

**UJI KARATERISTIK PERPINDAHAN PANAS *STEARIC ACID* PADA
ALAT PENUKAR KALOR UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER HEATER***

(SKRIPSI)

OLEH:

AGUM RIAWAN JAYA



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

**UJI KARATERISTIK PERPINDAHAN PANAS *STEARIC ACID* PADA
ALAT PENUKAR KALOR UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER HEATER***

Oleh

AGUM RIAWAN JAYA

Skripsi

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

Pada

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung



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

2026

ABSTRAK

UJI KARATERISTIK PERPINDAHAN PANAS *STEARIC ACID* PADA ALAT PENUKAR KALOR UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER HEATER*

Oleh :

Agum Riawan Jaya

Energi matahari merupakan sumber energi terbarukan yang potensial untuk dimanfaatkan pada sistem *solar water heater* (SWH). Namun, kinerja SWH sangat dipengaruhi oleh fluktuasi intensitas radiasi matahari akibat perubahan cuaca. Untuk meningkatkan kestabilan dan efisiensi sistem, digunakan *Phase Change Material* (PCM) sebagai media penyimpan energi termal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas *stearic acid* sebagai PCM pada alat penukar kalor tipe *shell and tube* serta menentukan waktu yang dibutuhkan PCM dalam proses perubahan fasa. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan alat penukar kalor *shell and tube* yang diposisikan horizontal. *Stearic acid* digunakan sebagai PCM, sedangkan air berfungsi sebagai fluida pemanas dan pendingin. Variasi debit aliran air yang digunakan yaitu 8 L/menit, 10 L/menit, dan 12 L/menit dengan temperatur masuk air panas sebesar 80 °C. Parameter yang dianalisis meliputi temperatur PCM dan fluida, laju perpindahan panas, energi yang diserap dan dilepaskan PCM, serta waktu pemanasan dan pendinginan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi debit aliran fluida berpengaruh signifikan terhadap laju perpindahan panas dan waktu perubahan fasa *stearic acid*. *Stearic acid* terbukti mampu menyimpan dan melepaskan energi panas secara efektif pada rentang suhu kerja SWH, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi dan kontinuitas suplai air panas. Dengan demikian, *stearic acid* layak digunakan sebagai PCM pada aplikasi *solar water heater*.

Kata kunci: *Solar Water Heater*, *Phase Change Material*, *Stearic Acid*, *Shell and Tube*, Perpindahan Panas.

ABSTRACT

STEARIC ACID HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS TEST IN HEAT EXCHANGERS FOR SOLAR WATER HEATER APPLICATIONS

By :

Agum Riawan Jaya

Solar energy is a potential renewable energy source to be utilized in solar water heater (SWH) systems. However, SWH performance is greatly affected by fluctuations in solar radiation intensity due to weather changes. To improve system stability and efficiency, Phase Change Material (PCM) is used as a thermal energy storage medium. This study aims to analyze the heat transfer characteristics of stearic acid as a PCM in a shell and tube heat exchanger and determine the time required for the PCM in the phase change process. The study was conducted experimentally using a horizontally positioned shell and tube heat exchanger. Stearic acid is used as a PCM, while water serves as a heating and cooling fluid. The variations in water flow rates used are 8 L/min, 10 L/min, and 12 L/min with a hot water inlet temperature of 80°C. The parameters analyzed include the temperature of the PCM and fluid, the heat transfer rate, the energy absorbed and released by the PCM, and the heating and cooling time. The results show that variations in fluid flow rates have a significant effect on the heat transfer rate and phase change time of stearic acid. Stearic acid has been proven to be able to store and release heat energy effectively over the working temperature range of SWH, thus potentially increasing the efficiency and continuity of hot water supply. Thus, stearic acid is suitable for use as a PCM in solar water heater applications.

Keywords: Solar Water Heater, Phase Change Material, Stearic Acid, Shell and Tube, Heat Transfer.

Judul Skripsi

: **UJI KARATERISTIK PERPINDAHAN
PANAS *STEARIC ACID* PADA ALAT
PENUKAR KALOR UNTUK APLIKASI
*SOLAR WATER HEATER***

Nama Mahasiswa

: **Agum Riawan Jaya**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2115021106**

Program Studi

: **S1 Teknik Mesin**

Fakultas

: **Teknik**



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

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

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

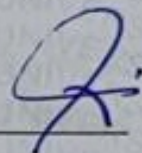
Ahmad Su'udi, S.T.,M.T.
NIP. 197408162000121001

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

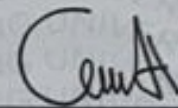
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

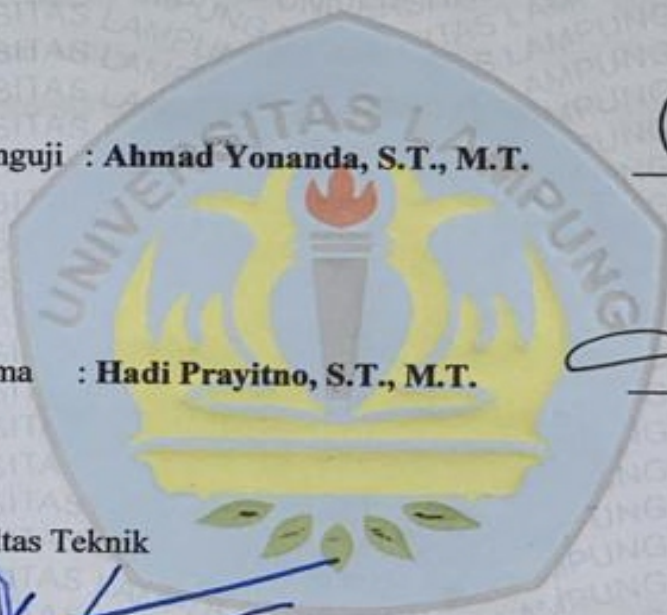
Ketua Penguji : **Dr. Muhammad Irsyad, S. T., M. T.**



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

Tanggal Lulus Ujian Skipsi : **21 Januari 2026**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul “UJI KARATERISTIK PERPINDAHAN PANAS *STEARIC ACID* PADA ALAT PENUKAR KALOR UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER HEATER*” merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil palgiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 25 Januari 2026

Pembuat Pernyataan



Agum Riawan Jaya

NPM. 2115021106

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Terbanggi Subing, 13 September 2003 sebagai anak ke-2 dari Bapak alm Hi. Suwanto dan H. Rukmini. Penulis Pendidikan dasar di SDN 3 GUNUNG SUGIH PASAR, lalu dilanjutkan Pendidikan menengah pertama di SMP IT SMART INSANI, lalu dilanjutkan menengah atas di SMA N 3 METRO. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN)

Menjadi salah satu mahasiswa, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dalam 2 periode pada tahun 2022 hingga 2024. Penulis aktif dalam HIMATEM dan pernah menjadi Ketua Bidang BIRO-SEKRETARIAT dan pernah menjadi panitia kegiatan di Jurusan Teknik Mesin, kemudian penulis melaksanakan kerja praktek di PT. BUKIT ASAM TBK. Penulis memulai melakukan penelitian dengan judul “UJI KARATERISTIK PERPINDAHAN PANAS *STEARIC ACID* PADA ALAT PENUKAR KALOR UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER HEATER*” dimulai pada 7 Mei 2024.

