

**STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA TIPE *SHELL*
AND TUBE DENGAN VARIASI BAHAN PERUBAHAN FASE SEBAGAI
PENYIMPAN ENERGI TERMAL**

(TESIS)

Oleh

BUDI AGUS PRIANTO

NPM 2325021007



PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2026

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA TIPE *SHELL AND TUBE* DENGAN VARIASI BAHAN PERUBAHAN FASE SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI TERMAL

Budi Agus Prianto¹, Muhammad Irsyad², Harmen², Amrul^{2*}

¹Mahasiswa Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

²Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja termal sistem pemanas air tenaga surya tipe shell and tube yang terintegrasi dengan penyimpanan energi panas laten menggunakan Phase Change Material (PCM). Enam jenis PCM, yaitu coconut wax, palm wax, palmitic acid, paraffin wax, soy wax, dan stearic acid, diuji secara eksperimental pada prototipe penukar kalor tube-in-shell. Fluida kerja berupa air dialirkan di dalam pipa tembaga, sedangkan PCM ditempatkan pada sisi shell. Pengujian dilakukan pada proses pelelehan (charging) dan pembekuan (discharging) dengan variasi laju aliran air sebesar 8 LPM, 10 LPM, dan 12 LPM. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi temperatur, waktu perubahan fasa, laju perpindahan kalor, serta energi yang diserap dan dilepaskan selama siklus termal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jenis PCM memberikan pengaruh dominan terhadap karakteristik penyimpanan dan pelepasan energi termal. Palmitic acid dan stearic acid menampilkan plateau temperatur yang panjang dan stabil pada proses pelelehan maupun pembekuan, yang mengindikasikan kapasitas energi laten yang tinggi. Paraffin wax dan palm wax menunjukkan respons termal yang lebih cepat dengan kapasitas energi laten pada tingkat menengah. Sebaliknya, coconut wax dan soy wax menunjukkan kapasitas energi laten rendah sehingga waktu perubahan fasanya lebih cepat namun energi tersimpan lebih kecil. Peningkatan laju aliran air meningkatkan laju perpindahan panas konveksi, namun tidak secara signifikan memengaruhi total energi yang diserap atau dilepaskan oleh PCM. Secara keseluruhan, kinerja sistem penyimpanan energi termal lebih ditentukan oleh sifat termofisika PCM dibandingkan kondisi operasi aliran. Berdasarkan hasil ini, palmitic acid dan stearic acid dinilai paling sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi panas laten pada sistem pemanas air tenaga surya.

Kata kunci: Phase Change Material (PCM), penyimpanan energi panas laten, pemanas air tenaga surya, shell and tube, perpindahan kalor.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF SHELL AND TUBE TYPE SOLAR WATER HEATER WITH VARIATIONS OF PHASE CHANGE MATERIALS AS THERMAL ENERGY STORAGE

Budi Agus Prianto¹, Muhammad Irsyad², Harmen², Amrul^{2*}

¹Master student in Mechanical Engineering Department, Lampung University

²Lecture in Mechanical Engineering Department, Lampung University

This study aims to evaluate the thermal performance of a shell-and-tube solar water heating system integrated with latent heat thermal energy storage using Phase Change Materials (PCM). Six PCM types—coconut wax, palm wax, palmitic acid, paraffin wax, soy wax, and stearic acid—were experimentally investigated using a tube-in-shell heat exchanger prototype. Water was employed as the working fluid and circulated through a copper tube, while the PCM was placed on the shell side. The experiments were conducted during the melting (charging) and solidification (discharging) processes with water flow rate variations of 8 LPM, 10 LPM, and 12 LPM. The analyzed parameters included temperature distribution, phase change duration, heat transfer rate, and the amount of thermal energy absorbed and released during the thermal cycle. The experimental results indicate that PCM type has a dominant influence on thermal energy storage and release characteristics. Palmitic acid and stearic acid exhibit long and stable temperature plateaus during both melting and solidification processes, indicating high latent heat storage capacity. Paraffin wax and palm wax demonstrate faster thermal response with moderate latent heat capacity. In contrast, coconut wax and soy wax show lower latent heat capacity, resulting in shorter phase change durations and lower stored energy. Increasing the water flow rate enhances convective heat transfer but does not significantly affect the total energy absorbed or released by the PCM. Overall, the thermal energy storage system performance is governed more by the thermophysical properties of the PCM than by flow operating conditions. Based on these findings, palmitic acid and stearic acid are identified as the most suitable PCM for latent heat thermal energy storage applications in solar water heating systems.

Keywords: *Phase Change Material (PCM), latent heat thermal energy storage, solar water heater, shell-and-tube heat exchanger, heat transfer.*

**STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA TIPE
SHELL AND TUBE DENGAN VARIASI BAHAN PERUBAHAN FASE
SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI TERMAL**

Oleh

BUDI AGUS PRIANTO

(Tesis)

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung .



PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2026

Judul Tesis : **STUDI EKSPERIMEN PEMANAS
AIR TENAGA SURYA TIPE *SHELL
AND TUBE* DENGAN VARIASI
BAHAN PERUBAHAN FASE
SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI
TERMAL**

Nama Mahasiswa : **Budi Agus Prianto**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2325021007**

Program Studi : **Magister Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI
Komisi Pembimbing

Ketua



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

Anggota



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 196906202000031001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



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

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 196906202000031001

LEMBAR PENGESAHAN


1. Tim Penguji

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

Anggota Penguji : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**

Penguji Utama I : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**

Penguji Utama II : **Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**




2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T
NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **15 Januari 2026**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal70).

Bandar Lampung, 15 Januari 2026

Penulis



Budi Agus Prianto
NPM 2325021007

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Lampung, pada tanggal 2 Agustus 1993, sebagai anak kedua dari empat bersaudara, dari pasangan bapak Suwarno dan Ibu Suryati. Dalam meraih jenjang Perguruan Tinggi penulis melalui pendidikan formal, yaitu :

1. Sekolah Dasar (SD) Gula Putih Mataram, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2005.
2. Sekolah Menengah Pertama (SMP) Gula Putih Mataram, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2008.
3. Sekolah Menengah Kejuruan Negeri (SMKN) 1 Tulang Bawang Tengah, Tulang Bawang Barat, Lampung dan lulus pada tahun 2011.
4. Diploma 3 (D3) Politeknik Tunas Garuda, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2014.
5. Sarjana Strata 1 (S1) Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung, Lampung dan lulus pada tahun 2021.

Penulis diterima menjadi Mahasiswa Magister Teknik Mesin Universitas Lampung pada tahun 2023 melalui jalur seleksi umum. Dengan ketekunan, motivasi yang tinggi untuk terus belajar, berusaha dan berjuang, penulis telah menyelesaikan pengerjaan Tesis ini. Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya atas terselesaikannya Tesis dengan judul **“STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA TIPE *SHELL AND TUBE* DENGAN VARIASI BAHAN PERUBAHAN FASE SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI TERMAL”**.

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu 'alaikum Warahmatullah Wabarakatuh.

Puji syukur ke hadirat Allah Subhana Wa Ta'ala karena berkat limpahan rahmat, hidayah, dan Inayah-Nya maka TESIS ini dapat diselesaikan dengan baik. Salam dan solawat semoga selalu tercurah pada baginda Rasulullah Muhammad Salallah Alaihi Wassalam.

Limpahan rasa hormat, cinta, kasih sayang dan terima kasih kepada bapak Suwarno dan ibu Suryati yang mendidik dan membesarkan dengan penuh cinta kasih sayang yang begitu tulus kepada Penulis yang selalu memberikan doa di setiap detik kehidupannya untuk keberhasilan Penulis. Limpahan kasih sayang dan cinta untuk Istri penulis Zahro Laila Nur yang telah mendampingi, memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan studi Magister. Kepada anak-anak penulis Yazid Nafi' Dzulqarnain dan Khalid Sulaiman Ar Rasyid yang telah hadir di kehidupan dan menjadi semangat selama melaksanakan studi. Serta keluarga besar yang selama ini telah banyak memberikan doa, perhatian, kasih sayang, semangat dan dukungannya kepada Penulis, semoga Allah Azza Wa Jalla senantiasa mengumpulkan kita semua dalam kebaikan dan ketaatan kepada-Nya. Penyelesaian Tesis ini tentu tidaklah lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia meluangkan waktu, dan fikiran dalam penulisan tesis ini.

2. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua, yang telah menyediakan waktu dan pikiran dalam penyusunan tesis ini.
3. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku dosen penguji I yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
4. Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen penguji II yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
5. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Magister Teknik Mesin yang banyak memberikan ilmu, baik berupa materi maupun teladan dan motivasi.
6. Rekan-rekan Magister Teknik Mesin (angkatan 2023), semoga kebersamaan dan persaudaraan kita tidak berakhir hanya di kampus ini.
7. Adik-adik Mahasiswa Strata 1 yang telah membantu penyelesaian Tesis ini.
8. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.

Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullah Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 15 Januari 2026

Budi Agus Prianto

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Universitas Lampung.

Tesis yang berjudul **“STUDI EKSPERIMEN PEMANAS AIR TENAGA SURYA TIPE *SHELL AND TUBE* DENGAN VARIASI BAHAN PERUBAHAN FASE SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI TERMAL”** dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi dalam proses penyusunannya.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis dengan tulus mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi penyempurnaan karya ini. Atas segala perhatian dan bantuannya, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Bandar Lampung, 15 Januari 2026

Penulis,

Budi Agus Prianto

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	vi
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR ISTILAH	xviii
 I. PENDAHULUAN.....	 1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian.....	6
1.4. Manfaat Penelitian.....	6
1.5. Batasan Masalah.....	7
 II. TINJAUAN PUSTAKA	 8
2.1. Dasar-Dasar Perpindahan Panas.....	8
2.1.1. Perpindahan Panas Konduksi.....	8
2.1.2. Perpindahan Panas Konveksi	10
2.1.3. Perpindahan Panas Radiasi	11
2.2. Alat Penukar Panas (<i>Heat Exchangers</i>)	12
2.2.1. Jenis-jenis Alat Penukar Panas	12

2.2.2. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh	18
2.2.3. Aliran Laminar dan Turbulen dalam Tabung	21
2.2.4. Bilangan Reynold.....	22
2.3. Penyimpan Energi Panas	24
2.4. <i>Phase Change Material (PCM)</i>	26
2.4.1. Parafin	27
2.4.2. Asam Stearat (<i>Stearic Acid</i>).....	28
2.4.3. Asam Palmitat (<i>Palmitic Acid</i>)	29
2.4.4. Lilin Kelapa (<i>Coconut Wax</i>)	29
2.4.5. Lilin Kelapa Sawit (<i>Palm Wax</i>)	30
2.4.6. Lilin Kedelai (<i>Soy Wax</i>).....	31
2.5. <i>Solar Water Heating Systems (SWHS)</i>	32
2.5.1. Metode Sirkulasi Aliran SWHS	33
2.5.2. Jenis-jenis kolektor surya.....	37
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	40
3.1. Tempat Penelitian.....	40
3.2. Waktu Penelitian	40
3.3. Alat dan Bahan	42
3.3.1. Alat.....	42
3.3.2. Bahan penelitian.....	50
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	51
3.5. Skema Uji	53
3.6. Penempatan Titik Pengukuran.....	54
3.7. Metode Pengambilan Data	55
3.7.1. Proses Pelelehan PCM	55
3.7.2. Proses Pembekuan PCM	56
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	57
4.1. Deskripsi Umum Pengujian.....	57
4.2. Aliran Air dan Analisis Reynolds.....	59
4.3. Analisis Proses pelelehan PCM.....	61

4.3.1. Variasi jenis PCM terhadap waktu pelelehan	68
4.4. Karakteristik Laju Perpindahan Kalor dan Evaluasi Kinerja Termal PCM pada Proses Pelelehan	70
4.4.1. Laju Perpindahan Kalor pada Proses Pelelehan PCM	70
4.4.2. Energi yang Dilepas Air pada Proses Pelelehan PCM.....	72
4.4.3. Energi yang Diserap PCM pada Proses Pelelehan.....	75
4.4.4. Energi Tersimpan dalam Pipa Tembaga	78
4.4.5. Total Energi yang Diserap PCM.....	80
4.5. Analisis Proses Pembekuan PCM	83
4.6. Variasi Jenis PCM terhadap Waktu Pembekuan	90
4.7. Karakteristik Laju Perpindahan Kalor dan Kinerja Termal PCM pada Proses Pembekuan.....	93
4.7.1. Laju Perpindahan Kalor pada Proses Pembekuan PCM	94
4.7.2. Energi yang Diserap Air pada Proses Pembekuan PCM	98
4.7.3. Energi yang Dilepas PCM pada Proses Pembekuan.....	102
4.7.4. Total Energi yang Dilepas PCM pada Proses Pembekuan	107
4.8. Keterpaduan Hasil dengan Tujuan Penelitian	110
V. KESIMPULAN dan SARAN.....	113
5.1. Kesimpulan.....	113
5.2. Saran.....	115
5.3. Penutup.....	116
DAFTAR PUSTAKA.....	117
LAMPIRAN.....	119

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Hubungan antara perbedaan arah aliran fluida dengan temperatur dalam <i>double pipe</i>	13
Gambar 2.2. Contoh penukar panas pada radiator mobil dan pendingin udara	14
Gambar 2.3. Skema penukar panas <i>shell and tube</i>	15
Gambar 2.4. Pengaturan aliran multipass pada penukar kalor <i>shell and tube</i>	17
Gambar 2.5. Penukar panas cair ke-cairan pelat-dan-rangka.....	18
Gambar 2.6. Resistansi termal pada penukar panas pipa ganda	19
Gambar 2.7. Penukar panas pipa ganda pada dua luas permukaan.....	20
Gambar 2.9. SWHS tipe Termosifon	34
Gambar 2.10. SWHS tipe penyimpanan kolektor terintegrasi	35
Gambar 2.11. SWHS dengan Sistem loop terbuka	35
Gambar 2.12. SWHS dengan Sistem Loop Tertutup	36
Gambar 2.13. Kolektor Surya Pelat Datar	37
Gambar 2.14. Kolektor Surya Tabung Vakum	38
Gambar 2.15. Kolektor Surya Palung Parabola	39
Gambar 3.1. Pemanas air listrik dan spesifikasinya.....	43
Gambar 3.2. <i>Thermocouple</i> dan <i>data logger</i>	43
Gambar 3.3. Kontroler temperatur dan SSR	44
Gambar 3.4. Pompa air	45
Gambar 3.5. <i>Water flow meter</i>	46
Gambar 3.6. Selang PEX	46
Gambar 3.8. Sketsa perencanaan alat penukar panas <i>shell and tube</i>	48
Gambar 3.9. Sketsa perencanaan tata letak <i>tube</i>	48
Gambar 3.10. Sketsa perencanaan <i>baffle plate</i>	49
Gambar 3.11. Sketsa perencanaan <i>shell end plate</i>	49
Gambar 3.12. Pipa tembaga Ø10mm, dan plat tembaga t 2mm dan 1mm	50
Gambar 3.13. Diagram alir penelitian.....	51

Gambar 3.14. Skema Proses Pelelehan PCM	53
Gambar 3.15. Letak Titik Pengukuran	54
Gambar 4.1. Grafik distribusi temperatur <i>coconut wax</i> pada proses pelelehan.	62
Gambar 4.2. Grafik distribusi temperatur <i>palm wax</i> pada proses pelelehan.	63
Gambar 4.3. Grafik distribusi temperatur <i>palmitic acid</i> pada proses pelelehan.	64
Gambar 4.4. Grafik distribusi temperatur <i>paraffin wax</i> pada proses pelelehan.	65
Gambar 4.5. Grafik distribusi temperatur <i>soy wax</i> pada proses pelelehan.	66
Gambar 4.6. Grafik distribusi temperatur <i>stearic acid</i> pada proses pelelehan.	67
Gambar 4.7. Grafik perbandingan variasi jenis PCM terhadap waktu pelelehan.	68
Gambar 4.8. Grafik pebandingan laju perpindahan panas pada proses pelelehan.	71
Gambar 4.9. Grafik perbandingan energi yang dilepas air selama proses pelelehan PCM.	74
Gambar 4.10. Grafik perbandingan energi yang diserap PCM.	77
Gambar 4.11. Grafik perbandingan energi total yang diserap PCM.	81
Gambar 4.12. Grafik distribusi temperatur <i>coconut wax</i> pada proses pembekuan.	84
Gambar 4.13. Grafik distribusi temperatur <i>palm wax</i> pada proses pembekuan.	85
Gambar 4.14. Grafik distribusi temperatur <i>palmitic acid</i> pada proses pembekuan.	86
Gambar 4.15. Grafik distribusi temperatur <i>parafin wax</i> pada proses pembekuan.	87
Gambar 4.16. Grafik distribusi temperatur <i>soy wax</i> pada proses pembekuan.	88

Gambar 4.17. Grafik distribusi temperatur <i>stearic acid</i> pada proses pembekuan.	89
Gambar 4.18. Grafik perbandingan variasi jenis PCM terhadap waktu pembekuan.	91
Gambar 4.19. Grafik pebandingan laju perpindahan kalor pada proses pembekuan.	95
Gambar 4.20. Grafik pebandingan energi yang diserap air selama proses pembekuan PCM.	100
Gambar 4.21. Grafik pebandingan energi yang dilepas PCM selama proses pembekuan.	104
Gambar 4.22. Grafik pebandingan energi total yang dilepas PCM selama proses pembekuan.	108

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Nilai konduktivitas termal berbagai bahan	10
Tabel 2.2. Perbandingan sifat fisik beberapa PCM.....	32
Tabel 3.1. Rencana Pelaksanaan Penelitian	41
Tabel 3.2. Variasi Bahan PCM	50
Tabel 4.1. Bilangan Reynolds pada proses pelelehan.....	60
Tabel 4.2. Bilangan Reynolds pada proses pembekuan.....	60
Tabel 4.3. Laju perpindahan panas selama proses pelelehan.....	70
Tabel 4.4. Energi yang dilepas air selama proses pelelehan PCM.	73
Tabel 4.5. Properti PCM yang digunakan dalam penelitian pada proses pelelehan.	76
Tabel 4.6. Energi Tersimpan Pipa Tembaga.....	80
Tabel 4.7. Variasi jenis PCM terhadap waktu pembekuan	90
Tabel 4.8. Laju perpindahan panas selama proses pembekuan PCM.	95
Tabel 4.9. Energi yang diserap air selama proses pembekuan PCM.	99
Tabel 4.10. Properti PCM yang digunakan dalam penelitian pada proses pembekuan.....	103

DAFTAR ISTILAH

HE (*Heat Exchanger*)

Perangkat yang dirancang untuk mentransfer panas (energi termal) antara dua atau lebih fluida yang suhunya berbeda tanpa mencampurkan fluida-fluida tersebut secara langsung.

