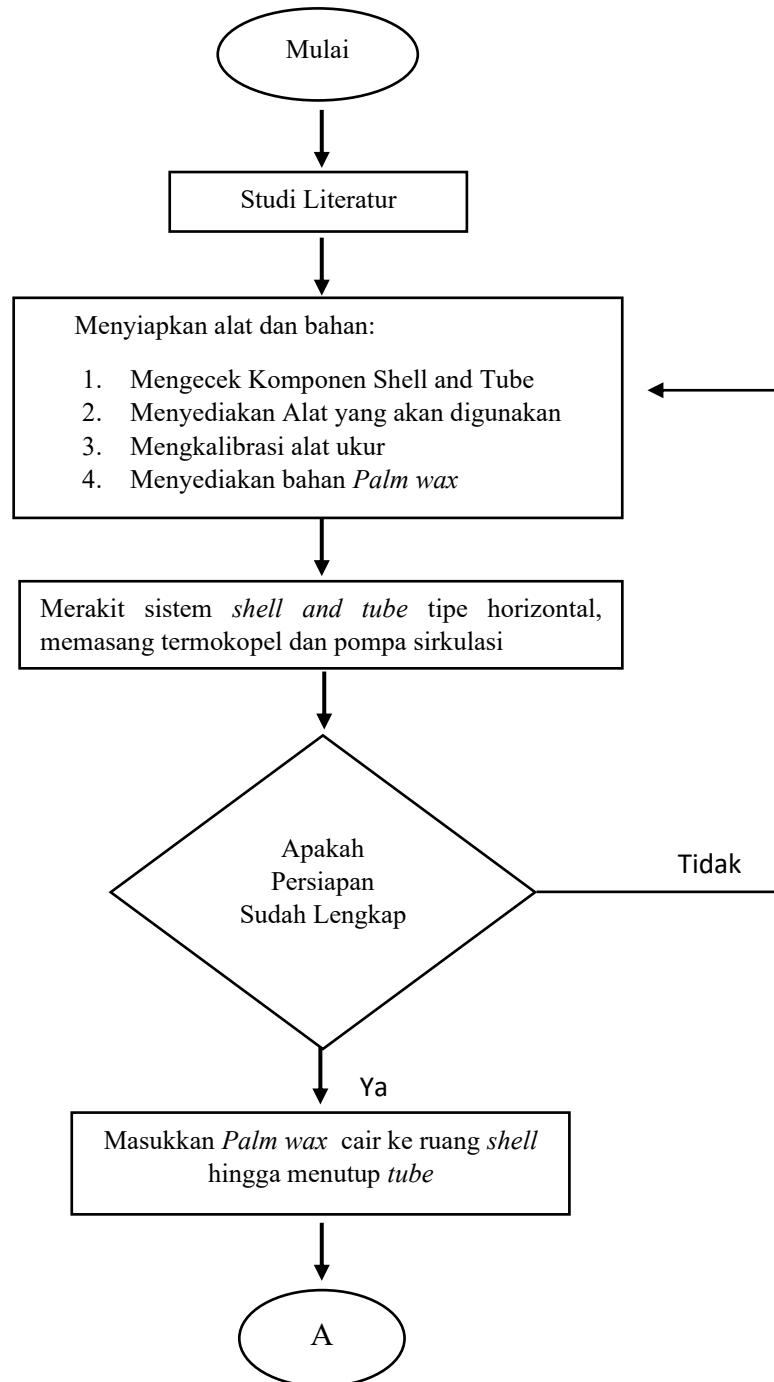
Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari air sebagai fluida kerja dan *Palm wax* sebagai material perubahan fasa (*phase change material*). Air berfungsi sebagai media penghantar panas yang dialirkan secara sirkulatif dari tangki penampungan menuju alat