MOTTO

“ ojo dumeh”

(Sri Pakubuwono IX)

“You can spill drinks one me, you can throw food at me.. but good reason or not,
nobody hurts a friend of mine”

(Shanks)

SANWANCANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

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

1. Orang tua penulis, Bapak Alm Hi. Suwanto dan H. Ibu Rukmini yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ahmad Su'udi, S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing utama yang telah membimbing serta memberikan ilmu selama pelaksanaan

tugas akhir di perkuliahan.

6. Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah kalian berikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
9. Kakak dan Adik Saya Aken dan Savira terima kasih banyak sudah hadir menjadi keluarga yang baik dan pengertian.
10. Keluarga besar grup TA Termal yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
11. Para penolong skripsi dari segala lini yaitu “RBP Bersatu atau RBP KNOWLEDGE” yang selalu membantu dalam mengerjakan skripsi ini. Semoga yang sudah lulus dimudahkan untuk mendapatkan pekerjaan, yang sudah bekerja dilancarkan hingga naik jabatan, dan yang masi berjuang dalam tugas akhir dilancarkan penelitian.
12. Teman-teman angkatan 2021 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 22 April 2022 menjalin kekeluargaan.
13. Teruntuk sister “A” yang sudah membantu dalam pengerjaan skripsi ini walaupun hanya dalam bentuk keluh kesah, cerita dan bantuan logistik kepada penulis, namun tidak bisa dipungkiri bahwa siter “A” telah menyemangati dengan cara lewat belakang layar yang tak kasat mata oleh penulis. Sekali lagi terima kasih banyak. Semoga skripsinya dilancarkan sampai wisuda nanti.

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

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	XIII
DAFTAR GAMBAR	XV
DAFTAR TABEL	XVII
BAB I	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	4
1.3 BATASAN MASALAH	4
1.4 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
BAB II	6
2.1 SISTEM SOLAR WATER HEATER (SWH).....	6
2.1.1 <i>Jenis-Jenis Sistem Solar Water Heater</i>	7
2.2 PERPINDAHAN PANAS	8
2.2.1 <i>Perpindahan Panas secara Konduksi</i>	8
2.2.2 <i>Perpindahan Panas secara Konveksi</i>	10
2.2.3 <i>Perpindahan Panas secara Radiasi</i>	11
2.3 ALAT PENUKAR KALOR (<i>HEAT EXCHANGERS</i>).....	12
2.3.1 <i>Aliran Searah</i>	12
2.3.2 <i>Berlawananan Arah</i>	13
2.4 JENIS-JENIS ALAT PENUKAR KALOR	14
2.5 MATERIAL BERUBAH FASA (<i>PHASE CHANGE MATERIAL</i>)	16
2.6 KLASIFIKASI PCM.....	18
2.6.1 <i>PCM Organik</i>	18
2.6.2 <i>PCM Anorganik</i>	19
2.6.3 <i>PCM Eutectic</i>	19
2.7 PERSAMAAN DASAR <i>HEAT EXCHANGER</i>	20
2.7.1 <i>Panas Yang Diserap</i>	20
2.7.2 <i>Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritmik (Logaritmik Mean Temperature Diference)</i>	22
2.7.3 <i>Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh</i>	22
2.7.4 <i>Efisiensi Termal</i>	22

2.8	STEARIC ACID SEBAGAI PCM	23
2.9	SIFAT <i>STEARIC ACID</i>	25
BAB III	.....	27
3.1	TEMPAT PELAKSANAAN	27
3.2	WAKTU PELAKSANAAN	27
3.3	ALAT DAN BAHAN	28
3.4	DIAGRAM ALIR.....	37
3.5	SKEMA PENGUJIAN TITIK BEKU DAN TITIK LELEH STEARIC	38
3.6	PENEMPATAN TITIK PENGUKURAN	40
3.7	PROSEDUR PENGAMBILAN DATA	41
BAB IV	.....	43
4.1	HASIL PENGAMBILAN DATA TEMPERATUR STEARIC	44
4.2	HASIL PERHITUNGAN.....	46
4.2.1	<i>Laju Perpindahan Panas Dan Dingin Air</i>	46
4.2.2	<i>Bilangan Reynolds</i>	50
4.2.3	<i>Perhitungan Energi</i>	52
BAB 5	.....	61
5.1	KESIMPULAN	61
5.2	SARAN.....	62
DAFTAR PUSTAKA	.....	63
LAMPIRAN	.....	67

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Diagram Alir Sistem SWH Aktif	7
Gambar 2. Perpindahan panas konduksi	9
Gambar 3. Perpindahan panas konveksi	10
Gambar 4. Profil temperatur aliran Co-Current	12
Gambar 5. Profil temperatur aliran counter-current.....	13
Gambar 6. Profil temperatur aliran counter-current.....	14
Gambar 7. Plate-frame heat exchanger	14
Gambar 8. Spiral plate heat exchanger	15
Gambar 9. Shell and tube heat exchanger	16
Gambar 10. Klasifikasi PCM	18
Gambar 11. Pemanas air	29
Gambar 12. Data logger dan thermocouple	29
Gambar 13. Pompa air.....	30
Gambar 14. Water flow meter.....	31
Gambar 15. Kontroler suhu dan SSR.....	32
Gambar 16. Selang pipa air panas.....	33
Gambar 17. Katup air.....	34
Gambar 18. Penampungan Air.....	35
Gambar 19. Alat penukar panas shell and tube.....	35
Gambar 20. Gambar stearic acid.....	36
Gambar 21. Diagram alir penelitian.....	38
Gambar 22. Skema pengujian titik beku	39
Gambar 23. Skema pengujian titik leleh.....	39
Gambar 24. Penempatan titik ukur.....	40
Gambar 25. Perbandingan temperatur rata-rata stearic pada pemanasan suhu 70°44	

Gambar 26. Perbandingan temperatur rata-rata stearic pada pendinginan suhu 30°	44
Gambar 27. Grafik perbandingan laju perpindahan panas air pemanasan 70°C dan pendinginan 30°C	49
Gambar 28. Perbandingan energi air dengan energi stearic pada pemanasan suhu 70°C	56
Gambar 29. Perbandingan energi air dengan energi stearic pada pendinginan suhu 30°C	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Jenis-jenis material PCM eutectic.....	20
Tabel 2. Spesifikasi data logger	30
Tabel 3. Spesifikasi thermocouple	30
Tabel 4. Spesifikasi pompa air	31
Tabel 5. Spesifikasi water flow meter.....	32
Tabel 6. Spesifikasi kontroler dan SSR.....	33
Tabel 7. Ukuran alat penukar panas	36
Tabel 8. Data laju perpindahan panas air pemanasan pada suhu 70 °C	47
Tabel 9. Data laju perpindahan panas air pendinginan pada suhu 30 °C	47
Tabel 10. Perhitungan bilangan reynolds temperatur air 70°C	51
Tabel 11. Perhitungan bilangan reynolds temperatur air 30°C	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi matahari merupakan sumber energi terbarukan yang melimpah dan berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Indonesia, sebagai negara tropis, menerima rata-rata radiasi matahari harian sebesar 4,8 kWh/m², menjadikannya lokasi yang ideal untuk pengembangan teknologi berbasis energi surya. Potensi energi surya di Indonesia sangat besar, mencapai 112.000 *gigawattpeak* (GWp). Untuk mendapatkan sinar matahari yang optimal ada beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas sinar matahari. Durasi penyinaran di Indonesia umumnya berkisar antara 4 – 6 jam perhari, dengan waktu paling efektif terjadi pada pukul 09.00 hingga 15.00 saat matahari berada pada posisi tertinggi. (Ferdyson, 2023).