PCM (*Phase Change Material*)

Material yang memiliki kemampuan menyimpan dan melepaskan energi panas dalam jumlah besar melalui perubahan fase (perubahan wujud).

HTF (*Heat Transfer Fluid*)

Gas atau cairan yang berperan dalam perpindahan panas dengan berperan sebagai perantara dalam pendinginan di satu sisi proses, mengangkut dan menyimpan energi panas.

SWH (*Solar Water Heater*)

Sistem pemanas air yang memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber panas untuk meningkatkan temperatur air melalui kolektor surya dan menyimpannya dalam tangki penyimpanan.

TES (*Thermal Energy Storage*)

Teknologi penyimpanan energi termal yang merekam energi panas atau dingin dalam suatu media penyimpanan, sehingga energi tersebut dapat digunakan kembali di waktu yang dibutuhkan.

LHS (*Latent Heat Storage*)

Metode penyimpanan panas dalam bahan pengubah fasa yang memanfaatkan panas laten perubahan fasa yang besar selama pencairan zat padat menjadi cair.

SHS (*Sensible Heat Storage*)

Metode penyimpanan energi termal di mana energi panas disimpan atau dilepaskan melalui perubahan suhu suatu media penyimpanan (padat atau cair) tanpa terjadi perubahan fase material tersebut.

Solidifikasi

Proses perubahan fase dari suatu material dari keadaan *cair* menjadi *padat* yang terjadi akibat pendinginan dan pengeluaran panas laten dari sistem.

DSC (*Differential Scanning Calorimetry*)

Metode analisis termal yang digunakan untuk mengukur perbedaan aliran panas antara sampel dan bahan referensi sebagai fungsi temperatur, sehingga dapat digunakan untuk menentukan karakteristik termal material seperti temperatur leleh, solidifikasi, dan kalor laten.

Plateau

Bagian datar pada kurva pengukuran yang menunjukkan kondisi stabil atau konstan dari suatu variabel meskipun terjadi perubahan pada variabel lain.

Baffle

Komponen pelat (sekat) yang dipasang di dalam *shell* dengan tujuan utama mengatur arah aliran fluida *shell-side*, meningkatkan perpindahan panas, dan menopang *tube* agar tidak bergetar.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Meningkatnya emisi gas rumah kaca merupakan ancaman langsung terhadap iklim, yang menyebabkan pemanasan global dan konsekuensi kerusakan lingkungan. Menanggapi perubahan iklim dan mendukung pembangunan berkelanjutan memerlukan pendekatan transformatif di sektor energi dunia, yang saat ini didominasi oleh energi tradisional, seperti bahan bakar fosil dan biomassa padat. Sumber konvensional ini berkontribusi secara signifikan terhadap krisis emisi gas rumah kaca, yang menyumbang lebih dari 75% dari total emisi global (Muhire dkk., 2024). Terlebih lagi, harga bahan bakar ini telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir dan diperkirakan akan terus meningkat di tahun-tahun mendatang sementara cadangannya berada di ambang penipisan (Mhedheb dkk., 2023).

Energi terbarukan menjadi salah satu potensi dalam pemenuhan kebutuhan. Salah satu energi terbarukan yang menarik perhatian dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir adalah energi matahari, sebab penyebaran energi ini meningkat sehingga berdampak pada bertambahnya produksi secara global (Rahmalina dkk., 2023). Energi surya adalah salah satu jenis energi bersih yang paling populer dan tersebar luas karena dianggap sebagai salah satu sumber paling aman (Mahyudi, 2024). Dengan potensi sumber energi matahari yang cukup besar dan adanya kebutuhan energi untuk menghasilkan air panas, maka energi surya cocok digunakan sebagai sumber energi untuk menghasilkan air panas.

Teknologi yang digunakan untuk menghasilkan air panas dari energi surya biasanya dikenal *solar water heater* (SWH). Sebagian besar bangunan tempat tinggal dilengkapi dengan pemanas air pada suhu antara 50-60°C. PCM dapat digunakan untuk kontrol suhu yang efektif karena kisaran suhu ini ideal untuk peleburannya (Dhaou dkk., 2022). Pengembangan teknologi modern yang berkelanjutan memerlukan pertimbangan dan mitigasi yang cermat terhadap jejak lingkungannya. Sehubungan dengan sumber energi terbarukan, sistem penyimpanan berada di garis depan upaya untuk meminimalkan dampak buruk perubahan iklim (Malik dkk., 2022).

Penggunaan sistem penyimpanan panas laten memiliki keunggulan dibanding panas sensibel, sehingga PCM dapat memiliki peran penting dalam pengembangan teknologi termal surya, menyimpan dan melepaskan energi pada suhu yang hampir konstan sehubungan dengan perubahan fase. PCM merupakan material yang memanfaatkan perubahan fasa ketika menyerap (*charging*) dan melepaskan (*discharging*) kalor, namun struktur atau susunan kimianya itu tidak mengalami perubahan (Irsyad dkk., 2020). Penyimpanan energi termal menggunakan PCM telah diteliti secara luas untuk berbagai aplikasi dari suhu yang rendah hingga tinggi karena rentang suhu operasinya yang fleksibel, kepadatan penyimpanan energi yang tinggi, dan siklus umur yang panjang. Penggunaan PCM dalam produksi air panas dapat mengurangi permintaan energi, fluktuasi suhu, dan manajemen sisi permintaan yang lebih baik dengan memanfaatkan energi terbarukan yang tersedia (Nair dkk., 2022).

Latent Thermal Energy Storage (LTES) merupakan sistem yang sangat diminati dalam aplikasi seperti pembangkit air panas rumah tangga, dengan entalpi

perubahan fase PCM sebagai alternatif untuk penyimpanan energi dan pelepasan energi. Di sisi lain, dalam pemanas air tenaga surya, dua metode aktif dan pasif biasanya digunakan untuk peningkatan perpindahan panas. Secara umum, metode aktif diartikan sebagai daya eksternal yang diperlukan pada proses tersebut, dan metode pasif tidak memerlukan energi tambahan untuk peningkatan sistem. Terkadang, kedua metode gabungan dari pendekatan tersebut digunakan untuk peningkatan perpindahan panas. Misalnya, bahan pengisi seperti penambahan bahan nano dan penggunaan bahan pelapis adalah jenis metode pasif, PCM diperhitungkan sebagai bahan hemat energi yang menjanjikan karena potensinya untuk menyimpan dan melepaskan sejumlah besar panas laten saat melalui proses transisi fase isothermal, menyediakan energi pemanasan atau pendinginan (Bazri dkk., 2022).

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mendapatkan efisiensi optimum dari pemanas air tenaga surya. (Abbasi dkk., 2022) melakukan pemeriksaan pengaruh porositas terhadap intensifikasi penyimpanan termal PCM dalam sistem tipe shell and tube. Dalam studi ini ditemukan bahwa saat porositas menurun, waktu leleh dapat dikurangi hingga 82%. Lebih jauh, penggunaan bagian tengah material PCM sebagai zona berpori menyebabkan peningkatan gradien suhu dan pengurangan resistansi PCM terhadap pelelehan, distribusi fraksi cair dan suhu dalam unit PCM selama proses pengisian menyerap energi termal dari fluida panas melalui dinding tabung, dan ketika mencapai suhu titik leleh, maka akan mencair.

(Dong dkk., 2022) melakukan simulasi berdasarkan dinamika fluida komputasional pada tangki penyimpanan panas *shell and tube*. Tangki tersebut terdiri dari 18 tabung, dan ruang di antara keduanya diisi dengan parafin. Pengaruh

penambahan nanopartikel SWCNT dan GNP dievaluasi pada PCM pada fluks panas yang berbeda. Hasil menunjukkan rasio volume peleburan PCM tidak bergantung pada fluks panas masuk, dan peningkatan fluks panas masuk hanya mempercepat proses peleburan. Namun penambahan SWCNT ke parafin mengurangi waktu peleburan sebesar 43% dan menyimpan energi panas laten 147% lebih banyak dibandingkan dengan parafin murni.

(Bazri dkk., 2022) melakukan sebuah analisis histeresis termal pada aplikasi penyimpanan energi termal laten berbantuan pipa panas bersirip untuk sistem pemanas air tenaga surya. Hasil analisis memperlihatkan bahwa jenis PCM berpengaruh signifikan terhadap kinerja termal, di mana PCM C (Rubitherm RT70HC) menghasilkan suhu rata-rata maksimum tertinggi, mencapai 101 °C selama proses pengisian 12 jam pada kondisi radiasi surya harian yang tinggi.

Kemudian (Al-Askaree & Al-Muhsen, 2023) menyajikan eksperimental tentang kinerja termal pemanas air tenaga surya yang dilengkapi dengan penukar kalor inti sirip serpentin, penukar panas dengan tabung tembaga dan sirip aluminium dicat dengan cat hitam gelap dari kompleks pemanas surya yang dikembangkan. Sistem kontrol elektronik yang terhubung ke saluran air dingin mengatur laju aliran air ke dalam pipa penukar panas dengan aliran air 0,5 L per menit, dan hasil puncak efisiensi termal yang tercapai sebesar 58%.

(Pambudi dkk., 2023) telah melakukan penelitian efisiensi energi kolektor seng bergelombang berbentuk V yang dimodifikasi terhadap kinerja SWH. Hasilnya efek laju aliran, dengan 120, 180, dan 240 Lph, dibandingkan dan dianalisis menggunakan sistem pasif dan terbuka. Data diambil pada interval 10 menit dari pukul 8:00 pagi hingga 15:00 sore. Hasil penelitian menyimpulkan

bahwa kinerja pemanas air tenaga surya dengan kolektor seng bergelombang berbentuk V sangat dipengaruhi oleh laju aliran fluida. Efisiensi energi tertinggi, sebesar 50%, dicapai pada laju aliran 240 Lph, sementara laju aliran yang lebih rendah menghasilkan efisiensi yang lebih kecil. Selain itu, kolektor menunjukkan efisiensi maksimum hingga 61%, yang menegaskan bahwa peningkatan laju aliran meningkatkan efektivitas perpindahan panas.

(Bashirpour-Bonab, 2021) melakukan investigasi dan optimasi peleburan PCM dengan nanopartikel dalam sistem penyimpanan energi termal multi-tabung. Penambahan nanopartikel konduktif pada PCM secara signifikan meningkatkan konduktivitas termalnya. Hal ini berimplikasi pada penurunan koefisien perpindahan panas spesifik dan panas laten peleburan PCM. Peningkatan konduktivitas termal ini bermanifestasi dalam waktu pemadatan/peleburan yang lebih singkat, mengindikasikan laju transfer panas yang lebih tinggi.

Tinjauan pustaka menunjukkan bahwa banyak studi yang dimaksudkan untuk memproduksi air panas dengan potensi sumber energi matahari, teknologi yang digunakan untuk menghasilkan air panas dari energi surya biasanya dikenal SWH atau pemanas air tenaga surya. Dari uraian tersebut, penelitian ini akan dilakukan secara eksperimental dengan skala laboratorium mengenai prototipe *shell and tube*, dan pengujian beberapa variasi jenis bahan PCM terhadap penyimpanan energi termal.

1.2. Rumusan Masalah

Penyimpanan panas yang dimaksud pada penelitian ini adalah variasi PCM yang digunakan pada aplikasi *solar water heater*. Rumusan masalah ini meliputi:

1. Bagaimana pengaruh variasi jenis PCM terhadap kinerja pada sistem pemanas air tenaga surya tipe *shell and tube*?
2. Berapa waktu yang dibutuhkan oleh masing-masing jenis bahan PCM untuk mencapai suhu leleh dan membebaskan energi panas?
3. Bagaimana pengaruh perubahan laju aliran fluida terhadap perpindahan panas antara fluida dan bahan PCM?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini mempunyai tujuan sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui dan mengevaluasi kinerja berbagai jenis bahan PCM sebagai media penyimpanan energi termal dalam sistem pemanas air tenaga surya tipe *shell and tube*.
2. Untuk mengetahui jenis bahan PCM yang paling optimal dalam sistem penyimpanan energi termal.
3. Untuk mengetahui pengaruh laju aliran fluida terhadap perpindahan panas antara fluida dan beberapa jenis bahan PCM.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam memperkaya literatur ilmiah mengenai pemanfaatan energi terbarukan, dengan fokus khusus pada bidang penyimpanan energi termal. Melalui penelitian ini, data

yang diperoleh diharapkan tidak hanya memperluas pemahaman tentang mekanisme penyimpanan energi termal, tetapi juga digunakan untuk membangun model prediksi yang lebih akurat. Hasil penelitian ini juga berpotensi menjadi acuan bagi studi lanjutan di masa mendatang, serta bagi pengambil kebijakan dalam merancang solusi energi yang lebih ramah lingkungan.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang relevan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Teknologi dan efisiensi alat yang digunakan mungkin lebih rendah dibandingkan teknologi yang lebih canggih, sehingga kinerja yang diprediksi mungkin tidak sepenuhnya optimal.
2. Dalam penelitian ini menyederhanakan beberapa variabel, seperti aliran panas dan distribusi suhu dalam sistem penyimpanan energi termal, sehingga model mungkin tidak menggambarkan dinamika termal yang lebih kompleks di kondisi nyata, terutama jika terjadi perubahan lingkungan secara tiba-tiba.
3. Pengujian dilakukan dalam periode waktu terbatas, sehingga tidak mencakup potensi degradasi material penyimpanan energi atau komponen lain dalam penggunaan jangka panjang.
4. Penelitian ini berfokus pada aspek teknis dan termal sistem tanpa mempertimbangkan secara rinci aspek ekonomi, seperti biaya instalasi, operasional, dan pemeliharaan sistem.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar-Dasar Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan fenomena alam yang fundamental, di mana energi panas berpindah dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah. Proses ini terjadi hingga tercapai kesetimbangan termal. Ada tiga mekanisme utama perpindahan panas, yakni konduksi, konveksi, dan radiasi (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Konduksi terjadi melalui kontak langsung antara partikel-partikel materi, seperti saat kita memegang sendok logam panas. Konveksi melibatkan perpindahan panas melalui aliran fluida, misalnya saat air mendidih. Radiasi, di sisi lain, adalah perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik, seperti panas yang kita rasakan dari matahari.

2.1.1. Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan energi kinetik partikel dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah melalui tumbukan antar partikel, energi panas ditransfer secara langsung melalui interaksi antara partikel-partikel dalam suatu zat (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Fenomena konduksi pada zat padat, terutama konduktor, memiliki implikasi yang luas dalam kehidupan sehari-hari, mulai dari memasak menggunakan panci logam hingga penggunaan kabel listrik. Zat padat, khususnya konduktor, merupakan medium ideal untuk konduksi karena struktur partikelnya yang rapat memungkinkan getaran kalor merambat dengan cepat antar partikel. Perpindahan kalor secara konduksi, yang mendeskripsikan aliran kalor melalui suatu material, secara matematis dinyatakan oleh Hukum

Fourier sebagaimana tertuang dalam Persamaan 2.1. Hukum ini memberikan hubungan kuantitatif antara laju aliran kalor, gradien suhu, dan konduktivitas termal material.

$$\dot{Q}_{cond} = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (W) \quad (2.1)$$

Dimana :

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

A : Luas bidang (m^2)

$\partial T / \partial x$: Gradien temperature (K)

k : Konduktivitas termal ($W/m.K$)

konduktivitas termal suatu material dapat didefinisikan sebagai laju perpindahan panas melalui satuan ketebalan material per satuan luas per satuan perbedaan suhu. Konduktivitas termal suatu material adalah ukuran kemampuan material untuk menghantarkan panas. Nilai konduktivitas termal yang tinggi menunjukkan bahwa material tersebut merupakan konduktor panas yang baik, dan nilai yang rendah menunjukkan bahwa material tersebut merupakan konduktor panas atau isolator yang buruk (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Tabel 2.1 berikut adalah beberapa bahan dengan konduksi termalnya.