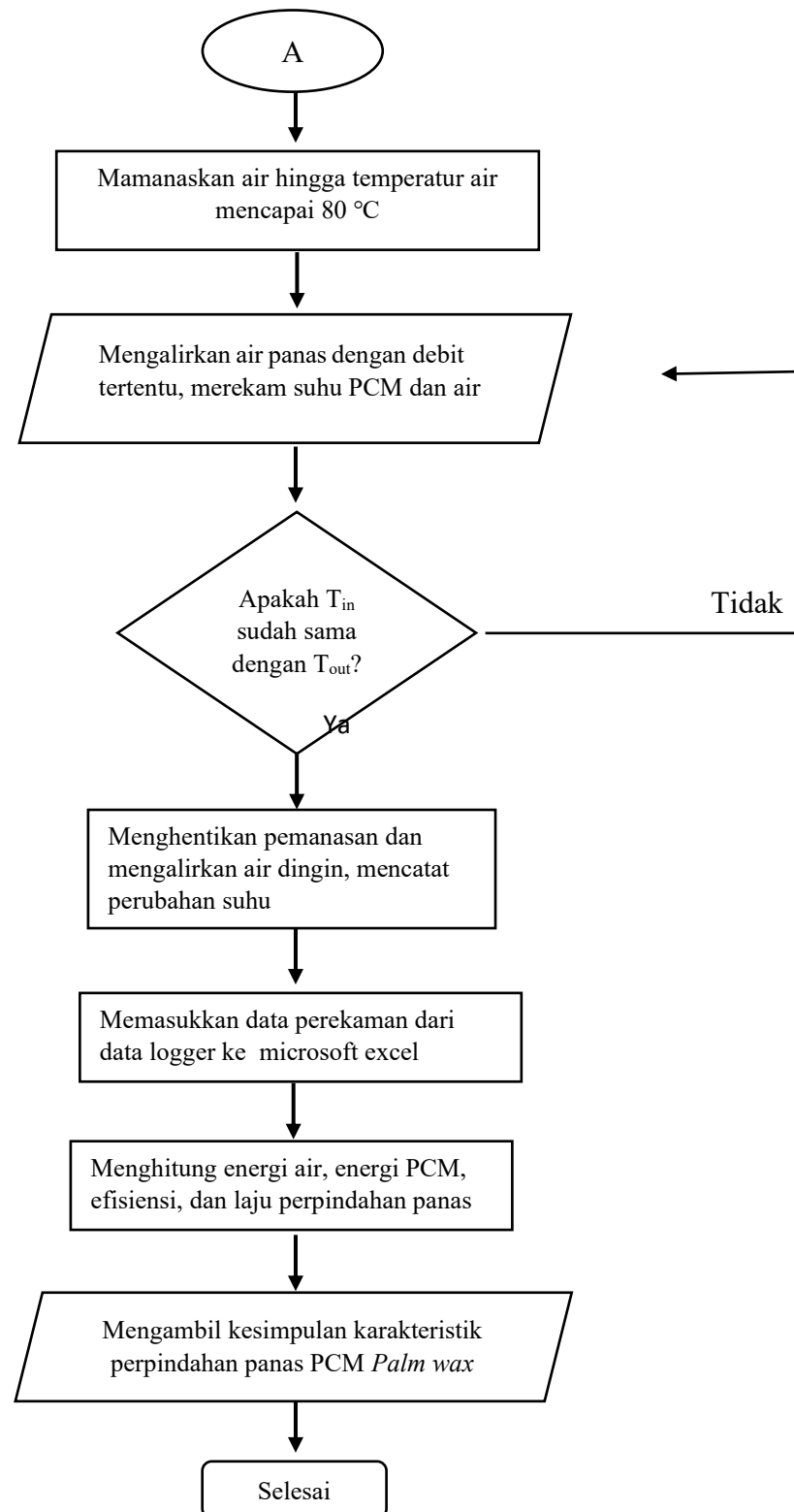
penukar kalor, kemudian kembali lagi ke tangki melalui bantuan pompa sirkulasi. Adapun material perubahan fasa yang digunakan adalah *Palm wax* dalam bentuk padat. *Palm wax* ini ditempatkan pada ruang annular (antara pipa bagian dalam dan dinding *shell*) dalam alat penukar kalor tipe *shell and tube*, sehingga dapat menyerap energi panas dari fluida air dan mengalami proses peleburan selama fase pengisian energi termal.