Pemanfaatan energi matahari sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Intensitas radiasi matahari yang tinggi akan meningkatkan efisiensi perangkat yang memanfaatkan energi surya, seperti panel surya dan pemanas air tenaga surya (*solar water heater*). Namun, kondisi cuaca seperti mendung dan hujan dapat mengurangi intensitas radiasi yang diterima, sehingga menurunkan efisiensi sistem. Untuk mengatasi hal ini, dilakukan pengembangan sistem cadangan (seperti pemanas berbasis listrik/gas) dan perbaikan desain kolektor. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lapisan aluminium dan seng pada kolektor surya dapat meningkatkan efisiensi penyerapan panas di iklim tropis seperti Indonesia. Selain itu,

inovasi bentuk kolektor, seperti penggunaan lensa konsentrator panas, juga mampu meningkatkan kinerja meskipun dalam kondisi pencahayaan rendah (Ahmed et al, 2021). *Solar water heater* (SWH) adalah perangkat yang dirancang untuk memanaskan air dengan memanfaatkan energi matahari. Teknologi ini menawarkan solusi ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan air panas, baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri. Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian SWH adalah ketergantungannya pada intensitas radiasi matahari yang fluktuatif akibat perubahan cuaca (Rahman et al., 2022).

Untuk mengatasi tantangan penurunan efisiensi akibat variabilitas cuaca, penggunaan material perubahan fase (*Phase Change Material* disingkat PCM) seperti stearic telah banyak diteliti sebagai solusi. PCM memiliki kemampuan menyerap dan melepaskan panas laten selama proses perubahan fase dari padat ke cair dan sebaliknya, sehingga dapat berfungsi sebagai media penyimpan energi termal. Penggunaan stearic sebagai PCM dalam sistem *solar water heater* (SWH) terbukti mampu mempertahankan suhu air lebih stabil, terutama saat kondisi cuaca mendung atau malam hari, sehingga meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan (Prakash et al, 2019). Selain *parafin*, *asam palmitat* dan *asam stearic* (*stearic acid*) juga merupakan jenis PCM organik yang potensial. Keduanya memiliki titik leleh yang sesuai untuk aplikasi pemanas air domestik (sekitar 55–70°C), dan bersifat stabil secara termal, tidak beracun, serta mudah diperoleh. *Palmitat* memiliki keunggulan dalam kestabilan termal jangka panjang, sedangkan *asam stearic* memiliki konduktivitas termal yang lebih baik dan waktu pelepasan panas yang lebih cepat. Kombinasi atau pencampuran kedua jenis asam ini juga telah diuji dalam berbagai penelitian untuk mendapatkan karakteristik PCM yang optimal. Dengan pemilihan material PCM yang tepat, sistem SWH dapat beroperasi lebih efisien dan andal dalam berbagai kondisi cuaca (Dongyi et al, 2020).

Salah satu solusi yang berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir adalah penggunaan *Phase Change Material* (PCM) atau material perubahan fasa. PCM berfungsi untuk menyimpan energi panas dalam bentuk panas laten selama proses perubahan fasa dari padat ke cair, dan melepaskannya kembali saat suhu lingkungan menurun. Di antara berbagai jenis PCM yang telah diteliti, *asam stearic* (*stearic acid*) menjadi salah satu kandidat PCM organik yang paling menjanjikan untuk sistem pemanas air surya. *Asam stearic* memiliki titik leleh sekitar 69–70 °C, yang sesuai dengan rentang suhu kerja sistem pemanas air. Selain itu, nilai panas laten lelehnya yang tinggi (sekitar 199–210 kJ/kg) memungkinkan penyimpanan energi panas dalam jumlah besar (Chopra et al., 2023). Selain sifat termalnya yang unggul, *asam stearic* juga memiliki beberapa keunggulan lain, seperti kestabilan kimia dan termal, tidak beracun, tidak korosif terhadap logam, serta ramah lingkungan karena berasal dari sumber alami. Studi yang dilakukan oleh (Li et al, 2019) menunjukkan bahwa *asam stearic* yang dikombinasikan dengan grafit yang diperluas mampu meningkatkan konduktivitas termal dan efisiensi sistem pemanas air tenaga surya tanpa tangki. Sementara itu, (Xie et al, 2020) menunjukkan bahwa penggunaan komposit *asam stearic* dengan arang tempurung kelapa dapat mempertahankan suhu air hangat hingga beberapa jam setelah matahari terbenam.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pemanfaatan *asam stearic* sebagai PCM dalam sistem pemanas air tenaga surya menjadi topik yang penting untuk diteliti lebih lanjut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi energi terbarukan yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, khususnya dalam meningkatkan kontinuitas suplai air panas rumah tangga.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada alat penukar kalor *shell and tube* dengan media fluida air panas dan dingin pada stearic.
2. Mengetahui waktu yang dibutuhkan dalam proses perpindahan panas ke PCM sehingga mengalami perubahan fasa dari dalam alat penukar kalor *shell and tube*.

1.3 Batasan Masalah

Dalam proses penelitian dilakukan pembatasan masalah untuk memudahkan pengambilan data. Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis alat penukar kalor yang digunakan adalah *tipe shell and tube heat exchanger* dengan posisi horizontal.
2. PCM yang digunakan adalah stearid acid ($C_{18}H_{36}O_2$).
3. Variasi kecepatan aliran air yang digunakan sebesar 8 L/menit, 10 L/menit, dan 12 L/menit.
4. Variasi temperatur air masuk sebesar 80 °C

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dari penulisan dalam penyusunan Laporan Kerja Praktik ini antara lain:

1. PENDAHULUAN

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

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan landasan dari teori mengenai hal-hal yang berhubungan dengan penelitian seperti perpindahan panas, material

berubah fasa (PCM), *stearid acid*, SWH dan lainnya.

3. METODOLOGI PENELITIAN

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

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

5. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Solar Water Heater (SWH)

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

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

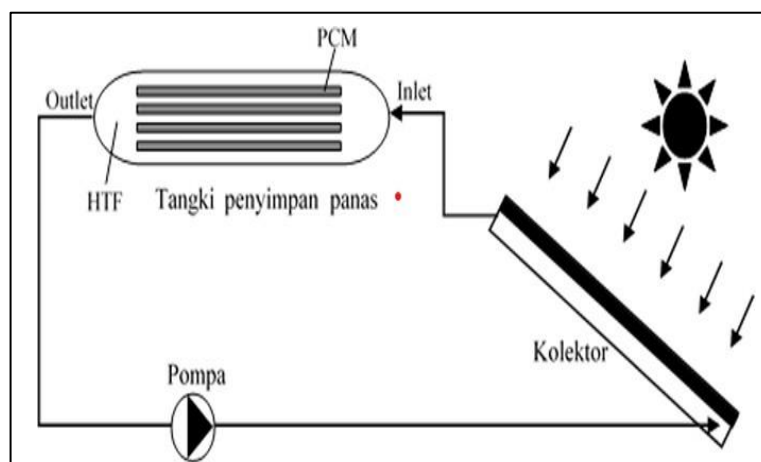
mengembangkan teknologi pemanas air tenaga surya yang lebih efisien dan tahan lama (Koua et al, 2020).