Tabel 2.1. Nilai konduktivitas termal berbagai bahan

Material	$k, \text{W/m}\cdot\text{K}^*$
Diamond	2300
Silver	429
Copper	401
Gold	317
Aluminum	237
Iron	80.2
Mercury (l)	8.54
Glass	0.78
Brick	0.72
Water (l)	0.607
Human skin	0.37
Wood (oak)	0.17
Helium (g)	0.152
Soft rubber	0.13
Glass fiber	0.043
Air (g)	0.026
Urethane, rigid foam	0.026

2.1.2. Perpindahan Panas Konveksi

Konveksi adalah cara perpindahan energi antara permukaan padat dan cairan atau gas yang berdekatan yang sedang bergerak, dan ini melibatkan efek gabungan konduksi dan gerak fluida. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar pula perpindahan panas secara konveksi (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Ketika suatu bagian dari zat, seperti cairan atau gas, dipanaskan, densitasnya akan berkurang sehingga cenderung naik ke atas. Sebaliknya, bagian yang lebih dingin akan memiliki densitas yang lebih tinggi dan cenderung tenggelam. Pergerakan naik turun ini menciptakan aliran yang membawa energi panas dari daerah yang panas ke daerah yang dingin. Fenomena ini dapat terjadi secara alami akibat perbedaan suhu atau dipaksakan oleh gaya eksternal seperti kipas atau pompa.

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

Dimana :

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

- A_s : luas penampang (m^2)
 T_s : Temperatur absolut permukaan (K)
 T_∞ : temperatur sekitar (K)

2.1.3. Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan energi yang melibatkan emisi gelombang elektromagnetik. Spektrum radiasi sangat luas, mulai dari gelombang radio hingga sinar gamma, dengan masing-masing memiliki panjang gelombang dan energi yang berbeda. Kemampuan suatu benda untuk memancarkan, menyerap, atau memantulkan radiasi tergantung pada sifat permukaannya, suhu, dan komposisinya. Berbeda dengan konduksi yang memerlukan kontak langsung antara dua benda, dan konveksi yang memerlukan medium perantara berupa fluida, radiasi dapat terjadi dalam ruang hampa. Kecepatan perpindahan panas melalui radiasi jauh lebih cepat dibandingkan dengan konduksi atau konveksi, karena radiasi merambat dengan kecepatan cahaya. Selain itu, radiasi tidak hanya dipengaruhi oleh suhu, tetapi juga oleh sifat permukaan benda, seperti warna dan tekstur (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014).

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (2.3)$$

Dimana:

- ε : emisivitas (sifat radiasi permukaan)
 A_s : Luas penampang (m^2)
 σ : Konstanta *Stefan Boltzman* ($5,669 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)
 T_s : Temperatur Absolut Permukaan (K^4)
 T_{surr} : Temperatur sekitar (K^4)

2.2. Alat Penukar Panas (*Heat Exchangers*)

Heat Exchangers adalah perangkat yang memanfaatkan perbedaan suhu antara dua fluida untuk memindahkan energi panas. Prinsip kerjanya didasarkan pada perpindahan panas secara konveksi di dalam masing-masing fluida dan konduksi melalui dinding pemisah. Dengan demikian, penukar kalor memungkinkan transfer panas yang efisien tanpa adanya pencampuran fisik antara kedua fluida. Teknologi ini telah diaplikasikan secara luas dalam berbagai bidang industri (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Laju perpindahan kalor antara dua fluida di suatu lokasi dalam penukar kalor bergantung pada besarnya perbedaan temperatur di lokasi tersebut, yang bervariasi di sepanjang penukar kalor.

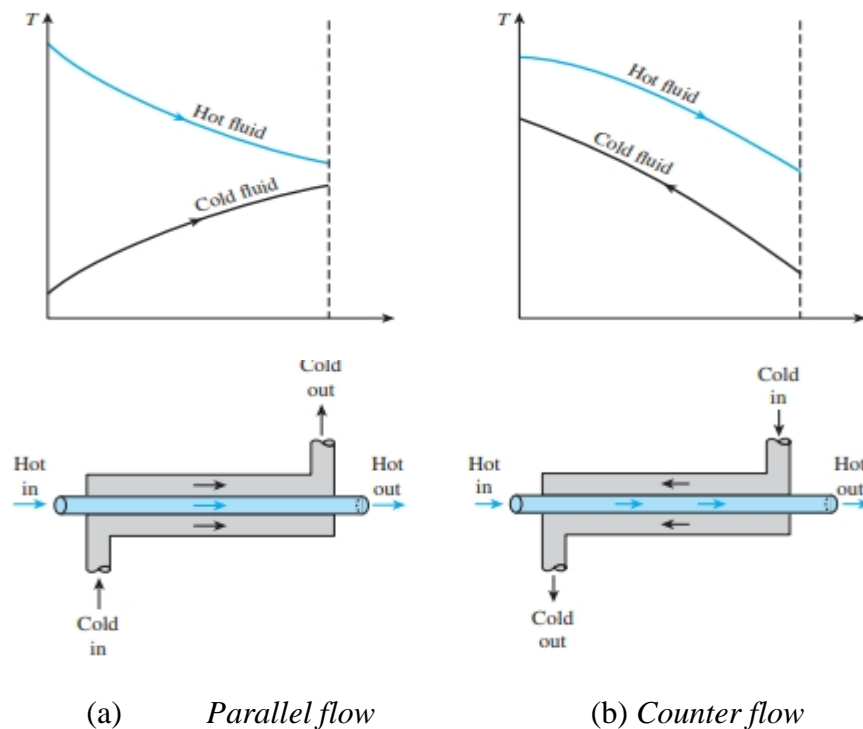
2.2.1. Jenis-jenis Alat Penukar Panas

Beragam aplikasi yang melibatkan perpindahan panas menuntut penggunaan perangkat penukar panas dengan desain spesifik. Upaya untuk memenuhi kebutuhan perpindahan panas yang beragam dalam berbagai kendala telah melahirkan beragam konfigurasi penukar panas yang inovatif. Berdasarkan konstruksinya, klasifikasi *heat exchangers* terbagi sebagai berikut.

a. *Double pipe heat exchanger*

Penukar panas pipa ganda adalah perangkat perpindahan panas yang sederhana namun efektif. Alat ini terdiri dari dua pipa yang saling bersusun, membentuk ruang annular di antara keduanya. Satu fluida mengalir di dalam pipa bagian dalam, sedangkan fluida lainnya mengalir di ruang annular. Arah aliran kedua fluida ini dapat diatur, baik searah maupun berlawanan arah. Pilihan arah aliran ini akan mempengaruhi efisiensi perpindahan panas dan profil suhu pada kedua fluida (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Pada gambar 2.1 merupakan jenis

penukar panas paling dasar yang terdiri dari dua pipa bersusun. Fluida proses mengalir melalui pipa bagian dalam, sementara fluida utilitas mengalir di ruang annular antara kedua pipa. Kedua fluida ini dapat mengalir secara paralel atau berlawanan arah, memengaruhi efisiensi perpindahan panas.

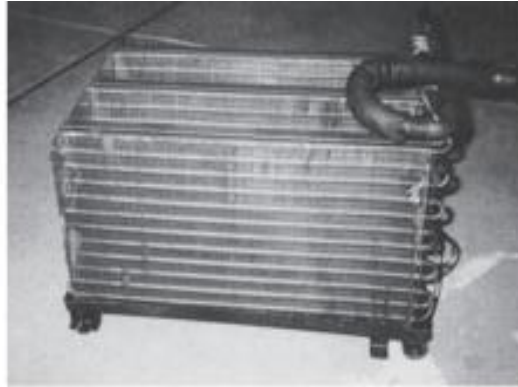


Gambar 2.1. Hubungan antara perbedaan arah aliran fluida dengan temperatur dalam *double pipe*

b. *Compact Heat Exchangers*

Penukar panas kompak adalah perangkat yang terdiri dari banyak pelat tipis atau sirip yang disusun sangat rapat. Desain ini memungkinkan luas permukaan kontak antara dua fluida menjadi sangat besar, sehingga panas dapat berpindah dengan sangat cepat. Penukar panas kompak berguna dalam aplikasi di mana ruang terbatas, seperti pada sistem pendingin kendaraan atau peralatan elektronik. Dengan menggunakan penukar panas kompak, kita dapat mencapai laju perpindahan panas

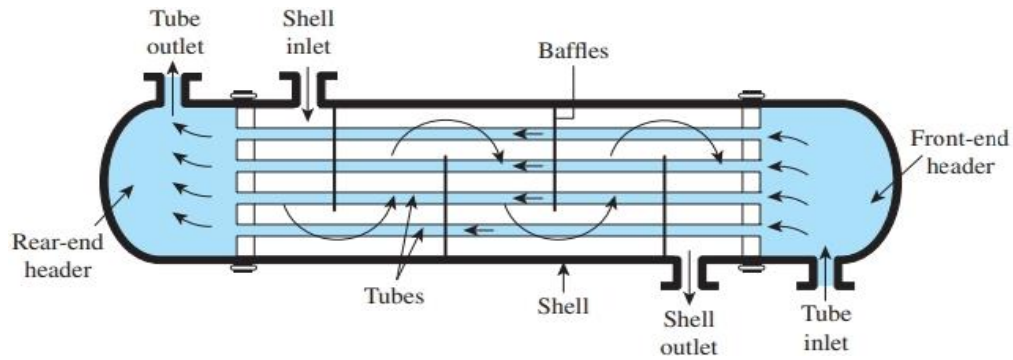
yang tinggi dalam volume yang kecil (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Pada gambar 2.2 memberikan contoh penukar panas pada radiator mobil dan pendingin udara.



Gambar 2.2. Contoh penukar panas pada radiator mobil dan pendingin udara

c. *Shell and Tube Heat Exchangers*

Penukar panas *Shell and Tube* adalah perangkat yang sangat umum digunakan dalam industri untuk mendinginkan atau memanaskan fluida. Alat ini terdiri dari banyak tabung kecil yang terpasang di dalam sebuah bejana yang lebih besar. Satu fluida mengalir melalui tabung, sementara fluida lainnya mengalir di ruang antara tabung dan bejana. Untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, biasanya dipasang sekat di dalam bejana untuk memaksa fluida mengalir dengan arah yang berliku-liku. Baffle yang dipasang di dalam shell berfungsi untuk mengarahkan aliran fluida di luar tabung agar kontak dengan permukaan tabung lebih luas, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Berikut adalah cara kerja *Shell and Tube Heat Exchangers* seperti pada gambar 2.3.

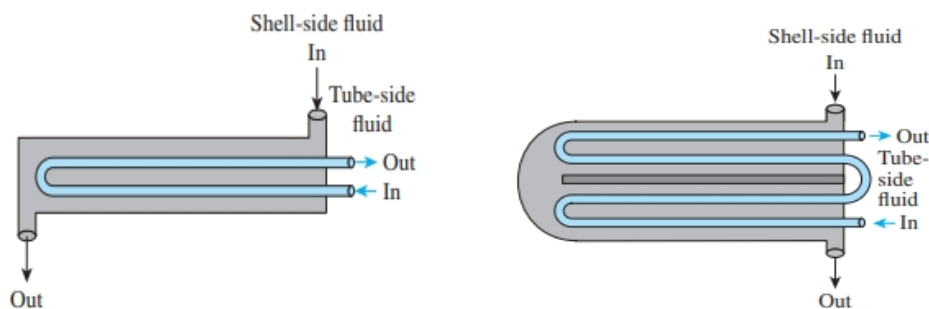


Gambar 2.3. Skema penukar panas *shell and tube*

- 1) *Shell* adalah casing atau rumah terluar dari penukar panas. *Shell* biasanya berbentuk silinder atau persegi panjang dan menyediakan dukungan struktural untuk komponen internal. *Shell* berisi saluran masuk dan keluar fluida sisi tabung dan sisi *shell*.
- 2) *Tube* adalah komponen inti penukar panas tempat terjadinya perpindahan panas. Tabung biasanya terbuat dari bahan seperti tembaga, baja tahan karat, atau berbagai paduan. Fluida sisi tabung mengalir melalui tabung ini, dan panas dipindahkan melalui dinding tabung ke fluida sisi *shell*.
- 3) *Tube sheets* adalah pelat datar tebal di ujung *shell* tempat tabung dipasang. Pelat ini berfungsi untuk mendukung dan mengamankan tabung di dalam *shell* dan membuat segel untuk mencegah kebocoran antara sisi tabung dan fluida sisi *shell*.
- 4) *Baffle* adalah komponen internal, sering kali dalam bentuk pelat atau batang logam, yang ditempatkan di dalam *shell*. Tujuan utamanya adalah untuk mengarahkan aliran fluida sisi *shell* dan meningkatkan perpindahan panas dengan menciptakan turbulensi. *Baffle* memastikan bahwa fluida sisi *shell* melewati dan mengelilingi tabung untuk memaksimalkan efisiensi pertukaran panas.

- 5) *Tube Bundle* merupakan kumpulan tabung, lembaran tabung, dan *baffle* sering disebut sebagai *tube bundle*. Ini adalah bagian perpindahan panas inti dari penukar panas, dan dapat dilepas untuk keperluan perawatan dan pembersihan.
- 6) *End Caps and Channel Covers* merupakan ujung *sheel* disegel dengan tutup ujung atau penutup saluran. Komponen ini mencegah fluida sisi *sheel* melewati *tube bundle* dan memastikan bahwa fluida mengalir di seluruh permukaan tabung.
- 7) *Inlet and Outlet Nozzles* adalah bukaan pada *sheel* tempat fluida panas dan dingin masuk dan keluar dari penukar panas. Biasanya terhubung ke pipa untuk pasokan dan pembuangan fluida.
- 8) *Supports* merupakan penukar panas *sheel* dan tabung sering dipasang pada struktur penyangga, yang dapat berupa kaki atau mekanisme penyangga lainnya. Penyangga ini menjaga penukar panas dalam posisi stabil dan memungkinkan penyelarasan yang tepat dengan sambungan pipa.
- 9) *Access Ports* merupakan penukar panas sering kali memiliki port akses atau lubang got, yang memungkinkan pemeriksaan, pemeliharaan, dan pembersihan bagian dalam, terutama *tube bundle*.
- 10) *Gaskets and Seals* merupakan gasket, cincin-O, atau bahan penyegel lainnya digunakan untuk memastikan tidak ada kebocoran antara cairan sisi tabung dan sisi *sheel*. Segel yang tepat sangat penting untuk efisiensi dan keamanan penukar panas.
- 11) *Vent and Drain Connections* merupakan sambungan ventilasi dan pembuangan digunakan untuk membersihkan udara dari sistem dan menguras cairan bila perlu.

Shell and Tube Heat Exchangers diklasifikasikan lebih lanjut menurut jumlah lintasan dan pipa yang terlibat. Penukar kalor yang semua tabungnya membuat satu putaran balik di lintasan, misalnya, disebut penukar kalor lintasan tunggal dan lintasan tabung ganda. Demikian pula, penukar kalor yang melibatkan dua lintasan dan empat lintasan di tabung disebut penukar kalor lintasan ganda dan empat lintasan tabung seperti pada gambar 2.4.



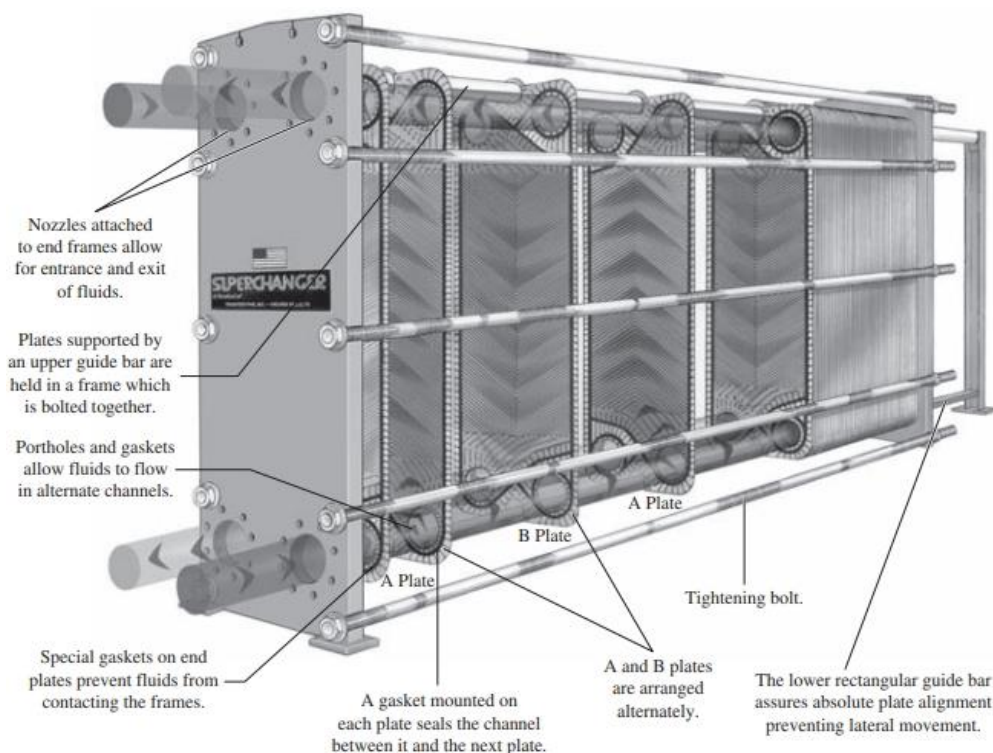
(a) Lintasan satu *shell* dan dua tabung (b) Lintasan dua *shell* dan empat tabung

Gambar 2.4. Pengaturan aliran multipass pada penukar kalor *shell and tube*

d. *Plate and Frame Heat Exchangers*

Penukar kalor pelat dan rangka merupakan jenis penukar kalor konvektif yang populer, terdiri dari susunan pelat beralur yang menyediakan luas permukaan perpindahan panas yang besar per satuan volume. Konfigurasi aliran kontraflow yang dihasilkan oleh saluran aliran bergelombang memungkinkan koefisien perpindahan panas yang tinggi, terutama pada fluida dengan viskositas rendah. Fleksibilitas dalam desain memungkinkan penyesuaian kapasitas penukar kalor dengan mudah melalui penambahan atau pengurangan jumlah pelat. Namun, penukar kalor jenis ini umumnya terbatas pada aplikasi dengan perbedaan tekanan yang rendah antara fluida panas dan dingin. Penukar kalor regeneratif, baik tipe statis maupun dinamis, menawarkan pendekatan alternatif dengan memanfaatkan

media penyimpanan panas untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Regenerator statis, yang umumnya terdiri dari matriks berpori, memungkinkan penyimpanan panas laten dan sensibel secara simultan. Regenerator dinamis, seperti rotary regenerator, memanfaatkan gerakan relatif antara matriks dan fluida untuk mencapai siklus penyimpanan dan pelepasan panas yang kontinu. Kedua jenis regenerator ini sangat cocok untuk aplikasi dengan fluida kerja yang memiliki kapasitas panas spesifik yang tinggi atau ketika perbedaan suhu antara fluida panas dan dingin relatif kecil.