Gambar 3. 9 *Palm wax*

3.4 Diagram Alir





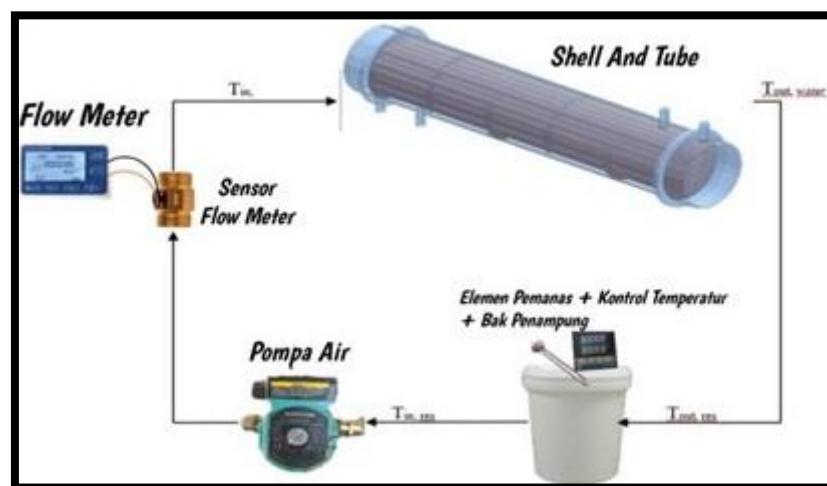
Gambar 3. 10 Diagram Alir Penelitian

3.5 Jenis Skema Pengujian

Pada penelitian ini untuk memahami proses perpindahan panas antara fluida kerja (air) dan palmitat sebagai material perubahan fasa (*Phase Change Material*), dilakukan serangkaian pengujian eksperimental dengan sistem penukar kalor tipe *shell and tube*. Dalam pelaksanaannya, pengujian dibagi ke dalam beberapa skema untuk menggambarkan alur dan kondisi operasional yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut ini:

1. Skema sistem *close loop*

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

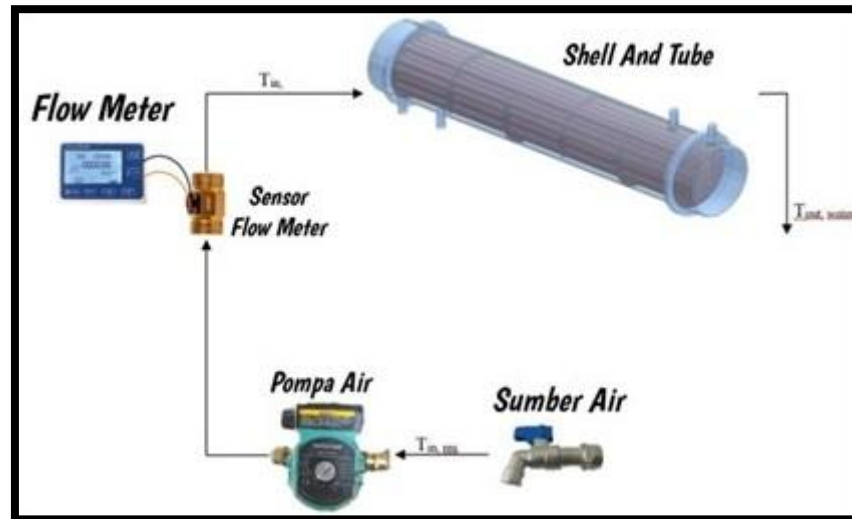


Gambar 3. 11 Skema Sistem *Close Loop*

2. Skema sistem *open loop*

Sistem *open loop* merupakan konfigurasi aliran fluida terbuka, di mana air dingin dialirkan secara langsung dari sumber menuju alat penukar kalor tanpa dilakukan proses sirkulasi ulang. Dalam konteks penelitian ini, sistem *open loop* digunakan untuk mengamati perilaku pelepasan