2.1.1 Jenis-Jenis Sistem Solar Water Heater

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

1. Sistem Aktif

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



Gambar 1. Diagram Alir Sistem SWH Aktif

Sumber : (Sidiq, 2025)

2. Sistem Pasif

Sistem pasif tidak menggunakan pompa untuk menggerakkan aliran seperti yang dilakukan sistem aktif. Efek termosifon adalah apa yang membuat air bergerak. Hal ini terjadi karena air panas memiliki densitas yang lebih rendah daripada air

dingin. Sistem pasif kurang efisien dibandingkan dengan sistem aktif, tetapi lebih mudah untuk dibangun, biayanya lebih rendah untuk dioperasikan, dan memerlukan lebih sedikit perawatan.

2.2 Perpindahan Panas

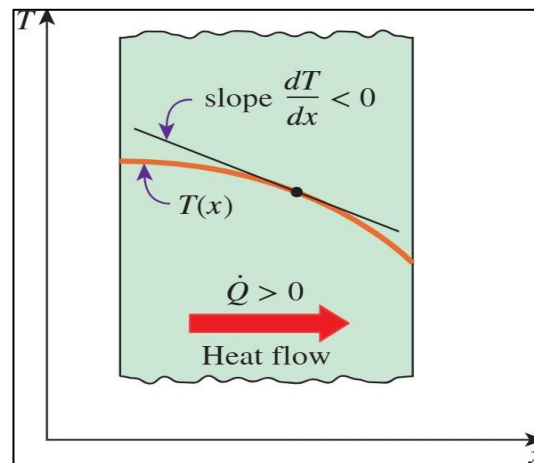
Panas adalah bentuk energi yang dapat berpindah dari satu sistem ke sistem lainnya akibat perbedaan temperatur, tetapi *tidak dapat diciptakan atau dihilangkan secara langsung*. Perpindahan ini biasanya disertai perubahan temperatur suatu materi maupun proses fisis lainnya. Ilmu perpindahan panas (*heat transfer*) mempelajari bagaimana energi panas berpindah di antara objek–objek dengan perbedaan suhu serta laju perpindahan tersebut dalam berbagai kondisi termal (Çengel, 2020).

Dalam bidang rekayasa energi, analisis perpindahan panas diperlukan untuk memprediksi laju transfer energi dan meningkatkan efisiensi sistem termal. Proses perpindahan panas umumnya melibatkan tiga mekanisme utama, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga mekanisme tersebut dapat berlangsung secara simultan dalam satu sistem, seperti pada sistem *solar water heater* (SWH) yang memanfaatkan radiasi matahari, konduksi pada material kolektor, dan konveksi pada fluida kerja (Alwan et al., 2022).

2.2.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Konduksi merupakan mekanisme perpindahan panas yang terjadi akibat interaksi langsung antar molekul dalam suatu medium tanpa disertai perpindahan massa secara makroskopis. Perpindahan panas ini berlangsung ketika terdapat gradien temperatur di dalam suatu material, sehingga energi panas mengalir dari daerah bersuhu tinggi menuju daerah bersuhu rendah (Çengel, 2020). Contoh perpindahan

panas konduksi yang terjadi pada permukaan dinding yang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Perpindahan panas konduksi

(Cengel, 2020)

Nilai konduktivitas termal material sangat menentukan kemampuan suatu bahan dalam menghantarkan panas, sehingga pemilihan material dengan konduktivitas tinggi menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi sistem pemanas air tenaga surya (Ahmed et al., 2021). Persamaan dasar untuk konduksi satu dimensi dalam keadaan studi dapat ditulis:

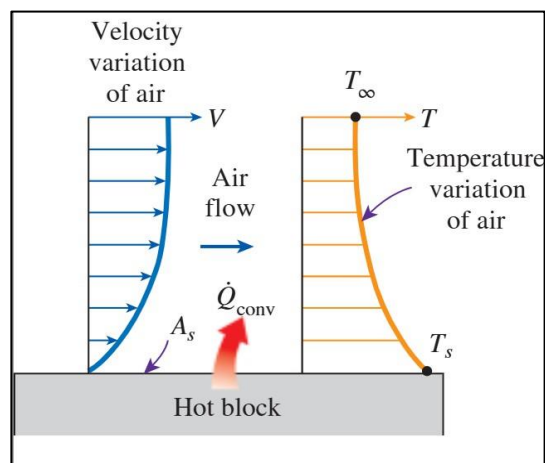
$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Dimana:

- \dot{Q}_{cond} : Laju perpindahan panas (W)
- A : Luas penampang (m^2)
- k : Konduktivitas termal (W/m.K)
- T : Temperatur (K)
- x : Tebal (m)

2.2.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Konveksi adalah mode perpindahan energi antara permukaan padat dan cairan atau gas yang berdekatan yang sedang bergerak, dan melibatkan efek gabungan dari konduksi dan gerakan fluida. Perpindahan panas konveksi secara umum dibagi menjadi 2 cara, yaitu konveksi bebas yang disebabkan oleh beda kerapatan dan beda temperatur serta tidak ada tenaga dari luar yang mendorong. konveksi paksa yaitu perpindahan panas yang alirannya dipengaruhi oleh gaya dari luar atau gaya tambahan. Contoh perpindahan panas konveksi dapat dilihat pada gambar 3. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar perpindahan panas konveksi. Konveksi merupakan mekanisme perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak di sekitarnya. Proses ini melibatkan kombinasi antara konduksi panas pada lapisan fluida dekat permukaan dan perpindahan energi akibat pergerakan massa fluida (Rahman et al., 2022).



Gambar 3. Perpindahan panas konveksi
(Cengel, 2020)

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

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

Dimana:

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

h : Koefisien konveksi ($W/m^2.K$)

A_s : Luas penampang (m^2)

T_s : Suhu Permukaan ($^{\circ}C$)

T_{∞} : Suhu fluida di sekitarnya ($^{\circ}C$)

2.2.3 Perpindahan Panas secara Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan kalor yang terjadi dalam bentuk perambatan gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan adanya zat perantara (medium). Perpindahan panas radiasi merupakan proses dimana panas mengalir dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah bila benda itu terpisah di dalam ruang. Radiasi merupakan mekanisme perpindahan panas yang terjadi melalui gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan medium perantara. Mekanisme ini sangat dominan pada sistem yang memanfaatkan energi matahari, seperti *solar water heater* (Hamed et al., 2017; Alwan et al., 2022). Contoh perpindahan panas radiasi terjadi pada panas matahari yang sampai permukaan bumi. Dengan rumus perpindahan panas secara radiasi adalah sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{rad} = e \cdot \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.3)$$

Dimana:

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

e : Emisivitas

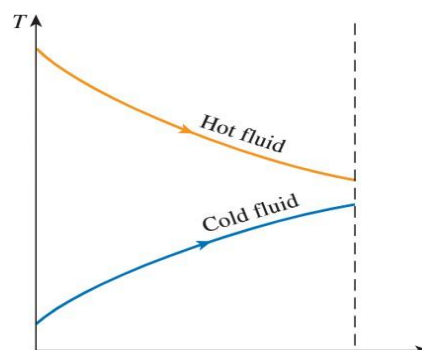
σ : Konstanta Stefan-bolzmann $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m^2K^4)

2.3 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchangers*)

Alat penukar panas (*Heat Exchangers*) adalah perangkat yang memungkinkan transfer panas antara dua fluida yang memiliki suhu berbeda tanpa mencampurkan keduanya. Alat ini umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pemanasan, sistem pendinginan udara, dan pembangkitan tenaga. Proses perpindahan panas dalam alat penukar panas melibatkan konveksi dalam masing-masing fluida dan konduksi di dinding yang memisahkan keduanya. Tujuan dari alat penukar kalor adalah untuk mengontrol suatu sistem dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya. Terdapat dua aliran penukaran panas yaitu dengan aliran searah (*co-current*) dan penukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter-current*) (Cengel, 2020).

2.3.1 Aliran Searah

Pada penukaran panas dengan aliran searah, kedua fluida (dingin dan panas) memasuki sisi penukar panas yang sama, mengalir dalam arah yang serupa, dan akhirnya keluar dari sisi yang sama pula. Ciri khas dari tipe penukar panas ini adalah bahwa suhu dari fluida dingin yang keluar dari perangkat tidak dapat melebihi suhu dari fluida panas yang juga keluar dari perangkat. Oleh karena itu, seringkali diperlukan media pendingin atau pemanas tambahan yang cukup banyak. Gambar 4 merupakan profil temperatur aliran *Co-current*.

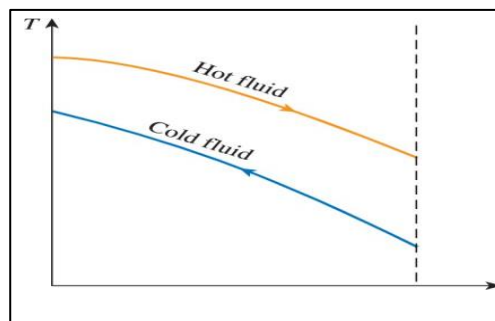


Gambar 4. Profil temperatur aliran *Co-Current*

(Cengel, 20202)

2.3.2 Berlawanan Arah

Berbeda dengan aliran searah di mana kedua fluida memasuki dan keluar dari sisi yang sama, pada penukar panas berlawanan arah, kedua fluida (panas dan dingin) memasuki dan keluar dari sisi yang berlawanan. Pada jenis penukar panas ini, suhu dari fluida dingin yang keluar dari perangkat lebih tinggi dibandingkan dengan suhu dari fluida panas yang juga keluar dari perangkat. Oleh karena itu, penukar panas berlawanan arah dianggap lebih efektif dibandingkan dengan aliran searah. Gambar 5 merupakan bentuk grafik dari aliran yang berlawanan arah.



Gambar 5. Profil temperatur aliran *counter-current*

(Cengel, 2020)

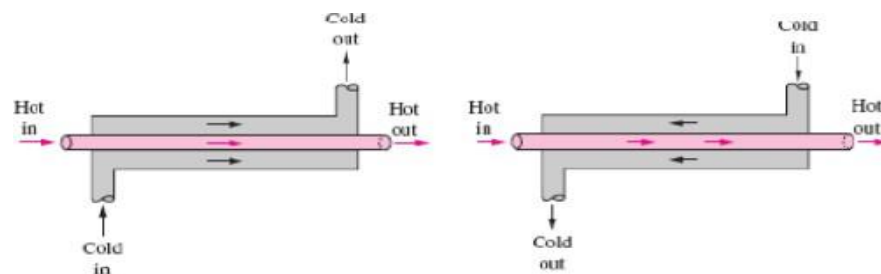
Penukar panas juga dikelompokkan berdasarkan metode transfer panas. Ada dua klasifikasi alat penukar panas berdasarkan metodenya, yaitu penukar panas langsung dan tidak langsung. Penukar panas yang bersifat langsung adalah ketika fluida panas dan fluida dingin bercampur secara langsung tanpa ada pemisah di dalam suatu wadah atau ruang tertentu. Di sisi lain, penukar panas yang bersifat tidak langsung adalah ketika fluida panas tidak memiliki kontak langsung dengan fluida dingin. Dalam hal ini, proses perpindahan panas menggunakan suatu media perantara seperti pipa, plat, atau jenis peralatan lainnya.

2.4 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor

Jenis-jenis *heat exchanger* dapat dibedakan atas:

1. Tipe pipa rangkap (*double pipe heat exchanger*)

Double pipe heat exchanger adalah alat penukar panas di mana fluida mengalir dalam pipa dari satu titik ke titik lainnya. Arus fluida dapat bergerak dalam arah yang sama atau berlawanan. Alat ini terdiri dari pipa yang saling terhubung dan panjang. *Double pipe heat exchanger* cocok untuk kondisi di mana laju aliran cairan relatif kecil. Ilustrasi dari aliran dalam penukar panas ini dapat dilihat pada Gambar 6.

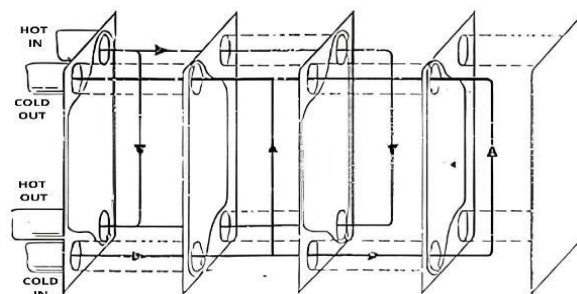


Gambar 6. Profil temperatur aliran *counter-current*

(Cengel, 2020)

2. Tipe *plate and frame*

Alat penukar panas ini terdiri dari pelat-pelat tegak lurus, bergelombang atau profil lainnya. Pemisah antara pelat tegak lurus dipasang penyekat lunak.



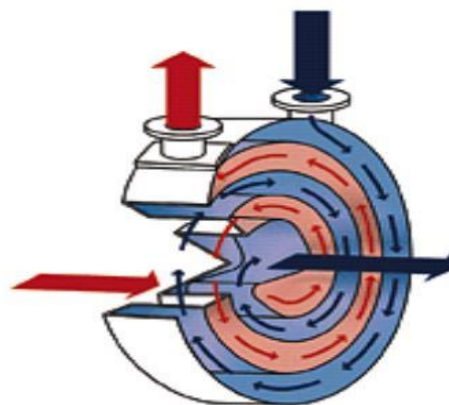
Gambar 7. *Plate-frame heat exchanger*

(Syaichurrozi et al, 2014)

Pelat-pelat dari sekat ditentukan oleh suatu perangkat penekan yang pada setiap sudut pelat terdapat lubang pengalir fluida, fluida mengalir pada sisi yang lain, sedangkan fluida yang lain mengalir melalui lubang dan ruang pada sisi sebaliknya karena ada sekat (Syaichurrozi et al, 2014). Keunggulan dari tipe penukar panas ini termasuk efisiensi tinggi, ukuran yang relatif kecil, dan kemampuan untuk menangani tekanan dan suhu tinggi. Jenis ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sistem pendingin, pemanas air, dan proses industri yang memerlukan pertukaran panas efisien. Gambar 7 merupakan bentuk dari *heat exchanger tipe plate and frame*.