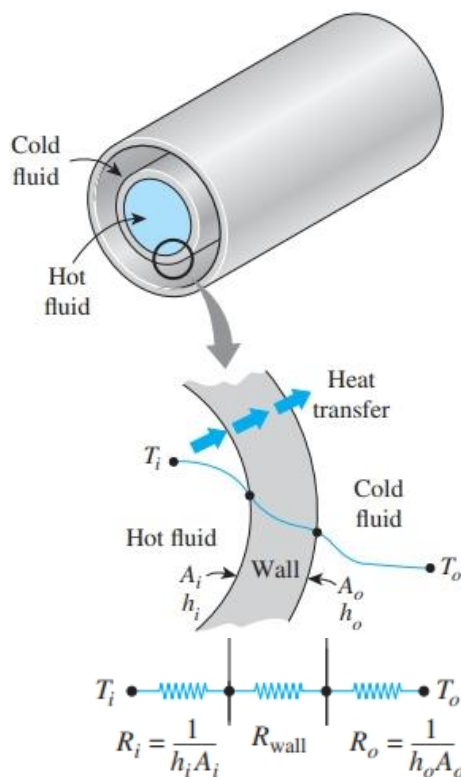


Gambar 2.5. Penukar panas cair ke-cairan pelat-dan-rangka

2.2.2. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Penukar panas adalah alat yang digunakan untuk mentransfer energi panas dari satu zat cair ke zat cair lainnya. Proses ini melibatkan tiga tahap utama. Pertama, fluida panas melepaskan panas ke dinding penukar panas melalui proses

konveksi. Panas kemudian merambat melalui dinding padat menuju sisi yang lebih dingin melalui konduksi. Terakhir, panas yang telah melewati dinding diserap oleh fluida dingin yang mengalir di sisi lainnya, juga melalui mekanisme konveksi. Efek radiasi biasanya termasuk dalam koefisien perpindahan panas konveksi (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Jaringan resistansi termal yang terkait dengan proses perpindahan panas ini melibatkan dua resistansi konveksi dan satu resistansi konduksi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Resistansi termal pada penukar panas pipa ganda

Resistansi konduksi dapat dinyatakan dalam persamaan 2.4 berikut :

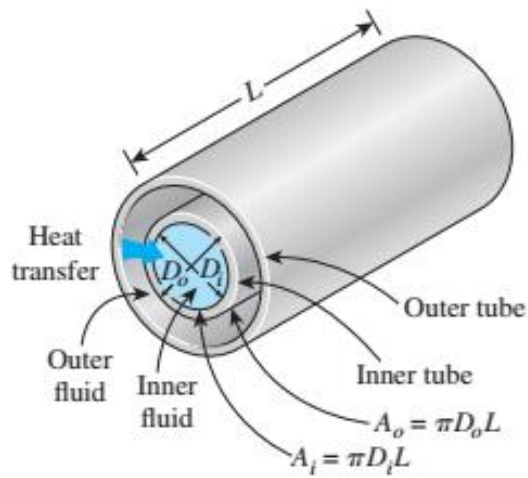
$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (2.4)$$

dimana k merupakan konduktivitas termal bahan ($W/m.K$) dan L merupakan panjang tabung (m). Resistansi konveksi dapat dinyatakan dalam persamaan 2.5 berikut :

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_s} \quad (2.5)$$

dimana h merupakan koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot K$) dan A_s merupakan luas permukaan perpindahan panas konveksi (m^2). Kemudian resistansi termal total menjadi persamaan 2.6

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.6)$$



Gambar 2.7. Penukar panas pipa ganda pada dua luas permukaan

Jika satu cairan melalui tabung seperti gambar 2.7. maka area luas penampang masing-masing area silinder dalam menggunakan persamaan 2.7

$$A_i = \pi D_i L \quad \text{dan} \quad A_o = \pi D_o L \quad (2.7)$$

Dalam analisis penukar panas, menggabungkan semua hambatan termal akan lebih mudah jika aliran panas dari fluida panas ke fluida dingin ke dalam resistansi tunggal R , kemudian untuk menyatakan laju perpindahan panas kedua fluida dapat dituliskan dalam persamaan 2.8 (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014).

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} U A_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (2.8)$$

Dimana :

A_s : luas permukaan (m^2)

U : koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2.K$)

2.2.3. Aliran Laminar dan Turbulen dalam Tabung

Jenis aliran fluida dalam pipa dapat dikategorikan menjadi laminar atau turbulen, bergantung pada kecepatan aliran. Pada kecepatan rendah, aliran cenderung laminar, di mana partikel-partikel fluida bergerak sejajar dalam lapisan-lapisan. Namun, ketika kecepatan ditingkatkan melampaui nilai kritis tertentu, aliran akan bertransisi menjadi turbulen, ditandai dengan gerakan partikel yang acak dan tidak beraturan. Transisi ini bersifat bertahap dan melibatkan fluktuasi antara kedua jenis aliran. Dalam aplikasi praktis, sebagian besar aliran pipa bersifat turbulen. Aliran laminar lebih sering ditemui pada fluida viskos tinggi seperti minyak yang mengalir dalam saluran berdiameter kecil. Untuk aliran dalam tabung melingkar, bilangan Reynolds didefinisikan sebagai berikut :

$$Re = \frac{V_{avg}D}{\nu} = \frac{\rho V_{avg}D}{\mu} = \frac{\rho D}{\mu} \left(\frac{\dot{m}}{\rho \pi D^2 / 4} \right) = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D} \quad (2.9)$$

di mana V_{avg} adalah kecepatan aliran rata-rata, D adalah diameter tabung, dan $\nu = \mu / \rho$ adalah viskositas kinematik fluida.

Pada aliran transisi, sifat aliran terus berfluktuasi antara laminar dan turbulen. Namun, dalam kondisi yang sangat terkendali, seperti pada pipa yang sangat halus dan bebas dari gangguan, aliran laminar dapat dipertahankan pada bilangan Reynolds jauh lebih tinggi dari nilai kritis umumnya. Studi eksperimental telah menunjukkan bahwa aliran laminar dapat bertahan hingga bilangan Reynolds mencapai 100.000 dalam kondisi seperti ini (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014).

Pada saluran masuk air yang paling dekat dengan dinding pipa akan "menempel" pada dinding karena gesekan. Ini menyebabkan air di lapisan berikutnya melambat sedikit karena gesekan dengan lapisan pertama. Proses ini berlanjut ke lapisan berikutnya, sehingga kecepatan air akan semakin tinggi saat kita bergerak menjauh dari dinding pipa menuju pusat pipa. Lapisan tipis di dekat dinding pipa di mana kecepatan air berubah secara drastis disebut lapisan batas. Di luar lapisan batas, kecepatan air cenderung konstan. Semakin jauh air mengalir di dalam pipa, lapisan batas ini akan semakin tebal hingga akhirnya mengisi seluruh pipa. Selain kecepatan, suhu air juga bisa berubah di dalam pipa. Jika dinding pipa lebih panas atau lebih dingin dari air, maka akan terjadi perpindahan panas antara dinding pipa dan air. Ini akan menciptakan lapisan batas suhu, di mana suhu air berubah secara drastis. Sama seperti lapisan batas kecepatan, lapisan batas suhu juga akan semakin tebal seiring dengan aliran air.

2.2.4. Bilangan Reynold

Reynold Number adalah sebuah bilangan tak berdimensi yang digunakan dalam mekanika fluida untuk memprediksi apakah aliran fluida akan laminar atau turbulen. Bilangan ini merupakan rasio antara gaya inersia dan gaya viskos dalam fluida. Transisi aliran dari laminar ke turbulen merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh beragam parameter, termasuk geometri permukaan, kekasaran permukaan, kecepatan aliran, temperatur permukaan, dan sifat-sifat fluidanya. Melalui serangkaian eksperimen ekstensif pada akhir abad ke-19, Osborne Reynolds berhasil mengidentifikasi bahwa karakteristik aliran suatu fluida sangat bergantung pada perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos yang bekerja di dalamnya. Perbandingan ini, yang dikenal sebagai bilangan Reynolds,

merupakan besaran tak berdimensi yang umum digunakan untuk aliran eksternal (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014).

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya viskos}} = \frac{VLc}{\nu} = \frac{\rho VLc}{\mu} \quad (2.10)$$

Dimana :

V : Kecepatan Awal

Lc : Panjang Karakteristik Geometri

ν : Viskositas Kinematik Fluida

ν yang merupakan viskositas kinematik fluida memiliki satuan m^2/s , yang identik dengan satuan difusivitas termal, dan dapat dilihat sebagai difusivitas viskos atau difusivitas untuk momentum seperti dalam persamaan 2.11 berikut.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (m^2/s) \quad (2.11)$$

Pada bilangan Reynolds tinggi, dominasi gaya inersia menyebabkan fluktuasi acak yang signifikan dalam fluida, mengakibatkan aliran turbulen. Sebaliknya, pada bilangan Reynolds rendah, efek viskositas mendominasi, menstabilkan aliran dan menghasilkan profil kecepatan laminar (Cengel, Y. A., & Ghajar, 2014). Nilai kritis bilangan Reynolds, yang diterima secara umum adalah $Re_{cr} = Vx_{cr} / \nu = 5 \times 10^5$, di mana x_{cr} adalah jarak dari tepi depan pelat di mana transisi dari laminar ke aliran turbulen terjadi. Nilai Re_{cr} bisa berubah tergantung pada tingkat turbulensi dalam aliran bebas, hal ini menandai transisi antara kedua rezim aliran sangat bergantung pada geometri permukaan dan kondisi batas aliran.

2.3. Penyimpan Energi Panas

Penyimpanan energi termal memberikan teknologi cadangan praktis mengenai pasokan dan permintaan energi serta pemulihan panas limbah. Selain itu, bahan pengubah fase diperhitungkan sebagai bahan hemat energi yang menjanjikan karena potensinya untuk menyimpan dan melepaskan sejumlah besar panas laten saat melalui proses transisi fase isothermal, menyediakan energi pemanasan atau pendinginan yang berlaku. Secara umum, transisi seperti itu adalah dari keadaan padat atau cair ke yang lain (Bazri et al., 2022). Bahan pengubah fasa (PCM) memiliki kemampuan unik untuk menyimpan dan melepaskan energi dalam jumlah besar saat berubah wujud antara padat dan cair. Proses ini disebut perubahan fase. Energi yang disimpan atau dilepaskan saat perubahan fase ini jauh lebih besar dibandingkan dengan energi yang disimpan akibat perubahan suhu (panas sensibel). Kemampuan penyimpanan energi yang tinggi ini berkat struktur internal PCM yang memungkinkan terjadinya perubahan fase. Proses penyerapan dan pelepasan panas dalam media penyimpanan dapat terjadi melalui tiga cara utama: radiasi, konduksi, dan konveksi, yang dapat diketahui pada persamaan 2.12.

$$Q = mC_p (T_f - T_i) \quad (2.12)$$

Energi internal merupakan energi molekuler dari suatu sistem, dan terdiri dari bentuk energi sensibel, laten, kimia, dan nuklir. Bentuk energi internal sensibel dan laten dapat ditransfer dari satu medium ke medium lain sebagai akibat dari perbedaan suhu, dan disebut sebagai panas atau energi termal. Dengan demikian, perpindahan panas adalah pertukaran bentuk energi internal sensibel dan laten antara dua medium sebagai akibat dari perbedaan suhu. Panas laten dan sensibel adalah dua konsep penting dalam termodinamika yang berkaitan dengan perubahan

energi dalam suatu zat. Panas sensibel adalah energi yang menyebabkan perubahan suhu suatu zat tanpa mengubah wujudnya, seperti saat air dipanaskan dan menjadi lebih hangat. Sementara itu, panas laten adalah energi yang diserap atau dilepaskan saat suatu zat mengalami perubahan wujud, seperti saat es mencair menjadi air atau air menguap menjadi uap air. Meskipun keduanya merupakan bentuk energi panas, panas laten tidak menyebabkan perubahan suhu, melainkan digunakan untuk memecah atau membentuk ikatan antar molekul selama perubahan wujud terjadi. Untuk menghitung jumlah kalor yang dibutuhkan dalam menaikkan atau menurunkan suhu suatu zat pada panas sensible, dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$Q = mc\Delta T \quad (2.13)$$

Dimana :

Q = Jumlah kalor (J atau kalori)

m = Massa zat (kg atau gram)

c = Kalor jenis zat ($J/kg^{\circ}C$ atau $kal/g^{\circ}C$)

ΔT = Perubahan suhu ($^{\circ}C$)

Untuk menghitung jumlah kalor yang dibutuhkan untuk mengubah wujud suatu zat pada suhu tetap pada panas laten, dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$Q = mL \quad (2.14)$$

Dimana :

Q = Jumlah kalor (J atau kalori)

m = Massa zat (kg atau gram)

L = Kalor laten (J/kg atau kal/g)

Kalor laten memiliki jenis yang berbeda-beda, seperti:

- Kalor laten fusi: L_f , untuk perubahan wujud dari padat ke cair.
- Kalor laten uap: L_v , untuk perubahan wujud dari cair ke gas.

2.4. Phase Change Material (PCM)

PCM adalah suatu material yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan melepaskan panas laten saat mengalami perubahan fase, umumnya dari padat ke cair atau sebaliknya. Proses perubahan fase ini terjadi pada suhu yang relatif konstan, sehingga PCM dapat digunakan sebagai media penyimpanan energi panas atau dingin.

Prinsip kerja PCM sangat sederhana, pada saat menyerap panas, PCM akan meleleh dan menyimpan energi panas dalam bentuk energi laten. Sebaliknya, saat melepaskan panas, PCM akan membeku dan melepaskan energi yang tersimpan sebelumnya. Kemampuan inilah yang membuat PCM sangat berguna dalam berbagai aplikasi, mulai dari bangunan hingga elektronik. Keunggulan PCM meliputi:

- a. Daya tahan termal tinggi : Karena PCM menyerap dan melepaskan panas pada suhu konstan, menjaga suhu lingkungan tetap stabil dalam jangka waktu yang lama.
- b. Densitas energi tinggi : PCM dapat menyimpan energi panas dalam jumlah yang besar dalam volume yang relatif kecil.
- c. Lingkungan : Banyak PCM yang bersifat non-toksik dan ramah lingkungan.
- d. Aplikasi luas : PCM dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti bangunan, tekstil, elektronik, dan transportasi.

Jenis-jenis PCM :

- a. PCM organik : Umumnya berupa asam lemak, garam hidrat, atau paraffin.
- b. PCM anorganik : Biasanya berupa garam hidrat atau logam.

Pemilihan jenis PCM yang tepat sangat bergantung pada aplikasi yang dituju.

Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan antara lain:

- a. Suhu perubahan fase : Harus sesuai dengan rentang suhu yang diinginkan.
- b. Kapasitas panas laten : Semakin tinggi, maka akan semakin banyak energi yang dapat disimpan.
- c. Kestabilan kimia : PCM harus stabil dalam jangka waktu yang lama.
- d. Biaya : Harga PCM bervariasi tergantung pada jenis dan kemurniannya.

PCM merupakan material yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan pengelolaan energi panas. Dengan memahami prinsip kerja dan keunggulannya, PCM dapat dimanfaatkan secara optimal untuk meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan manusia.

2.4.1.Parafin

Parafin merupakan salah satu jenis PCM organik yang populer dengan sifat-sifat yang membuatnya cocok sebagai media penyimpanan energi panas. Dengan titik leleh yang beragam, kapasitas panas laten yang tinggi, serta sifat non-toksik dan stabil secara kimia, parafin dapat dengan mudah menyerap dan melepaskan panas laten saat mengalami perubahan fase. Hal ini memungkinkan parafin digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari bangunan hingga industri makanan. Meskipun memiliki kelebihan seperti mudah dibentuk dan kompatibel dengan berbagai material, parafin juga memiliki kekurangan seperti perubahan volume saat

mengalami perubahan fase dan konduktivitas termal yang rendah. Namun demikian, dengan pemilihan jenis parafin yang tepat, parafin tetap menjadi pilihan yang menarik sebagai bahan PCM karena ketersediaannya yang luas dan harganya yang terjangkau.