panas dari material perubahan fasa (PCM), yaitu parafin, ke fluida kerja (air) yang terus berganti. Dengan tidak adanya sirkulasi ulang, maka fluida kerja yang masuk selalu berada dalam kondisi termal awal yang konstan, sehingga mempermudah dalam menganalisis konduktivitas termal PCM secara lebih spesifik.

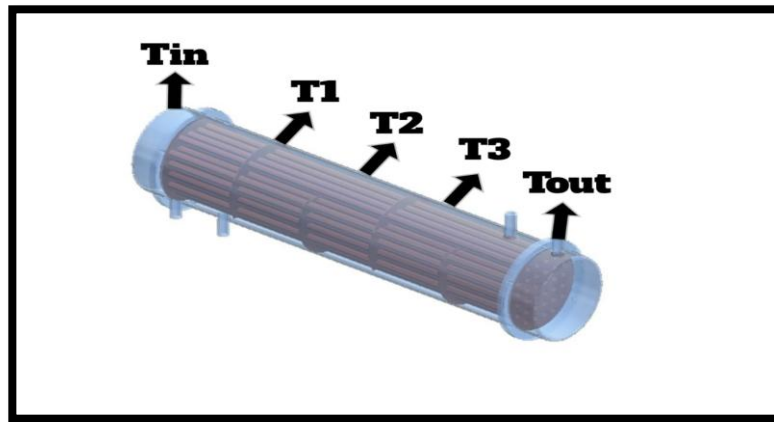


Gambar 3. 12 Skema Sistem *Open Loop*

3.6 Penempatan Titik Pengukuran

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

dekat ujung pipa air keluar, sehingga memungkinkan analisis distribusi panas sepanjang sistem.



Gambar 3. 13 Penempatan titik pengukuran

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

3.7 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan sistem *shell and tube heat exchanger*. Pengujian dilakukan untuk memantau parameter-parameter yang memengaruhi karakteristik perpindahan panas pada material perubahan fasa, yaitu *Palm wax*. Pengambilan data temperatur ini dilakukan setiap 30 detik dengan menggunakan data logger. Percobaan dilakukan sebanyak 9 kali dimana terdiri dari 3 variasi kecepatan debit air (8 l/min, 10 l/min dan 12 l/min). Adapun

tahapan metode pengambilan data dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh peralatan dan bahan yang dibutuhkan dalam pengujian, meliputi pompa sirkulasi air, sensor termokopel dan *data logger*, sensor *water flow meter*, pemanas air, tangki penampung air panas, alat penukar kalor, *Palm wax* sebagai PCM, pipa PVC sebagai saluran fluida, serta katup pengatur aliran.
2. Merangkai seluruh komponen sistem sesuai dengan rancangan skematik yang telah ditentukan, memastikan tidak ada kebocoran maupun gangguan aliran.
3. Mengaktifkan *data logger* dan menghubungkan sensor termokopel pada titik-titik pengukuran dengan susunan sebagai berikut:
 - CH1 dan CH2 untuk mengukur temperatur fluida pada saluran masuk (Tin) dan keluar (Tout) dari alat penukar kalor.
 - CH3 sebagai T1, CH4 sebagai T2 dan CH5 sebagai T3 digunakan untuk mengukur distribusi temperatur pada *Palm wax* di dalam ruang *shell*.
4. Memanaskan air di dalam tangki penampung hingga mencapai temperatur yang telah ditentukan, yaitu 57°C dengan toleransi $\pm 1^\circ\text{C}$.
5. Mengaktifkan pompa untuk mengalirkan air panas ke dalam sistem.
6. Mengalirkan air panas ke dalam bagian *tube* dari alat penukar kalor untuk mentransfer panas ke *Palm wax* hingga material tersebut mengalami fase peleburan (mencapai temperatur 57°C ke atas).
7. Merekam data temperatur dari semua titik pengukuran menggunakan *data logger* dengan interval pencatatan setiap 30 detik.
8. Mengaktifkan sensor *water flow meter* untuk memantau laju aliran air secara real time.
9. Mengatur kecepatan aliran air sesuai dengan nilai yang telah divariasikan menggunakan katup manual.
10. Membiarkan sistem bekerja secara sirkulasi tertutup hingga temperatur air di dalam tangki penampung mengalami kenaikan akibat pelepasan kalor laten dari PCM.
11. Menyimpan seluruh data hasil pencatatan dari *data logger* dalam format digital dan mengolahnya menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