3. Tipe spiral (*spiral heat exchanger*)

Penukar panas spiral adalah jenis penukar panas di mana dua aliran fluida berinteraksi melalui serangkaian pipa yang dililit dalam spiral. Hal ini memungkinkan terjadinya pertukaran panas secara efisien melalui kontak langsung antara dinding pipa dan fluida. Meskipun memiliki efisiensi perpindahan panas yang tinggi, konstruksi seperti ini tidak dapat dioperasikan pada tekanan tinggi.



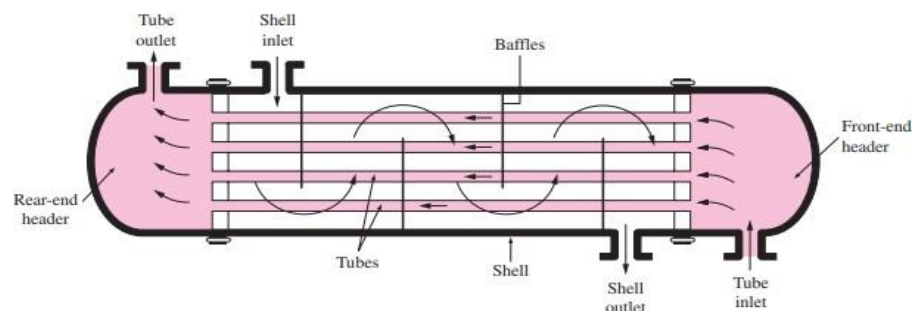
Gambar 8. *Spiral plate heat exchanger*

(Khorshidi, 2016)

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

Shell and Tube adalah jenis perangkat pertukaran panas yang terdiri dari

sebuah tabung (*shell*) di dalamnya terdapat susunan pipa (*tube*). Fluida panas mengalir di dalam pipa sedangkan fluida dingin mengalir di luar pipa atau di dalam tabung, atau sebaliknya. Karena kedua aliran fluida hanya melewati pertukaran panas sekali, maka konfigurasi ini disebut pertukaran panas satu kali (*single-pass*). Apabila kedua fluida mengalir searah, maka jenis pertukaran panas ini disebut aliran searah (*parallel flow*). Namun, jika kedua fluida mengalir berlawanan arah, maka jenis pertukaran panas ini disebut aliran berlawanan (*counterflow*). Ilustrasi dari aliran dalam penukar panas ini dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Shell and tube heat exchanger

(Cengel, 2020)

2.5 Material Berubah Fasa (*Phase Change Material*)

Material berubah fasa atau selanjutnya dikenal sebagai *Phase Change Materials* (PCM) yang juga seringkali disebut sebagai bahan-bahan penyimpan panas laten adalah bahan yang mempunyai kemampuan untuk melepaskan energi panas yang sangat tinggi dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa perubahan temperatur. Proses perubahan fasa ini dapat melibatkan transisi dari keadaan padat menjadi cair atau sebaliknya. PCM, seperti asam lemak, minyak nabati, garam hidrat, dan parafin, yang sering digunakan sebagai bahan baku lilin, adalah contoh umum dari bahan ini yang sering kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari. Ketika suhu meningkat, ikatan kimia di antara molekul PCM akan terlepas. Pada PCM yang berada dalam keadaan padat-cair, bahan tersebut akan meleleh atau mengalami

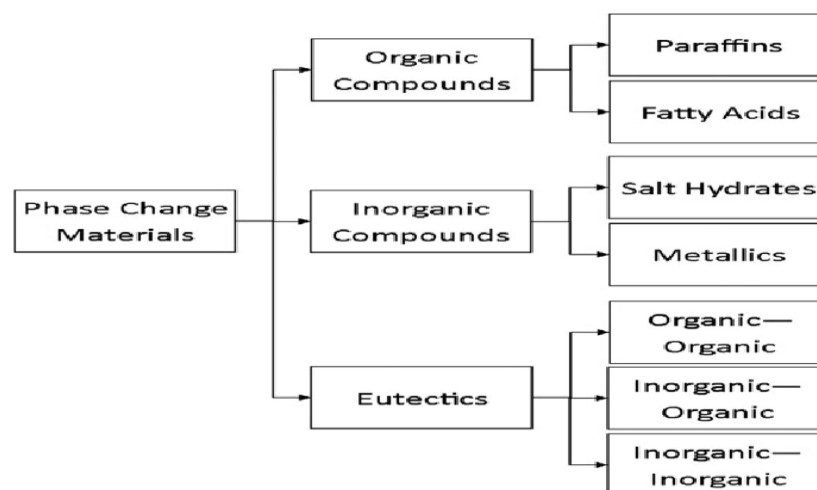
transisi menjadi bentuk cair. Proses perubahan fasa ini bersifat endotermik. Sebaliknya, saat suhu menurun, PCM akan mengalami proses pembekuan, yang disertai dengan reaksi isotermik, berarti bahwa panas akan dilepaskan selama proses pembekuan berlangsung (Kusumah et al, 2020).

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

PCM memiliki sifat fisik yaitu keseimbangan fasa, dimana stabilitas fase selama peleburan dan pembekuan akan menguntungkan dalam pengaturan temperatur penyimpan kalor. Kemudian massa jenis material yang tinggi, yang mana akan memperkecil ukuran dari bejana penampung. Serta perubahan volume yang kecil, dan tekanan penguapan yang rendah akan mengurangi masalah dalam penampungan. PCM juga memiliki sifat kimia yaitu tidak beracun dan tidak menimbulkan kebakaran. PCM memiliki dua karakteristik utama, yakni densitas penyimpanan panas yang sangat tinggi dan kemampuan menyimpan dan melepaskan panas dalam jumlah yang cukup besar pada temperatur konstan. Hal ini membuat PCM menjadi alternatif yang bagus media penyimpan panas untuk berbagai macam aplikasi. PCM memiliki keuntungan untuk bekerja dalam penurunan suhu kecil, tekanan uap rendah pada suhu operasional. Beberapa sifat seperti murah, stabilitas kimia, non-korosif diperlukan sebelum memilih PCM.