Parafin umumnya diperoleh dari minyak bumi melalui proses penyulingan. Proses ini memisahkan berbagai komponen minyak mentah berdasarkan titik didihnya. Fraksi yang mengandung parafin memiliki titik didih yang lebih tinggi dibandingkan fraksi bensin atau solar. Setelah proses distilasi, parafin yang diperoleh masih berupa campuran hidrokarbon. Untuk mendapatkan parafin dengan kemurnian tinggi, dilakukan proses pemurnian lebih lanjut. Kerapatan parafin merupakan sifat fisik yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti panjang rantai karbon, suhu, dan kemurnian. Semakin panjang rantai karbon, semakin tinggi kerapatannya. Selain itu, kerapatan parafin juga berbanding terbalik dengan suhu, artinya semakin tinggi suhu, semakin rendah kerapatannya. Secara umum, kerapatan parafin berkisar antara $0,88 - 0,91 \text{ gr/cm}^3$ pada suhu kamar. Perlu diingat bahwa kerapatan dan massa jenis adalah besaran yang setara. Oleh karena itu, massa jenis parafin juga berada dalam rentang yang sama, yaitu sekitar $880 - 910 \text{ Kg/m}^3$ pada suhu kamar.

2.4.2. Asam Stearat (*Stearic Acid*)

Asam stearat memiliki rumus kimia $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ dengan nama IUPAC asam Oktadekanoat. Asam oktadekanoat adalah nama IUPAC dari asam stearat yang merupakan asam lemak jenuh yang dapat diperoleh dari lemak hewani maupun minyak tumbuhan seperti pada CPO. Kata stearat berasal dari bahasa Yunani *stear* yang artinya “lemak padat”. Asam stearat memiliki rumus molekul

$CH_3(CH_2)_{16}COOH$. Asam stearat berbentuk padat putih atau berwarna kekuningan pada suhu kamar, dan memiliki titik leleh sekitar 69-70°C, membuatnya cocok digunakan dalam produk yang memerlukan stabilitas pada suhu tinggi.

2.4.3. Asam Palmitat (*Palmitic Acid*)

Asam palmitat merupakan asam lemak jenuh yang umum ditemukan di alam, terutama dalam bentuk trigliserida. Molekulnya terdiri dari rantai karbon lurus dengan 16 atom karbon yang semuanya terikat oleh ikatan tunggal ($CH_3(CH_2)_{14}COOH$). Pada suhu ruang, asam palmitat berwujud padat berwarna putih. Titik leburnya 63,1 °C. Asam palmitat atau asam heksadekanoat dapat diperoleh dari tumbuh-tumbuhan dengan famili Palmaceae, seperti kelapa (*Cocos nucifera*) dan kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). Minyak kelapa bahkan mengandung hampir semuanya palmitat (92%). Sifatnya yang padat pada suhu ruang dan tidak larut dalam air membuatnya memiliki titik leleh yang relatif tinggi. Sebagai asam lemak, ia memiliki gugus karboksil yang membuatnya bersifat asam dan dapat bereaksi dengan basa membentuk sabun. Selain itu, asam palmitat juga berperan penting dalam pembentukan membran sel dan sebagai cadangan energi dalam tubuh. Dalam industri, asam palmitat digunakan secara luas dalam pembuatan kosmetik, makanan, farmasi, dan berbagai produk kimia lainnya.

2.4.4. Lilin Kelapa (*Coconut Wax*)

Coconut wax, sebagai material perubahan fasa (PCM) organik, menjanjikan potensi besar dalam aplikasi penyimpanan energi termal. Karakteristik titik lelehnya yang relatif tinggi, kapasitas panas laten yang baik, serta sifat non-toksiknya menjadikan *coconut wax* sebagai kandidat ideal untuk menyimpan energi panas laten. Dalam konteks konversi energi, *coconut wax* dapat berfungsi sebagai

media penyimpanan energi sementara, menyerap kelebihan panas saat sistem beroperasi dan melepaskannya kembali ketika dibutuhkan. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi sistem konversi energi, terutama dalam aplikasi yang melibatkan fluktuasi beban panas. Selain itu, konduktivitas termal *coconut wax* yang rendah membuatnya menjadi isolator panas yang baik, sehingga meminimalkan kehilangan panas selama proses penyimpanan. *Coconut wax* memiliki titik leleh antara 50-65°C, meskipun bisa bervariasi tergantung pada proses produksi dan kemurnian. Nilai kapasitas panas laten *coconut wax* bervariasi tergantung pada suhu dan tekanan, namun umumnya cukup tinggi. Konduktivitas termal yang relatif rendah, menandakan *coconut wax* merupakan isolator panas yang baik. Dengan densitas sekitar 0,92-0,95 g/cm³, yang membuatnya ringan dan mudah dibentuk. Dan ketika meleleh, *coconut wax* memiliki viskositas yang cukup tinggi, yang dapat mempengaruhi laju pelepasan panas.

2.4.5. Lilin Kelapa Sawit (*Palm Wax*)

Palm wax, sebagai material perubahan fasa (PCM) alami, menawarkan potensi signifikan dalam aplikasi penyimpanan energi termal. Karakteristik titik lelehnya yang relatif tinggi dan kapasitas panas laten yang baik menjadikannya kandidat ideal untuk menyerap dan melepaskan energi panas secara efisien. Dalam konteks konversi energi, *palm wax* dapat berfungsi sebagai media penyimpanan energi sementara, sehingga dapat meredam fluktuasi beban panas dan meningkatkan efisiensi sistem. Struktur molekulnya yang keras dan tahan lama juga menjadikannya cocok untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap siklus termal berulang. Dengan demikian, *palm wax* dapat berkontribusi dalam pengembangan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Titik Leleh *palm*

wax umumnya berkisar antara 60-78°C, namun bisa bervariasi tergantung pada proses produksi dan kemurnian. Kapasitas panas laten *palm wax* bervariasi tergantung pada suhu dan tekanan, namun umumnya cukup tinggi. Konduktivitas thermal yang relatif rendah, membuatnya menjadi isolator panas yang baik. Densitas *palm wax* sekitar 0,91-0,94 g/cm³, membuatnya ringan dan mudah dibentuk. *Palm wax* memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan beberapa jenis lilin lainnya, membuatnya cocok untuk aplikasi yang membutuhkan bentuk yang stabil.

2.4.6. Lilin Kedelai (*Soy Wax*)

Soy wax sebagai material perubahan fasa (PCM) berbasis nabati, menawarkan potensi yang menjanjikan dalam aplikasi penyimpanan energi termal. Dengan titik leleh yang dapat disesuaikan dan kapasitas panas laten yang baik, *soy wax* mampu menyerap dan melepaskan energi panas secara efisien. Dalam konteks konversi energi, *soy wax* dapat berfungsi sebagai media penyimpanan energi sementara, sehingga dapat meredam fluktuasi beban panas dan meningkatkan efisiensi sistem. Sifatnya yang non-toksik dan ramah lingkungan juga menjadikannya pilihan yang menarik untuk aplikasi yang berkelanjutan. Penggunaan *soy wax* sebagai PCM dapat berkontribusi pada pengembangan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan, terutama dalam bangunan berenergi rendah dan sistem pembangkit listrik terbarukan.

Titik leleh *soy wax* umumnya berkisar antara 49-62°C, namun bisa bervariasi tergantung pada proses produksi dan pencampuran dengan bahan lain. Untuk kapasitas panas laten *soy wax* dapat bervariasi tergantung pada suhu dan tekanan, namun umumnya kapasitas panas laten *soy wax* cukup tinggi. Konduktivitas

thermal yang relatif rendah, membuat *soy wax* menjadi isolator panas yang baik. Kemudian dengan densitas sekitar 0,92-0,94 g/cm³, membuat *soy wax* menjadi lebih ringan dan mudah dibentuk. Pada tabel 2.2. berikut menerangkan beberapa perbandingan dari sifat fisik beberapa PCM.

Tabel 2.2. Perbandingan sifat fisik beberapa PCM

Jenis Bahan PCM	Kisaran Titik Leleh (°C)	Massa Jenis (g/cm ³)	Fungsi
Parafin Wax	47-68	0,90 - 0,93	Bahan dasar lilin
Coconut Wax	50-65	0,92 - 0,95	Bahan dasar lilin, memberikan aroma khas
Palm Wax	60-78	0,91 - 0,94	Bahan dasar lilin, keras dan tahan lama
Soy Wax	49-62	0,92 - 0,94	Bahan dasar lilin, lembut dan alami
Stearic Acid	69-72	0,94	Pengeras lilin, meningkatkan titik leleh
Palmitic Acid	63-64	0,852	Pengeras lilin, meningkatkan kekerasan

2.5. *Solar Water Heating Systems (SWHS)*

SWH adalah metode inovatif dan efisien yang memanfaatkan kekuatan radiasi matahari untuk menghasilkan energi termal, khususnya untuk tujuan memanaskan air. Sistem pemanas air beroperasi dengan memanfaatkan kolektor surya, yang merupakan permukaan gelap yang dirancang untuk menyerap radiasi matahari dan meminimalkan kehilangan panas. Dua jenis kolektor utama yang digunakan dalam SWHS adalah kolektor pelat datar dan kolektor tabung hampa. Salah satu manfaat utama yang ditawarkan oleh SWHS adalah kemampuannya untuk memanfaatkan energi matahari yang bebas dan tak terbatas untuk memanaskan air. Hal ini tidak

hanya memberikan solusi yang berkelanjutan tetapi juga membantu mengurangi tagihan listrik yang terkait dengan metode pemanas air tradisional. Dengan mengurangi ketergantungan pada sumber konvensional yang mahal, konsumen dapat menghemat uang untuk tagihan listrik, yang dapat berkontribusi untuk melunasi investasi awal dalam memasang SWHS. Khususnya, setelah dipasang, SWHS memerlukan perawatan minimal sambil membanggakan masa pakai yang lebih lama dibandingkan dengan sistem pemanas konvensional. Selain itu, ia menunjukkan efisiensi yang luar biasa dengan memanfaatkan hingga 80% radiasi matahari untuk keperluan pemanas air (Herez dkk., 2023).

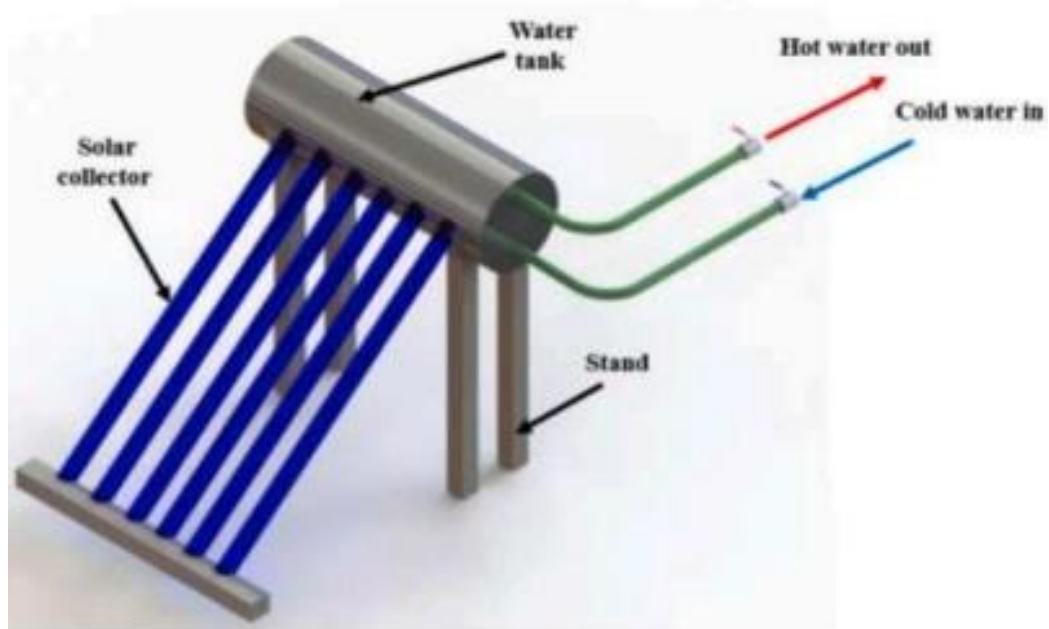
2.5.1. Metode Sirkulasi Aliran SWHS

SWHS pasif memiliki keunggulan tersendiri dibandingkan sistem aktif, karena tidak memerlukan pompa atau komponen bergerak untuk mengalirkan fluida antara tangki penyimpanan dan kolektor. Sebaliknya, SWHS aktif mengandalkan gaya mekanis untuk memastikan sirkulasi fluida yang tepat di seluruh sistem. Sistem ini menggunakan pompa, katup, dan pengontrol untuk memfasilitasi pergerakan fluida pemindah panas melalui kolektor dalam apa yang dikenal sebagai sirkulasi paksa. Sementara sistem aktif ini menawarkan manfaat tertentu seperti kontrol distribusi panas yang ditingkatkan, ketergantungannya pada teknologi yang lebih kompleks membuatnya lebih mahal untuk dipasang dan dirawat dibandingkan dengan alternatif pasif (Herez dkk., 2023).

(a) *Thermosiphon system*

Termosifon merupakan salah satu jenis SWHS yang beroperasi berdasarkan konveksi alami. Sistem ini memanfaatkan prinsip bahwa ketika air di kolektor dipanaskan oleh matahari, maka air tersebut akan mengembang dan kepadatannya

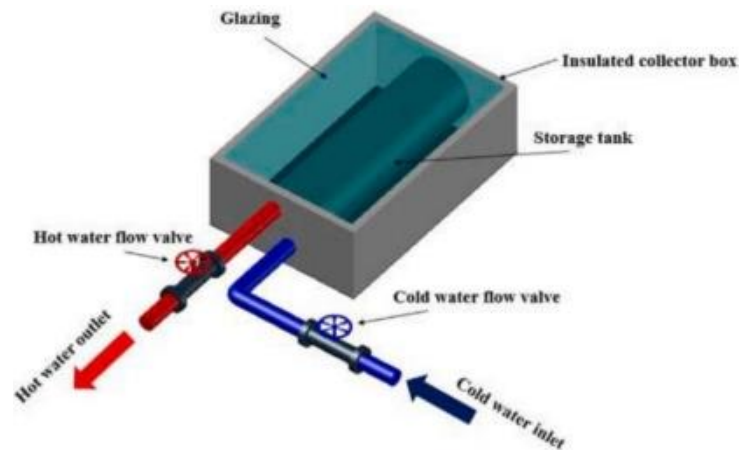
akan berkurang. Hal ini menyebabkan air yang lebih dingin dan lebih padat dari tangki penyimpanan, yang terletak di atas kolektor, mengalir ke bawah menuju kolektor (Herez dkk., 2023).



Gambar 2.8. SWHS tipe Termosifon

(b) *Integrated collector storage*

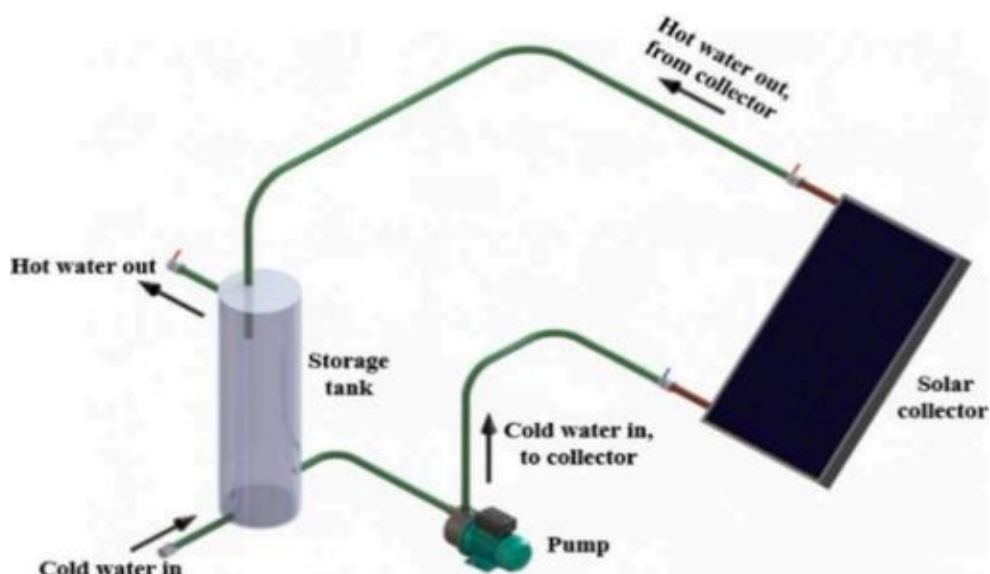
Sistem penyimpanan kolektor terintegrasi, juga dikenal sebagai sistem batch, berfungsi serupa dengan sistem termosifon. Namun ada satu perbedaan utama, yaitu tangki penyimpanan berfungsi ganda sebagai kolektor dalam pengaturannya. Tangki penyimpanan ditempatkan di dalam kotak terisolasi yang memiliki satu sisi kaca yang memungkinkan radiasi matahari menghangatkan tangki. Salah satu kelemahan utama dari jenis sistem ini adalah kehilangan termal yang dialami selama jam malam, musim dingin atau pada hari-hari dengan langit mendung dan suhu sekitar rendah di mana lebih sedikit sinar matahari dapat diserap oleh permukaan kaca kotak yang mengelilingi tangki itu sendiri (Herez dkk., 2023).