12. Mengulangi langkah 9 sampai 11 untuk setiap variasi kecepatan aliran yaitu 8, 10, 12 l/min yang telah dirancang untuk memperoleh perbandingan data yang representatif.
13. Menganalisis data yang diperoleh untuk menarik kesimpulan terkait karakteristik perpindahan panas asam palmitat sebagai PCM.
14. Menyelesaikan seluruh rangkaian pengujian.

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

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Mengidentifikasi durasi perubahan fasa *Palm wax* dipengaruhi signifikan oleh variasi debit aliran fluida. Dengan demikian, debit 12 l/menit merupakan kondisi paling responsif dalam mempercepat penyimpanan dan pelepasan energi, sedangkan debit 10 l/menit memberikan keseimbangan terbaik antara laju perpindahan panas dan efisiensi energi.
2. Didapatkan karakteristik dari PCM *Palm wax* dengan nilai laju perpindahan panas pada proses pemanasan berturut turut sebesar 1,46 kW, 1,21 kW, dan 1,006 kW. Sedangkan pada proses pendinginan didapatkan nilai berturut turut sebesar 0,95, 1,04 kW, dan 1,05 kW, seluruh variasi debit menghasilkan bilangan *Reynolds* dalam regime turbulen. *Palm wax* memiliki konduktivitas termal yang rendah yaitu sekitar 0,2 W/m·K, Maka laju perpindahan panas di dalam PCM menjadi lambat. PCM *Palm wax* juga menyimpan *energi laten* yang lebih kecil per unit massa, Sehingga langsung memengaruhi banyaknya energi yang bisa ditransfer selama proses perubahan fasa.