2.6 Klasifikasi PCM

Phase Change Material (PCM) merupakan bahan yang mampu menyerap dan melepaskan energi dalam bentuk panas laten selama proses perubahan fasanya. Secara umum, PCM dapat diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimianya menjadi tiga kelompok utama, yaitu *organik*, *anorganik*, dan *eutektik*. Pengelompokan ini didasarkan pada karakteristik termal seperti titik leleh dan kapasitas panas laten yang dimiliki oleh masing-masing jenis PCM. Adapun klasifikasi PCM organik, senyawa *inorganik* dan *eutectic* dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Klasifikasi PCM
(Mofijur et al,2012)

2.6.1 PCM Organik

PCM organik dapat berupa alifatik atau organik lain. Umumnya PCM organik mempunyai rentang suhu rendah. PCM organik mahal dan mempunyai rata-rata panas laten per satuan volume serta densitas rendah. Sebagian besar PCM organik mudah terbakar di alam. Material berubah fasa organik terdiri dari *stearic* dan *non-stearic*. Bahan organik termasuk bahan yang dapat melebur dan membeku berulang kali tanpa adanya pengurangan volume dan biasanya tidak korosif. Lilin *stearic acid* terdiri dari campuran dengan rumus kimia ($C_{17}H_{35}COOH$). *Stearic* memenuhi syarat sebagai panas bahan

penyimpanan fusi karena ketersediaan mereka dalam berbagai suhu yang besar.

Non-organik *stearic* adalah yang paling banyak dari bahan fase perubahan dengan sifat yang sangat bervariasi. Masing-masing bahan akan memiliki sifat sendiri tidak seperti *stearic*, yang memiliki sifat sangat mirip. Hal ini merupakan kategori terbesar bahan kandidat untuk penyimpanan fase perubahan.

2.6.2 PCM Anorganik

PCM anorganik diklasifikasi menjadi *metallic* dan garam hidrat yang umumnya menggunakan garam-garam alami dari laut, dari endapan mineral atau produk sampingan dari proses yang lain (Kusumah et al, 2020). PCM anorganik memiliki keunggulan panas laten volumetric tinggi, konduktivitas termal lebih tinggi, fusi termalnya sangat bagus, harga lebih murah, dan ketersediaan melimpah, serta tidak mudah terbakar. Sedangkan kekurangannya yaitu volume yang diubah adalah pendinginan super yang sangat tinggi, dan juga sifatnya yang korosif.

2.6.3 PCM Eutectic

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

Syarat dari penggabungan kedua material ini yaitu kedua materialnya harus dapat bercampur rata (tidak memisah). Selain itu, gabungan antara dua material tersebut harus memiliki temperatur leleh dan temperatur beku yang sama sehingga pada saat PCM mengalami

pembekuan dan peleburan kedua material tersebut dapat berlangsung secara bersamaan.

Tabel 1. Jenis-jenis material PCM eutectic

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

2.7 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.7.1 Panas Yang Diserap

Kenyataannya pada penelitian ini yang menjadi sasaran analisis ialah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika. Pada penukar panas, transfer panas atau mengalir dari air panas sirkuit ke sirkuit air dingin. tingkat perpindahan panas adalah fungsi dari tingkat cairan massa aliran, perubahan suhu dan kapasitas panas spesifik dari cairan (pada suhu rata-rata).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Dimana:

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

\dot{m}	: Laju aliran massa (kg/s)
c_p	: Panas spesifik (J/kg °C)
ΔT	: Perbedaan temperatur (°C)

Kita juga dapat mengetahui kinerja perpindahan panas yang terjadi ini dengan cara menghitung panas masuk dan kapasitas penyimpanan panas dari fluida lainnya, dalam hal ini yaitu *stearic*. Persamaannya yaitu sebagai berikut:

$$E_{\text{air}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot t \quad (2.5)$$

Dimana:

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

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

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.6)$$

Dimana:

ρ	: Massa jenis (kg/m ³)
m	: Massa benda (kg)
v	: Volume benda (m ³)

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

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = \dot{m}_H \cdot c_{p,H} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_C \cdot c_{p,C} \cdot \Delta T_C \quad (2.7)$$

2.7.2 Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritmik (*Logaritmik Mean Temperature Difference*)

Merupakan ukuran dari gaya penggerak panas yang menciptakan transfer panas. Ini adalah rata-rata logaritmik dari perbedaan suhu antara sirkuit panas dan dingin di setiap ujung penukar panas.

$$LMTD = \frac{(Th_2 - Tc_2) - (Th_1 - Tc_1)}{\ln \left(\frac{Th_2 - Tc_2}{Th_1 - Tc_1} \right)} \quad (2.8)$$

Dimana:

$LMTD$: *Logaritmik Mean Temperature Difference* (K)

2.7.3 Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Merupakan koefisien perpindahan panas keseluruhan untuk dinding dan lapisan batas. Ini adalah ukuran seberapa baik penukar kalor bekerja. Penukar panas yang baik akan memberikan koefisien yang tinggi.

$$U = \frac{Q_e}{(A \times LMTD)} \quad (2.9)$$

Dimana:

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

2.7.4 Efisiensi Termal

Efisiensi suhu sirkuit panas *Heat Exchanger* adalah rasio perubahan suhu di sirkuit panas, dibagi dengan perbedaan antara suhu maksimum dan minimum dari sirkuit panas dan dingin:

$$\eta_H = \frac{Th_1 - Th_2}{Th_1 - Tc_1} \times 100 \quad (2.10)$$

Dimana:

η_h : Efisiensi termal aliran panas

T_h : Temperatur panas fluida ($^{\circ}\text{C}$)

T_c : Temperatur dingin fluida ($^{\circ}\text{C}$)

Efisiensi suhu sirkuit dingin *Heat Exchanger* adalah rasio perubahan suhu di sirkuit dingin, dibagi dengan perbedaan antara suhu maksimum dan minimum dari sirkuit panas dan dingin:

$$\eta_c = \frac{T_{c1}-T_{c2}}{T_{h1}-T_{c1}} \times 100 \quad (2.11)$$

Dimana:

η_c : Efisiensi termal aliran dingin

Efisiensi suhu rata-rata dari dua sirkuit adalah efisiensi rata-rata dari keduanya:

$$\eta = \frac{\eta_H + \eta_C}{2} \quad (2.12)$$

η : Efisiensi termal menyeluruh

2.8 Stearic Acid Sebagai PCM

Stearic Acid adalah material yang digunakan untuk menyimpan energi termal dalam bentuk perubahan fase. *Stearic acid* ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$) adalah asam lemak jenuh yang memiliki titik leleh sekitar $69\text{--}70^{\circ}\text{C}$, menjadikannya cocok untuk aplikasi penyimpanan energi termal, seperti pada *solar water heater* (pemanas air tenaga surya). Phase Change Material (PCM) adalah material yang mampu menyimpan dan melepaskan energi dalam bentuk panas laten selama proses perubahan fase, umumnya dari padat ke cair dan sebaliknya. Material ini digunakan secara luas dalam sistem penyimpanan energi termal

untuk meningkatkan efisiensi energi, terutama dalam sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*).

$$E_{pcm} = m \times c_p(\text{solid}) \times (T_m - T_i) + m \times L + m \times c_p(\text{liquid}) \times (T_f - T_m) \quad (2.13)$$

Dimana:

E_{pcm}	: Energi PCM (Joule)
T_m	: Temperatur stearic (°C)
T_i	: Temperatur awal (°C)
T_f	: Temperatur akhir stearic (°C)
L	: Kalor peleburan (kJ/kg)

PCM diklasifikasikan menjadi organik, anorganik, dan eutektik. Salah satu PCM organik yang banyak digunakan adalah *asam stearic* (*stearic acid*) karena memiliki titik leleh yang sesuai ($\pm 70^\circ\text{C}$), kestabilan termal, dan sifat yang ramah lingkungan (Tyagi et al., 2023).