Gambar 2.9. SWHS tipe penyimpanan kolektor terintegrasi

(c) *Open-loop system*

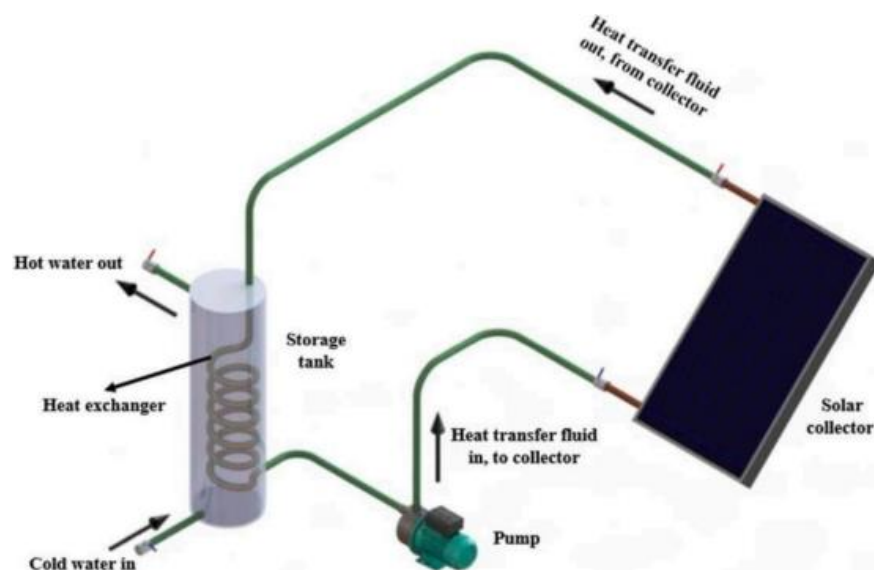
Sistem SWHS aktif langsung beroperasi dengan mengalirkan air langsung dari tangki penyimpanan ke kolektor menggunakan pompa. Setelah dipanaskan oleh energi matahari, air dikembalikan ke tangki penyimpanan untuk digunakan kemudian. Perlu dicatat bahwa kolektor dan tangki penyimpanan dapat diposisikan di atas atau di bawah satu sama lain tergantung pada berbagai faktor. Biasanya, sistem jenis ini menggunakan satu tangki penyimpanan, meskipun dapat juga diintegrasikan dengan sistem penyimpanan dua tangki (Herez dkk., 2023).



Gambar 2.10. SWHS dengan Sistem loop terbuka

(d) *Closed-loop system*

Sistem aktif loop tertutup digunakan untuk memanaskan air secara tidak langsung dengan mengalirkan fluida pemindah panas melalui kolektor. Fluida pemindah panas ini, yang umumnya berupa campuran air dan etilen glikol, menyerap energi matahari dari kolektor yang terpapar sinar matahari dan memindahkannya ke air dalam tangki penyimpanan melalui penukar panas. Gambar 2.11 mengilustrasikan konfigurasi sistem loop tertutup ini. Selain menggunakan larutan air/etilen glikol, fluida alternatif seperti minyak silikon atau refrigeran juga dapat digunakan sebagai media pemindah panas. Namun, jika fluida beracun atau tidak dapat diminum digunakan dalam proses ini, penukar panas berdinding ganda perlu disertakan demi alasan keamanan. Bergantung pada persyaratan dan batasan khusus dari setiap skenario pemasangan, opsi penempatan untuk penukar panas meliputi di dalam tangki penyimpanan itu sendiri, di sekitar area permukaan luarnya, atau terhubung secara eksternal tetapi tetap menjadi bagian dari keseluruhan desain sistem (Herez dkk., 2023).

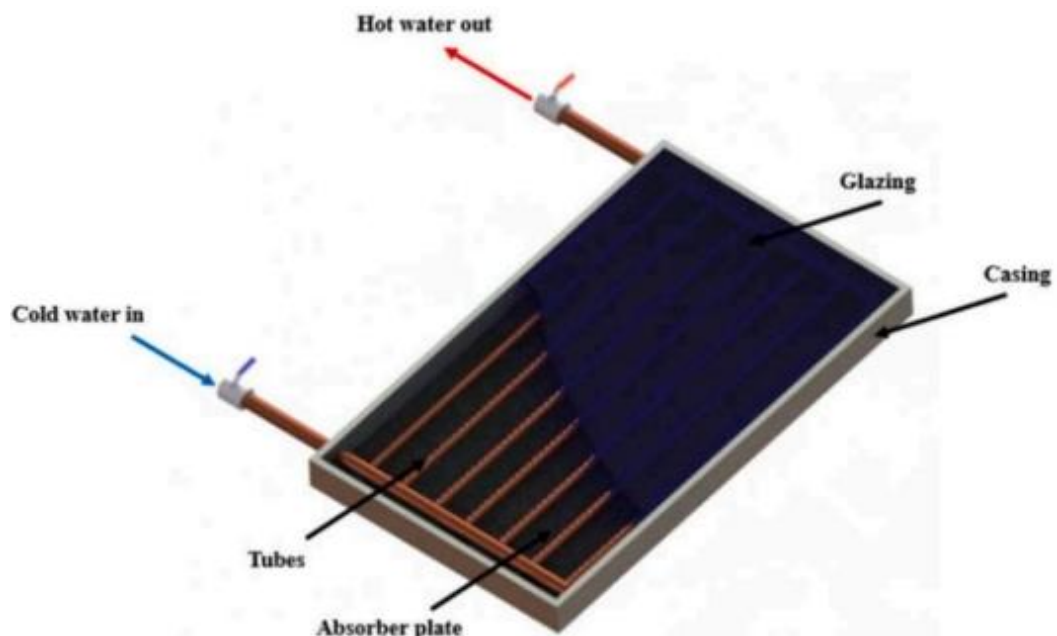


Gambar 2.11. SWHS dengan Sistem Loop Tertutup

2.5.2. Jenis-jenis kolektor surya

(a) Kolektor pelat datar

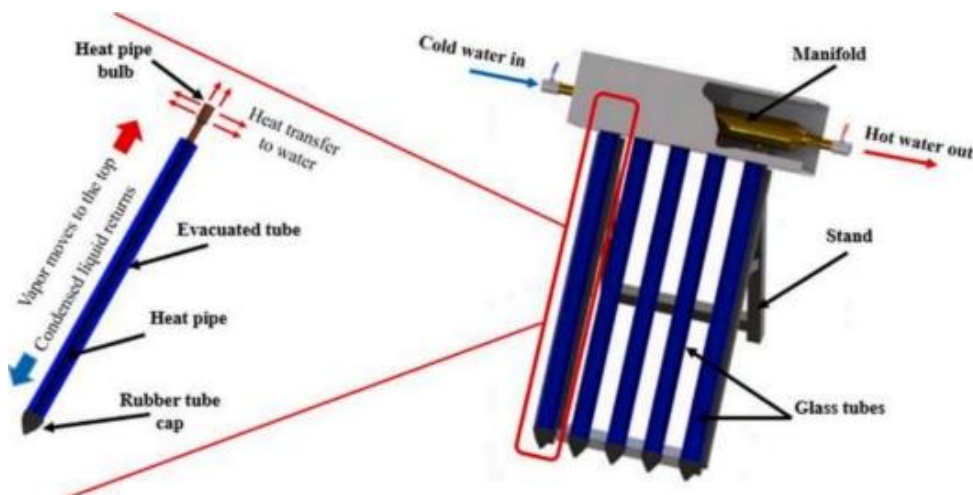
Kolektor pelat datar dirancang untuk memanfaatkan sinar matahari langsung dan sinar matahari yang tersebar, sehingga sangat efisien. Komponen utama kolektor pelat datar meliputi kaca, tabung, pelat penyerap, header, insulasi, dan casing. Material kaca memungkinkan hingga 90% radiasi matahari gelombang pendek untuk melewatinya sambil menghalangi radiasi gelombang panjang dari pelat penyerap. Fungsi utama pelat penyerap adalah menyerap sinar matahari sebanyak mungkin dan mentransfer energi panas ini secara efisien ke fluida pemindah panas. Bahan isolasi yang mengelilingi komponen-komponen ini membantu mengurangi potensi kehilangan panas. Terakhir, casing berfungsi sebagai rangka pelindung untuk semua komponen ini terhadap faktor lingkungan seperti debu dan kelembapan.



Gambar 2.12. Kolektor Surya Pelat Datar

(b) Kolektor tabung vakum

Kolektor tabung vakum dapat mencapai suhu outlet yang lebih tinggi berkisar antara 50°C hingga 200°C . Desain ini terdiri dari beberapa baris tabung kaca paralel yang saling terhubung melalui sistem manifold, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Pipa panas beroperasi berdasarkan prinsip siklus penguapan dan kondensasi berkelanjutan. Setelah menyerap sinar matahari, cairan di dalam setiap tabung menguap karena peningkatan suhu dan naik ke bagian atas pipa. Pada titik ini, cairan mengalami kondensasi dengan melepaskan panas latennya ke dalam cairan bergerak yang ada di manifold.



Gambar 2.13. Kolektor Surya Tabung Vakum

Dalam menangkap energi surya, kolektor tabung vakum terkenal karena efisiensinya yang tinggi. Bahkan di daerah yang lebih dingin atau pada hari mendung, kolektor dapat mencapai suhu yang lebih tinggi karena pengurangan kehilangan panas oleh isolasi vakum. Seiring waktu, peningkatan efisiensi ini menghasilkan peningkatan keluaran energi dan penghematan biaya. Selain itu, meskipun kolektor tabung vakum mungkin memiliki biaya awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi termal surya lainnya (Herez dkk., 2023).

(c) Kolektor palung parabola

Memanfaatkan energi surya untuk memanaskan air melalui penggunaan kolektor parabola adalah teknologi surya yang sangat canggih, yang mampu menghasilkan panas hingga 400°C . Kolektor terdiri dari bahan reflektif yang telah dibentuk menjadi parabola dan diarahkan ke matahari. Kolektor ini juga dilengkapi dengan penerima yang berisi tabung logam berlapis kaca hitam yang diposisikan di sepanjang garis fokusnya. Untuk meminimalkan kerugian konvektif, ruang antara penerima dan penutup kaca dievakuasi. Ketika sinar matahari mengenai parabola, sinar tersebut dipantulkan ke penerima, tempat fluida kerja mengalir melaluinya. Fluida kerja yang dipanaskan kemudian mentransfer panasnya ke air, yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Efisiensi optik yang tinggi merupakan karakteristik kolektor parabola yang sudah dikenal luas. Suhu tinggi dan konversi energi yang efektif dihasilkan sebagai hasil dari konsentrasi sinar matahari pada cermin lengkung ke area terbatas (Herez dkk., 2023). Skema kolektor parabola diilustrasikan dalam Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Kolektor Surya Palung Parabola

III. METODOLOGI PENELITIAN

Berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pemanas air tenaga surya, mulai dari modifikasi pada kolektor surya hingga pada sistem penyimpanannya. Meski begitu, kehilangan panas pada tangki penyimpanan masih menjadi tantangan. Salah satu solusi inovatif adalah penggunaan material penukar fase (*Phase Change Material/PCM*). Dengan kapasitas panasnya yang tinggi, PCM mampu menyerap panas berlebih dari air panas yang dihasilkan kolektor surya, lalu melepaskannya kembali saat suhu lingkungan menurun. Dalam penelitian ini, beberapa jenis PCM diuji coba untuk mengoptimalkan kinerja tangki penyimpanan. Hasil yang ditunjukkan dari uji coba, di harapkan dapat secara efektif mengurangi kehilangan panas, menjaga suhu air tetap hangat lebih lama, terutama pada malam hari.

3.1. Tempat Penelitian

Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Manufaktur dan Rekayasa Mesin Politeknik Tunas Garuda, dan Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 5 bulan, dimulai pada bulan Oktober 2024 sampai dengan bulan Februari 2025. Adapun deskripsi waktu penelitian dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1. Rencana Pelaksanaan Penelitian

Jenis Kegiatan	Oktober				November				Desember				Januari				Februari			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur																				
Persiapan dan pembuatan alat uji																				
Pengujian dan ambil data																				
Pembuatan laporan																				

1) Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan cara mencari dan membaca berbagai jurnal ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Proses ini melibatkan analisis mendalam terhadap metodologi, hasil, dan kesimpulan yang diperoleh dari penelitian sebelumnya. Tujuannya adalah untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif tentang perkembangan ilmu pengetahuan di bidang ini.

2) Persiapan dan Pembuatan Alat Pengujian

Persiapan penelitian meliputi penyediaan peralatan utama seperti alat penukar panas (pipa tembaga dan tabung stainless), rangka penyangga, serta instrumen pengukuran berupa data logger dan termokopel. Selain itu, pompa air juga disiapkan untuk memfasilitasi sirkulasi fluida.

3) Pengujian dan Pengambilan Data

Pengujian ini dirancang untuk mengevaluasi kinerja berbagai jenis PCM pada pipa penukar panas. Dengan membandingkan kinerja masing-masing PCM, diharapkan dapat diperoleh data empiris yang akurat untuk menentukan PCM paling optimal yang dapat meningkatkan efisiensi sistem penukar panas.

4) Penulisan Laporan

Penulisan laporan penelitian merupakan tahap krusial yang bertujuan untuk menyajikan temuan-temuan hasil penelitian secara sistematis dan komprehensif. Laporan ini berfungsi sebagai dokumentasi resmi yang merangkum seluruh proses penelitian, mulai dari perumusan masalah hingga analisis data, serta menyimpulkan hasil yang diperoleh.

3.3. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

3.3.1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi :

(a) Pemanas air

Pemanas air listrik dengan daya 800W ini digunakan sebagai pemanas awal pada bak penampungan. Dengan kapasitasnya yang besar, diharapkan alat ini mampu memanaskan air dengan cepat dan efisien. Material stainless steel yang digunakan membuat alat ini tahan lama dan tahan korosi. Dalam pengujian, pemanas air listrik ini digunakan untuk mengukur efisiensi dari pelelehan PCM.



Spesifikasi alat :

- ✓ Daya : 800 W
- ✓ Tegangan : 230 V
- ✓ Panjang : 185 mm
- ✓ Material : Stainless steel

Gambar 3.1. Pemanas air listrik dan spesifikasinya

(b) *Data Logger dan Thermocouple*

Data logger dan *thermocouple* merupakan instrumen penting dalam pengukuran temperatur pada sistem pemanas PCM. *Thermocouple* berfungsi mengubah perbedaan suhu menjadi tegangan listrik yang kemudian dibaca oleh *data logger*. *Data logger* merekam perubahan tegangan ini secara berkala dan mengubahnya menjadi nilai suhu yang dapat dipahami. Dengan perangkat ini, kita dapat mengukur dengan akurat temperatur PCM, fluida masuk dan keluar alat penukar panas, serta fluida masuk dan keluar tabung penyimpanan air. Seluruh data temperatur yang diperoleh kemudian disimpan dalam kartu SD untuk analisis lebih lanjut. *Thermocouple* dan *data logger* dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut ini.



Spesifikasi alat :

- ✓ Merk : LU BTM-4208SD
- ✓ Suhu min/max : -50 s/d 1300 °C
- ✓ Ketelitian : 0,1 °C
- ✓ Maks input : 12 Channel
- ✓ Record external : SD card

Gambar 3.2. *Thermocouple* dan *data logger*

(c) Kontroler temperatur dan SSR

Pengontrol temperatur PID digital ganda REX-C100, bersama termokopel tipe K, membentuk jantung sistem pemanas air industri ini. Termokopel secara terus-menerus memantau suhu air dan mengirimkan sinyal ke REX-C100. Algoritma PID yang canggih pada REX-C100 kemudian menganalisis sinyal ini dan mengatur daya pemanas untuk menjaga suhu air tetap stabil pada nilai yang telah ditetapkan. Mekanisme kontrol PID yang terdiri dari komponen proporsional, integral, dan derivatif memungkinkan sistem merespons perubahan suhu dengan cepat dan akurat. Selain itu, REX-C100 juga dilengkapi dengan fitur komunikasi serial yang memungkinkan integrasi dengan sistem kontrol yang lebih luas, serta proteksi terhadap kondisi abnormal. Dengan demikian, sistem pemanas ini mampu beroperasi secara efisien dan andal, memastikan kualitas produk akhir yang konsisten. Kontroler temperatur dan SSR yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.3.



Spesifikasi alat :

- ✓ Power supply: AC 100-240V
- ✓ Daya: 10 VA
- ✓ Akurasi pengukuran: 0.5% FS
- ✓ Siklus sampel: 30 detik
- ✓ Temperatur pengukuran: 0-400°C

Gambar 3.3. Kontroler temperatur dan SSR

(d) Pompa Air

Dalam pengujian ini, pompa air berperan krusial dalam memaksimalkan efisiensi perpindahan panas pada alat penukar kalor. Dengan memompa air secara terus-menerus melalui sirkuit tertutup, pompa memastikan bahwa fluida pendingin selalu kontak dengan permukaan penukar panas. Hal ini memungkinkan terjadinya transfer panas yang optimal antara dua fluida yang berbeda suhu.



Spesifikasi alat :

- ✓ Merk: SHIMGE ZPS 15-9-140
- ✓ Daya: 60/85/120 Watt
- ✓ Voltase: 220 V
- ✓ Temperatur air (maks.): 90°C
- ✓ Tekanan sistem (maks.): 10 bar
- ✓ Daya dorong (maks.): 9 meter
- ✓ Kapasitas (maks.): 27 l/menit

Gambar 3.4. Pompa air

(e) *Water flow meter*

Water flow meter pada sistem ini berfungsi untuk mengukur secara akurat volume air yang mengalir dari penukar kalor menuju tabung penampungan dalam satuan waktu tertentu. Dengan demikian, kita dapat mengetahui dengan pasti laju aliran atau debit air yang telah dipindahkan.