5.2 Saran

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

1. Disarankan menambahkan aditif penghantar panas seperti grafit atau logam ringan untuk meningkatkan konduktivitas termal serta mempercepat proses pelelehan dan pembekuan PCM.
2. Diperlukan penggunaan alat ukur dan sensor termokopel yang lebih akurat dan responsif.
3. *Shell and tube* sebaiknya dibuat dari bahan yang tahan panas dan tidak mudah mengalami pemuaian.
4. Perlu dilakukan variasi temperatur untuk menganalisis pengaruhnya terhadap laju perpindahan panas.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Manoj., P. Mukesh., & S. Nuveen Raj Kumar (2018). A Review on Paraffin Wax as Phase Change Material in Latent Heat Thermal Energy Storage System. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. Volume-1, Issue-1.
- Bhagyalakshmi, p., Rajan, k., Kumar, K. S., & Reddy, S. S. (2018). Experimental Study On Solar Energy Storage In Phase Change Materials Using Cylindrical Shell Type Heat Exchanger. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, rp_2018/jeas_0118_6686.pdf 13(2).
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 6th Edition. McGraw-Hill.
- Desy Kurniawati., Noor Fachrizal., Sutopo., Winarni., Wiwie Chaeruni., Indah Sakina Pansawati., Titik Nurmawati & Dwi Gunadi (2024). Study Paraffin wax, *Palm wax* as phase change materials for thermal energy storage in solar water heater. <https://doi.org/10.1063/5.0207886>
- Dewi Rahma Fitri., In Rahmi Fatria Fajar & Dede Komarudin (2023). PERBANDINGAN BASIS LILIN *PALM WAX* DAN PARAFFIN WAX TERHADAP SIFAT FISIK DAN DAYA TOLAK NYAMUK LILIN AROMATERAPI MINYAK KULIT JERUK PURUT SEBAGAI REPPELENT. Vol. 04(02) : 44-54. <http://iontech.ista.ac.id/index.php/iontech>
- Eleni Douvi , Christos Pagkalos , George Dogkas , Maria K. Koukou , Vassilis N. Stathopoulos , Yiannis Caouris & Michail Gr. Vrachopoulos (2021). Phase Change Materials in Solar Domestic Hot Water Systems: A review. S2666-2027(21)00013-6. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100075>
- G. Marausna & J. Waluyo (2019). Studi Pelelehan PCM di Dalam Tabung Penyimpanan Kalor Pada Solar Water Heater Sistem Aktif. *Journal of Mechanical Design and Testing* 1(1), (2019), 47-56. <http://dx.doi.org/10.22146/jmdt.v1i1.46744>
- Incropera, F. P., Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, & David P. De Witt. (2011). *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer*, Seventh Edition.
- Jamilah., Fadhila Rahma Oktavia., & Salsabila Widya Nafita (2021). Pengaruh Material yang Berbeda Terhadap Laju Perpindahan Panas. *Jurnal Penelitian Fisika dan Terapannya (Jupiter)*, 3 (1). <https://doi.org/10.31851/v37esc51>
- Khoirul Anam As Syukri., Dony Perdana., Moch. Izza Maulana Sulthon & Sumardi Hadi Sumarlan (2023). Analisis Pindah Panas Konduksi dan Konveksi pada Heat Exchanger Evaporator Efek Ganda pada Pengolahan Nira Tebu. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 11(2), 159-171. <http://10.29303/jrpb.v11i2.221>
- Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., & Rahman, S. M. A. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. *Energies*, 12(16), 3167. <https://doi.org/10.3390/en12163167>

- Muhammad Irsyad., Agus Sugiri., Jorfri B. Sinaga., M Dyan Susila & Ahmad Jarkasih Mada (2023). Penyimpanan energi termal Pada parafin dari energi surya untuk aplikasi pemanas air dengan siklus kolektor plat datar – tabung paraffin.
- Muhammad Nadjiba., Tito Hadji Agung Santosaa., Angga Dwi Sentosaa., & Darmawan Mukhlisina (2022). Pengaruh Variasi Debit Air terhadap Unjuk Kerja Termal Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi Phase-Change Material. Jurnal Material dan Proses Manufaktur Vol. 6, No. 1, p1-10. <https://doi.org/10.18196/jmpm.v6i1.14795>
- Nejat, P., Fekri, Y., & Jomehzadeh, F. (2022). Phase change material (PCM) as the smart heat-storing concept: A brief review. *Annals of Marine Science*, 6(1), 34–38.
- Nurul Syahida., Ismail Fitrya., Ainun Zuriyatib & Nur Hanania (2020). Effects of *Palm wax* on the physical, mechanical and water barrier properties of fish gelatin films for food packaging application. *Food Packaging and Shelf Life* journal homepage: www.elsevier.com/locate/fpsl
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- Zhang, N., & Du, Y. (2018). Ultrasonic enhancement on heat transfer of palmitic stearic acid as PCM in unit by experimental study. *Sustainable Cities and Society*, 43, 532–537. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.040>
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2016). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605.