Spesifikasi alat :

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

Gambar 3.5. *Water flow meter*

(f) Selang air panas

Dalam penelitian ini, selang PEX dengan diameter 0,5 inci dipilih sebagai saluran distribusi air. PEX, atau polietilen silang, merupakan pilihan yang ideal karena fleksibilitasnya yang tinggi memungkinkan pemasangan yang mudah dan efisien, serta ketahanannya terhadap korosi dan suhu ekstrem. Diameter 0,5 inci dipilih dengan maksud meminimalkan kehilangan tekanan. Dibandingkan dengan selang PVC atau karet, PEX menawarkan keunggulan dalam hal fleksibilitas, daya tahan, dan keamanan. Selain itu, PEX juga memiliki koefisien ekspansi termal yang rendah, sehingga dapat mempertahankan dimensi yang stabil meskipun terjadi perubahan suhu.



Spesifikasi alat :

- ✓ Merk : Onda
- ✓ Diameter : 1/2 Inch
- ✓ Material : PEX – AL - PEX
- ✓ Temperatur maks : 110°C

Gambar 3.6. Selang PEX

(g) Katup air

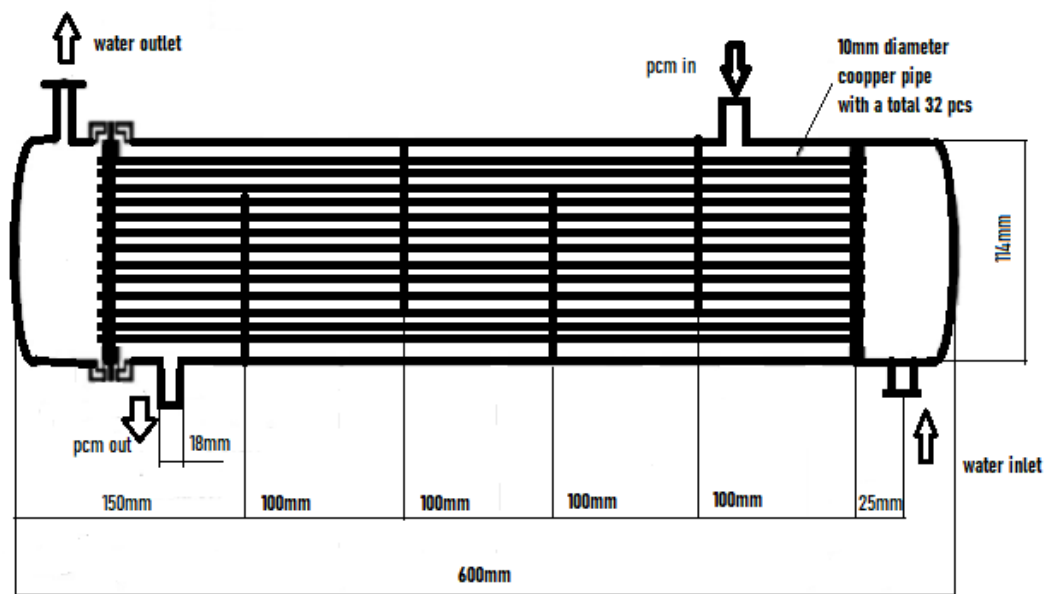
Fungsi utama katup bola pada keran air adalah untuk mengontrol debit aliran air. Dengan memutar gagang, bola akan bergerak dan mengatur ukuran bukaan sehingga kita bisa mendapatkan jumlah air yang sesuai dengan kebutuhan. seperti terlihat pada gambar 3.7 berikut :



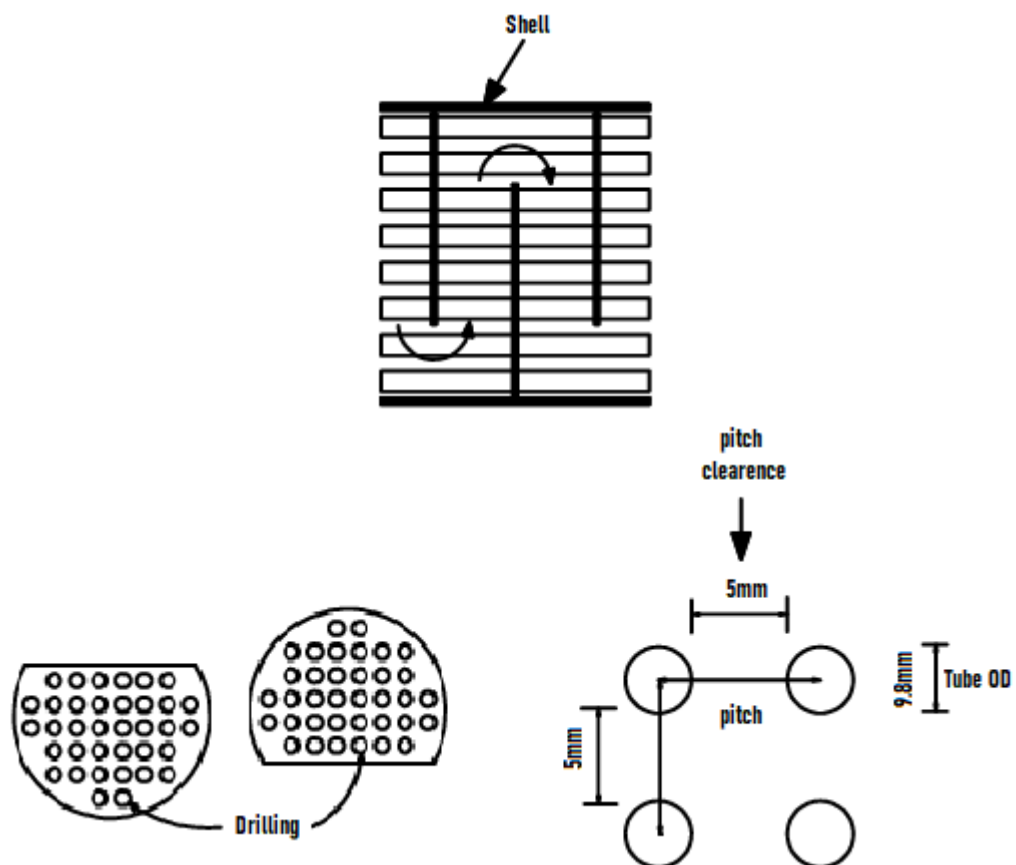
Gambar 3.7. Katup air

(h) Alat penukar panas

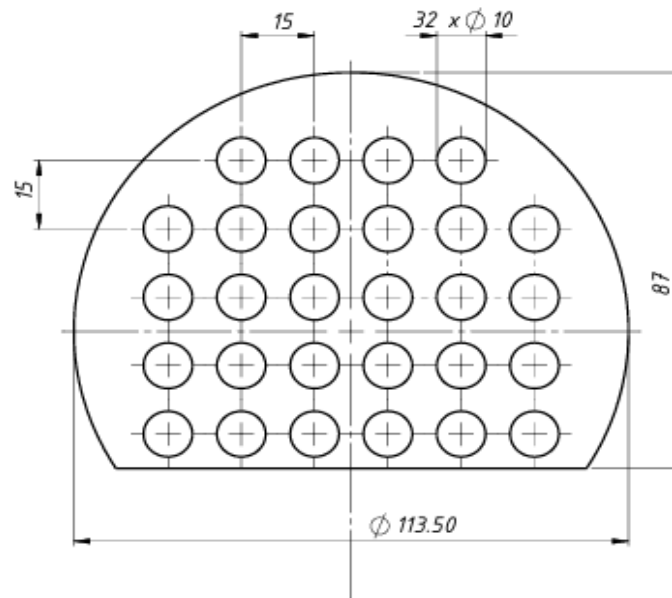
Penelitian ini menggunakan penukar panas tipe *shell and tube* dengan konfigurasi *tube-in-shell*. Air yang mengalir ditempatkan di dalam *tube* tembaga, sementara pcm ditempatkan di dalam *shell* yang terbuat dari *PVC*. Dimensi *tube* tembaga adalah 10 mm dengan panjang 500 mm, sedangkan *shell* memiliki diameter 114 mm, dengan panjang keseluruhan 600 mm. Pada gambar berikut adalah sketsa perencanaan dari alat penukar panas tipe *shell and tube*.



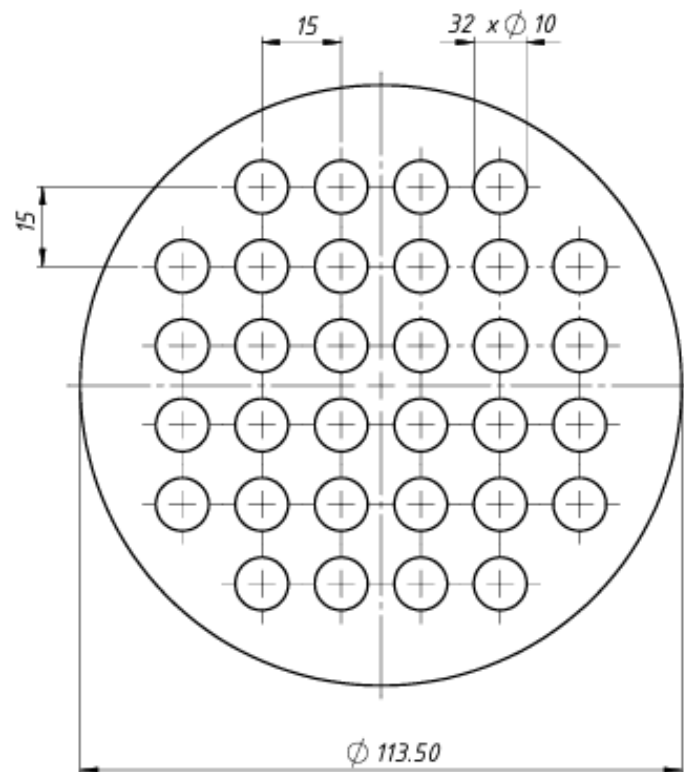
Gambar 3.8. Sketsa perencanaan alat penukar panas *shell and tube*



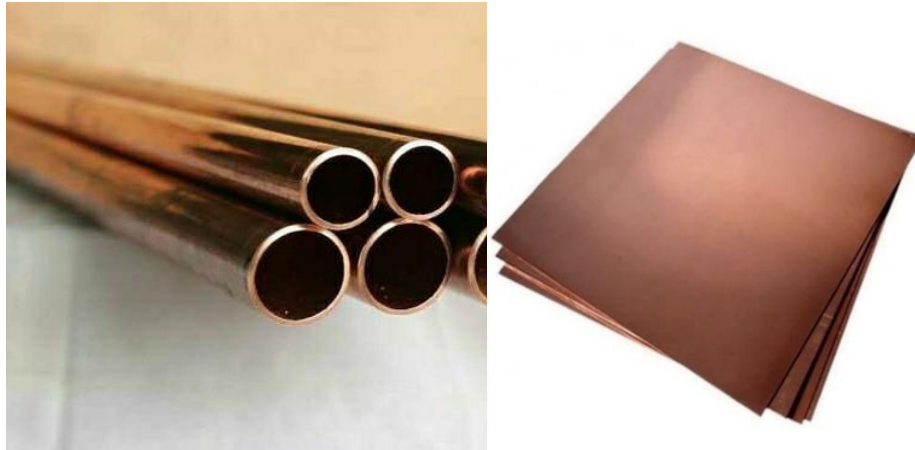
Gambar 3.9. Sketsa perencanaan tata letak *tube*



Gambar 3.10. Sketsa perencanaan *baffle plate*



Gambar 3.11. Sketsa perencanaan *shell end plate*



Gambar 3.12. Pipa tembaga Ø10mm, dan plat tembaga t 2mm dan 1mm

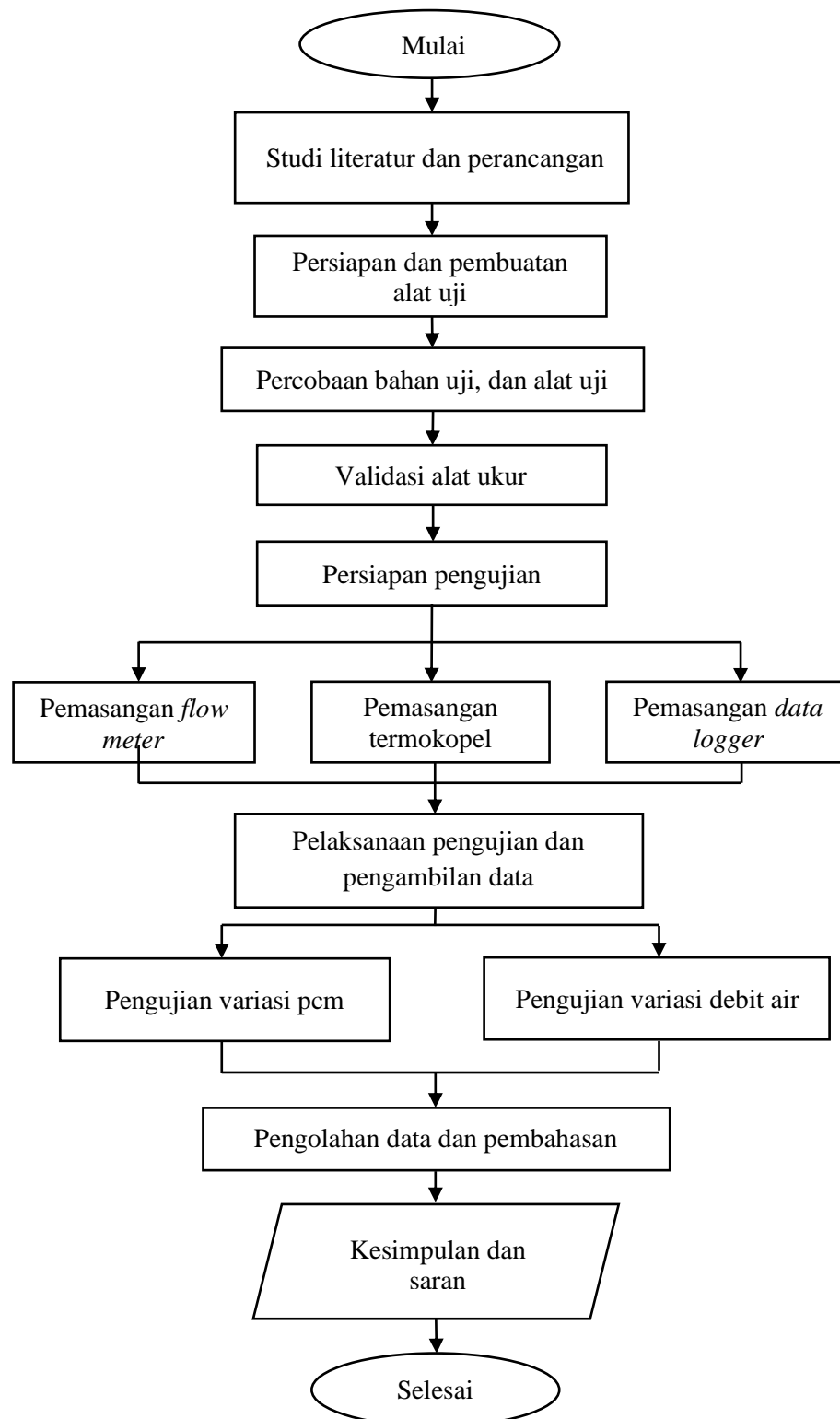
3.3.2. Bahan penelitian

Pada penelitian ini, air dan PCM digunakan sebagai media utama. Air, yang berfungsi sebagai fluida pendingin, dipompa secara bersirkulasi dari penampungan menuju tabung penukar panas (*tube*). Setelah menyerap kalor, air kemudian kembali ke penampungan. Sementara itu, PCM dalam bentuk padat atau lilin, ditempatkan di dalam selubung penukar panas (*shell*). PCM berperan sebagai bahan penyerap kalor laten yang akan mengalami perubahan fasa saat menyerap kalor. Variasi PCM yang dipilih dalam penelitian, meliputi dalam tabel 3.2 berikut:

Tabel 3.2. Variasi Bahan PCM

Bahan PCM	Kisaran Titik Leleh (°C)
Parafin Wax RC-188	58
Coconut Wax RC-302	54
Palm Wax RC-162	58
Soy Wax RC-190	52
Stearic Acid	72
Palmitic Acid	63

3.4. Diagram Alir Penelitian



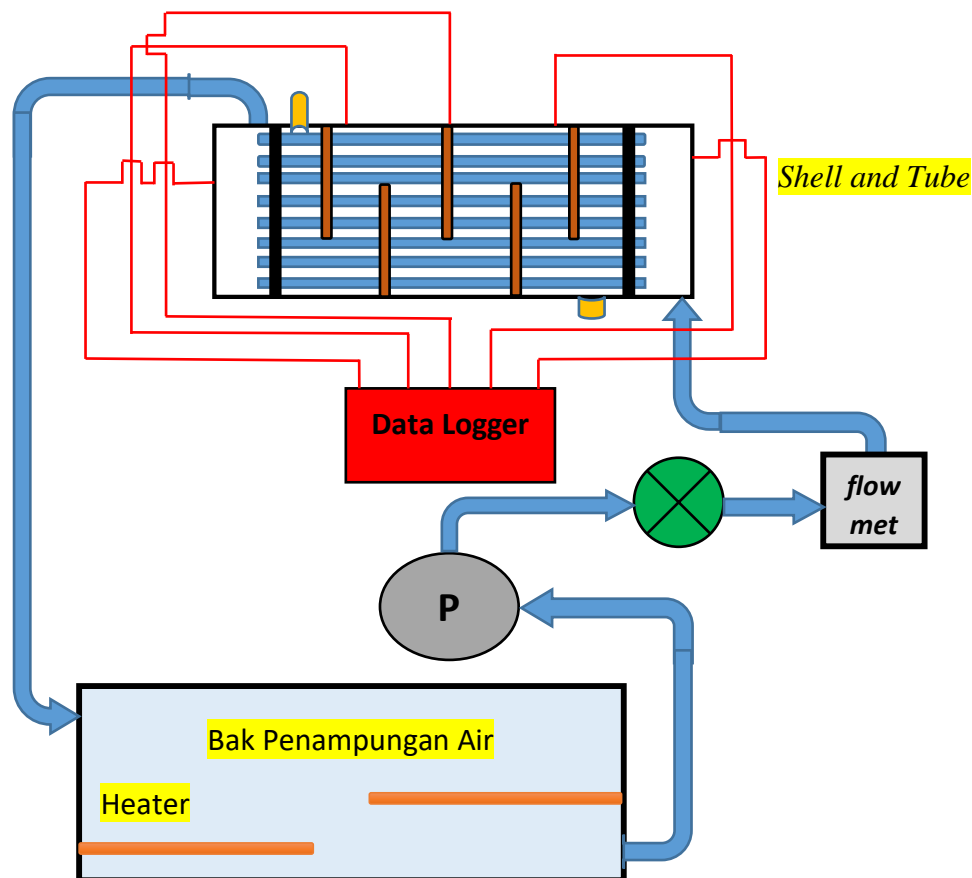
Gambar 3.13. Diagram alir penelitian

Keterangan diagram alir:

- Mulai: pembuatan proposal Tugas Akhir dengan judul “Studi Eksperimen Pemanas Air Tenaga Surya Tipe *Shell and Tube* Dengan Variasi PCM Sebagai Penyimpan Energi Termal”
- Studi literatur dan perancangan: mencari literatur melalui jurnal dan buku pendukung untuk kemudian melakukan rencana perancangan alat.
- Persiapan dan pembuatan alat uji: merakit rangka pengujian, tempat penampungan air, pompa, pemanas air elektrik, dan pembuatan komponen-komponen pada alat penukar panas tipe *shell and tube*.
- Pengetesan bahan uji dan alat uji: pengecekan terhadap masing-masing temperature lebur PCM, dan pengecekan kemungkinan kebocoran pada alat uji.
- Persiapan pengujian: mempersiapkan komponen utama untuk melakukan pengujian, yaitu pemasangan sensor termokopel, pemasangan *flow meter*, dan pemasangan *data logger*.
- Pelaksanaan pengambilan data dan pengujian: Pengujian dibagi kedalam dua proses yaitu pelelehan dan pembekuan dengan masing-masing variasi pcm dan variasi laju aliran massa.
- Pengolahan data dan pembahasan: mengolah data dari hasil pengujian dan membahasnya disertai dengan referensi dari literatur dan buku-buku pendukung.
- Kesimpulan dan saran: mengambil kesimpulan dari keseluruhan proses pengujian dan memberikan saran yang dibutuhkan untuk melengkapi kekurangan pada pengujian yang telah dilakukan.
- Selesai.

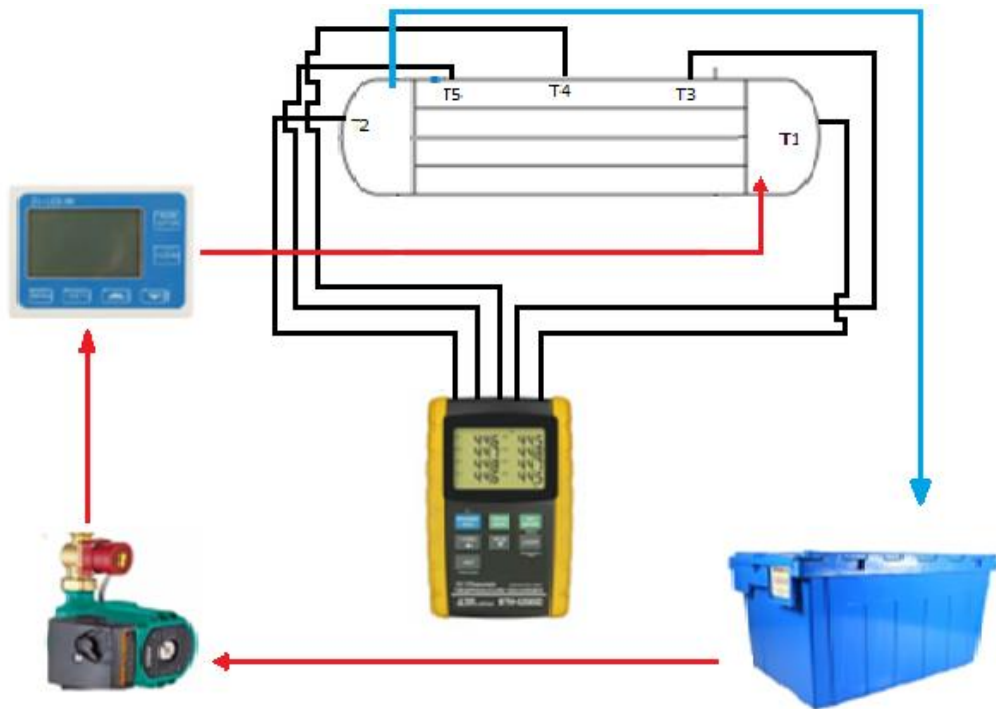
3.5. Skema Uji

Skema pengujian dimulai dengan menempatkan sampel bahan uji dalam bentuk padat pada suhu kamar (31°C) di dalam tabung penukar panas. Air sebagai fluida pemanas dipanaskan hingga mencapai suhu tertentu dan kemudian dipompa secara paksa melalui pipa dalam penukar panas. Laju aliran air diatur menggunakan katup bola dan diukur menggunakan *flow meter* ZJ-LCD-M. Suhu pada berbagai titik diukur menggunakan termokopel dan data *logger* LU BTM-4208SD. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui profil suhu, laju transfer panas, dan waktu pencairan bahan uji.



Gambar 3.14. Skema Proses Pelelehan PCM

3.6. Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3.15. Letak Titik Pengukuran

Rencana penempatan titik pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur pada PCM dan temperatur pada air yang disirkulasikan pada *shell*. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Untuk pengukuran temperatur, digunakan 5 buah termokopel (T1 – T5). T1 adalah temperatur air masuk, T2 adalah temperatur air keluar, T3 adalah temperatur PCM dibagian sisi depan *shell*, T4 adalah temperatur PCM dibagian sisi tengah *shell*, dan T5 adalah temperatur PCM dibagian sisi belakang *shell*. Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 30 detik dengan menggunakan *data logger*. Kemudian untuk pengukuran debit aliran air, *water flow meter* disambungkan dengan pipa penghubung antara *shell* dan *bypass valve*.

3.7. Metode Pengambilan Data

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

3.7.1. Proses Pelelehan PCM

- a. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan dalam pengujian.
- b. Merakit alat dan bahan seperti skema uji.
- c. Memasukkan bahan PCM yang akan dilakukan pengujian hingga memadat pada rentang suhu 31°C.
- d. Menyalakan *data logger* dan menempatkan *thermocouple* seperti skema uji.
- e. Dengan pemanas air, panaskan air di bak penampung hingga temperatur air mencapai 80°C.
- f. Menyalakan pompa air, dan kemudian atur katup debit aliran yang dikehendaki dengan melihat pembacaan data dari *water flow meter sensor*.
- g. Merekam data perubahan temperatur pada data logger setiap 30 detik.
- h. Memastikan air terus bersiklus dalam *shell*, hingga temperatur PCM uji mencapai titik leleh.
- i. Mencatat data hasil yang diperoleh dari rekaman *data logger*.
- j. Mengulangi langkah proses dengan variasi laju aliran air (8 Lpm, 10 Lpm, 12 Lpm) dan masing-masing bahan PCM yang telah ditentukan.
- k. Menulis kesimpulan hasil dari penelitian.
- l. Selesai.

3.7.2. Proses Pembekuan PCM

- a. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan dalam pengujian.
- b. Merakit alat dan bahan seperti skema uji.
- c. Memasukkan bahan PCM yang akan dilakukan pengujian pada temperatur leleh.
- d. Menyalakan *data logger* dan menempatkan *thermocouple* seperti skema uji.
- e. Menyalakan pompa air, dan kemudian atur katup debit aliran yang dikehendaki dengan melihat pembacaan data dari *water flow meter sensor*.
- f. Merekam data perubahan temperatur pada data logger setiap 30 detik.
- g. Memastikan air terus bersiklus dalam *shell*, hingga temperatur PCM uji mencapai titik beku.
- h. Mencatat data hasil yang diperoleh dari rekaman *data logger*.
- i. Mengulangi langkah proses dengan variasi laju aliran air (8 Lpm, 10 Lpm, 12 Lpm) dan masing-masing bahan PCM yang telah ditentukan.
- j. Menulis kesimpulan hasil dari penelitian.
- k. Selesai.

V. KESIMPULAN dan SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengevaluasi performa termal terhadap enam jenis PCM dalam proses penyimpanan dan pelepasan energi panas laten pada sistem penyimpanan energi termal berbasis *pipa tembaga*. Beberapa kesimpulan utama dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Setiap PCM menunjukkan karakteristik perubahan temperatur yang berbeda selama proses pelelehan dan pembekuan. *Palmitic acid* dan *stearic acid* memperlihatkan plateau temperatur yang lama dan stabil pada kedua fase, menandakan kapasitas energi laten yang besar. Sebaliknya, *coconut wax* dan *soy wax* menunjukkan plateau yang sempit dan durasi perubahan fasa yang cepat, mencerminkan rendahnya nilai kalor laten dan respons termal yang cepat.
2. Laju aliran air mempengaruhi dinamika perpindahan panas, namun tidak mengubah urutan performa PCM. Kenaikan laju aliran meningkatkan *heat transfer rate* pada pelelehan dan pembekuan. Namun, total energi yang dapat diserap atau dilepas oleh PCM tetap ditentukan oleh sifat termofisika material, bukan oleh variasi laju aliran. *Palmitic acid* dan *stearic acid* secara konsisten menunjukkan laju perpindahan panas dan kapasitas energi total yang tertinggi.
3. Energi yang diserap dan dilepas PCM mengikuti pola konservasi energi yang konsisten pada kedua fase. Perhitungan total energi pelelehan dan pembekuan yang melibatkan penjumlahan energi PCM dan energi pada tembaga menunjukkan pola yang sejalan antara kedua fase. Hal ini menegaskan bahwa

sistem bekerja sesuai prinsip konservasi energi dan memperlihatkan keseimbangan antara energi masuk pada proses *charging* dan energi keluar pada proses *discharging*.

4. Kapasitas energi laten PCM merupakan faktor dominan dalam menentukan performa penyimpanan energi. Urutan kapasitas energi total pelelehan maupun pembekuan menunjukkan konsistensi:

Palmitic > Stearic > Paraffin Wax > Palm Wax > Coconut Wax > Soy Wax

PCM dengan kalor laten tinggi menghasilkan energi total yang besar baik dalam proses penyimpanan maupun pelepasan energi. Sebaliknya, PCM dengan kalor laten rendah hanya mampu menyimpan energi dalam jumlah terbatas, meskipun respon termalnya cepat.

5. Keterbatasan pengukuran kalor laten memengaruhi kemampuan perhitungan energi pada PCM tertentu. Hasil DSC menunjukkan bahwa *coconut wax* dan *soy wax* tidak memiliki puncak eksotermik yang kuat sehingga energi pembekuan tidak dapat dihitung dengan akurat. Ketidakjelasan sinyal ini disebabkan oleh rentang transisi fase yang sangat sempit dan nilai kalor laten yang rendah, menyebabkan energi laten sulit dipisahkan dari energi sensibel.

5.2. Saran

Beberapa rekomendasi dapat diberikan untuk pengembangan sistem dan penelitian selanjutnya, berdasarkan temuan penelitian ini.

1. Pemilihan PCM untuk aplikasi nyata harus mempertimbangkan kebutuhan kapasitas energi atau kecepatan respon. PCM seperti *palmitic acid* dan *stearic acid* cocok untuk aplikasi penyimpanan energi kapasitas besar, sedangkan *coconut wax* dan *soy wax* lebih tepat untuk aplikasi yang membutuhkan respons cepat namun tidak memerlukan energi laten besar.
2. Diperlukan pengujian DSC dengan tingkat sensitivitas lebih tinggi untuk material wax tertentu agar nilai kalor laten dapat diukur lebih akurat. Hal ini penting untuk mencegah ambiguitas dalam perhitungan energi, terutama pada material yang menunjukkan sinyal eksotermik lemah.
3. Penelitian lebih lanjut dapat mengkaji desain geometri pipa atau peningkatan konduktivitas termal. Penambahan *fin*, penggunaan pipa berstruktur, atau penggabungan PCM dengan material berkonduktivitas tinggi (misalnya grafit) dapat meningkatkan laju perpindahan panas.
4. Pengujian jangka panjang diperlukan untuk menilai stabilitas siklus PCM. Beberapa PCM mungkin mengalami degradasi setelah mengalami puluhan hingga ratusan siklus perubahan fase. Evaluasi ini sangat penting jika sistem akan digunakan untuk aplikasi industri.

5.3. Penutup

Penelitian ini telah memberikan gambaran komprehensif mengenai performa termal enam jenis PCM dalam aplikasi penyimpanan energi panas laten. Melalui pengujian pelelehan dan pembekuan, analisis perpindahan panas, serta evaluasi energi total, penelitian ini berhasil mengidentifikasi karakteristik utama PCM yang relevan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem penyimpanan energi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan dapat mendukung upaya peningkatan efisiensi energi pada berbagai aspek keteknikan.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memenuhi tujuan akademik, tetapi juga memberikan kontribusi praktis yang dapat diterapkan pada teknologi penyimpanan energi panas laten di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, M., Mousavi, S. M., Lee, B. J., Esfahani, J. A., Karimi, N., & Mamaghani, M. Y. (2022). Examination of the effects of porosity upon intensification of thermal storage of PCMs in a shell-and-tube type system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101963. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101963>
- Al-Askaree, E. H., & Al-Muhsen, N. F. O. (2023). Experimental investigation on thermal performance of solar water heater equipped with Serpentine fin core heat exchanger. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100593. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100593>
- Bashirpour-Bonab, H. (2021). Investigation and optimization of PCM melting with nanoparticle in a multi-tube thermal energy storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101643. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101643>
- Bazri, S., Badruddin, I. A., Usmani, A. Y., Anwar Khan, S., Kamangar, S., Naghavi, M. S., Rahman Mallah, A., & Abdelrazek, A. H. (2022). Thermal hysteresis analysis of finned-heat-pipe-assisted latent heat thermal energy storage application for solar water heater system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102490>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2014). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (5th ed.)*. McGraw-Hill Professional. McGraw-Hill Education.
- Dhaou, M. H., Mellouli, S., Alresheedi, F., & El-Ghoul, Y. (2022). Experimental assessment of a solar water tank integrated with nano-enhanced PCM and a stirrer. *Alexandria Engineering Journal*, 61(10), 8113–8122. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.040>
- Dong, S., S Al-Zahrani, K., A Reda, S., Sharma, K., Talal Amin, M., Tag-Eldin, E., & Mehdizadeh Youshanlouei, M. (2022). Investigation of thermal performance of a shell and tube latent heat thermal energy storage tank in the presence of different nano-enhanced PCMs. *Case Studies in Thermal Engineering*, 37, 102280. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102280>
- Ermiş, K., & Findik, F. (2020). Thermal energy storage. *Sustainable Engineering and Innovation*, 2(2), 66–88. <https://doi.org/10.37868/sei.v2i2.115>
- Herez, A., Jaber, H., Hage, H. E., Lemenand, T., Chahine, K., Ramadan, M., & Khaled, M. (2023). Solar water heating: Comprehensive review, critical analysis and case study. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100503. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100503>

Irsyad, M., Tobing, N. A. H. L., & Susila, M. D. (2020). Pemanfaatan material fasa berubah untuk mempertahankan kesegaran sayuran. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 9(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v9i2.1295>

Mahyudi, E. T. (2024). Pengaruh Penggunaan Sirip Aksial Pada Alat Penukar Kalor Pipa Ganda Terhadap Proses Pelelehan Dan Pembekuan Parafin Sebagai Penyimpan Energi Thermal. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v13i2.3602>

Malik, F. K., Khan, M. M., Ahmed, H. F., Irfan, M., & Ahad, I. U. (2022). Performance characteristics of PCM based thermal energy storage system for fluctuating waste heat sources. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102012>

Mhedheb, T., Hassen, W., Mhimid, A., Almeshaal, M. A., Alhadri, M., & Kolsi, L. (2023). Parametric analysis of a solar parabolic trough collector integrated with hybrid-nano PCM storage tank. *Case Studies in Thermal Engineering*, 51, 103652. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103652>

Muhire, F., Turyareeba, D., Adaramola, M. S., Nantongo, M., Atukunda, R., & Olyanga, A. M. (2024). Drivers of green energy transition: A review. *Green Energy and Resources*, 2(4), 100105. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2024.100105>

Nair, A. M., Wilson, C., Huang, M. J., Griffiths, P., & Hewitt, N. (2022). Phase change materials in building integrated space heating and domestic hot water applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 54, 105227. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105227>

Pambudi, N. A., Nanda, I. R., & Saputro, A. D. (2023). The energy efficiency of a modified v-corrugated zinc collector on the performance of solar water heater (SWH). *Results in Engineering*, 18, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101174>

Rahmalina, D., Miftahudin, I. C., & Ismail, I. (2023). Peningkatan Performa Termal Phase Change Material dengan Komposit Berbasis Parafin/High-Density Polyethylene Melalui Penambahan Carbon Nanotube. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 12(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v12i2.2813>