Stearic acid merupakan asam lemak jenuh dengan rumus kimia $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$. Material ini banyak digunakan sebagai PCM karena:

- Titik leleh yang sesuai dengan rentang suhu operasional solar water heater.
- Stabilitas kimia dan termal yang baik.
- Ramah lingkungan dan mudah diperoleh.
- Mampu berulang kali melewati proses leleh-beku tanpa degradasi signifikan (Li et al., 2019).

Chopra et al. (2023) mengembangkan sistem kolektor surya tabung vakum menggunakan *stearic acid* sebagai PCM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tersebut mampu meningkatkan efisiensi energi hingga 31% dibanding sistem tanpa PCM. Integrasi PCM dalam sistem solar water heater bertujuan untuk menyimpan panas saat siang hari dan melepaskannya saat

malam atau saat sinar matahari tidak tersedia. Penggunaan PCM seperti asam stearat memungkinkan sistem bekerja lebih stabil dan menyediakan air panas sepanjang hari tanpa ketergantungan penuh pada sinar matahari langsung.

2.9 Sifat *Stearic Acid*

Stearic Acid ($C_{17}H_{35}COOH$) merupakan salah satu asam lemak jenuh rantai panjang yang banyak digunakan sebagai material penyimpan panas laten (*Phase Change Material* atau PCM), khususnya dalam aplikasi sistem pemanas air tenaga surya (solar water heater). Pada suhu ruang, stearic berbentuk padatan seperti lilin dengan warna putih dan tidak berbau. Senyawa ini memiliki titik leleh di kisaran 69–70 °C, yang sangat sesuai dengan rentang suhu kerja dari sistem pemanas air tenaga surya. Oleh karena itu, *asam stearic* mampu menyerap dan menyimpan panas selama fase pencairan, lalu melepaskannya kembali saat suhu lingkungan menurun.

Menurut (Chopra et al, 2023), *asam stearic* menunjukkan performa penyimpanan panas yang baik dengan nilai panas laten leleh sebesar ± 199 –210 kJ/kg, serta panas jenis sekitar 1.8–2.1 kJ/kg·K. Nilai tersebut menunjukkan bahwa material ini mampu menyimpan energi dalam jumlah signifikan saat terjadi perubahan fase. Namun, konduktivitas termalnya yang relatif rendah (sekitar 0.14 W/m·K) menjadi salah satu kekurangan yang perlu ditangani untuk aplikasi praktis. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah mencampurkan *stearic* dengan bahan penguat konduktivitas termal seperti grafit yang diperluas (*expanded graphite*) atau arang tempurung kelapa, seperti yang dilakukan oleh (Xie et al, 2020), guna mempercepat laju perpindahan panas.

Kepadatan *stearic acid* saat mendekati titik lelehnya berada pada kisaran 0.847 g/cm³. Selain memiliki stabilitas termal yang baik terhadap siklus leleh-beku berulang, stearic juga tergolong aman digunakan karena tidak

korosif terhadap logam umum dan tidak larut dalam air. Kelarutannya hanya tinggi dalam pelarut organik tertentu, yang membuatnya relatif stabil dalam sistem tertutup. *Stearic acid* juga bersifat *biodegradable* dan berasal dari sumber alam (lemak nabati atau hewani), sehingga tergolong ramah lingkungan dan berkelanjutan (Li et al., 2019). Dengan kombinasi karakteristik tersebut, stearic dinilai sebagai PCM organik yang sangat potensial untuk meningkatkan efisiensi energi dan memperpanjang waktu pemanfaatan panas dalam sistem pemanas air surya.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian yang mengkaji karakteristik perpindahan kalor pada material berubah fasa berupa *stearic* di dalam alat penukar kalor sebagai media untuk menyimpan serta memberikan kalor. Bahan baku PCM yang digunakan pada penelitian ini yaitu *stearic*. Hal ini disebabkan karena *stearic* memiliki harga yang ekonomis dan ketersediaannya yang melimpah di Indonesia serta memiliki karakteristik yang baik sebagai *thermal energy storage*. Alat utama yang digunakan pada penelitian ini yaitu alat penukar kalor dengan tipe *solar water heater* dimana pada penelitian ini alat penukar kalornya diposisikan horizontal. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental, sehingga membutuhkan waktu dan tempat untuk melakukan pengujiannya. Adapun waktu dan tempat serta hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

3.1 Tempat Pelaksanaan

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

3.2 Waktu Pelaksanaan

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

1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah mempelajari mengenai perpindahan panas, alat penukar kalor, material berubah fasa, *stearic*

dan karakteristiknya.

2. Persiapan Alat

Pengujian Mempersiapkan alat pengujian dan bahan yang dibutuhkan seperti alat penukar panas, penyimpanan air, stearic, dan lain sebagainya yang akan dijelaskan lebih rinci pada bagian alat dan bahan

3. Pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan tata peletakan posisi alat penukar kalor *solar water heater* yang horizontal berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan.

4. Penulisan Laporan

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

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

a. Pemanas air

Pemanas air yang digunakan adalah koil pemanas, dimana alat ini dipakai untuk menghangatkan air atau udara. Umumnya menggunakan listrik, koil pemanas berfungsi mirip dengan resistor besar, di mana ketika arus listrik mengalir melaluinya, koil ini mulai memanaskan. Daya dari koil pemanas yang digunakan adalah 650 *Watt*. Kemudian, koil pemanas ini akan dihubungkan ke sumber listrik dan dicelupkan ke dalam air untuk memanaskan air hingga mencapai suhu tertentu. Pemanas air yang digunakan dapat dilihat seperti pada Gambar 11 berikut:



Gambar 11. Pemanas air

b. *Data Logger dan Thermocouple*

Data Logger serta *Thermocouple* berperan dalam mengambil pengukuran suhu pada *stearic*, temperatur fluida yang masuk dan keluar dari alat penukar panas, serta temperatur fluida yang masuk dan keluar dari tabung penyimpanan air. Fluktuasi suhu ini akan dicatat oleh *data logger* dan dapat diarsipkan dalam SD Card.



Gambar 12. Data logger dan thermocouple

Tabel 2. Spesifikasi data logger

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

Tabel 3. Spesifikasi thermocouple

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

c. Pompa air

Pompa air ini berfungsi untuk mensirkulasi air untuk masuk dan keluar dari alar penukar kalor hingga perpindahan panas maksimal terjadi. Pompa air yang dipakai adalah pompa air akuarium, seperti yang terlihat pada Gambar 13 berikut:



Gambar 13. Pompa air

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

Tabel 4. Spesifikasi pompa air

Daya	60/85/120 Watt
Voltase	220 V
Temperatur air (maks.)	90° C
Tekanan system (maks.)	10 bar
Daya dorong (maks.)	9 meter
Kapasitas (maks.)	1,6 m/h
Ukuran pipa	$\frac{3}{4}$ inch

d. *Water flow meter*

Water flow meter berfungsi mengukur debit fluida yang mengalir dari keluaran pompa ke alat penukar kalor, sehingga besar laju aliran massa fluida dapat diketahui. *Water flow meter* yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 14 berikut ini:



Gambar 14. *Water flow meter*

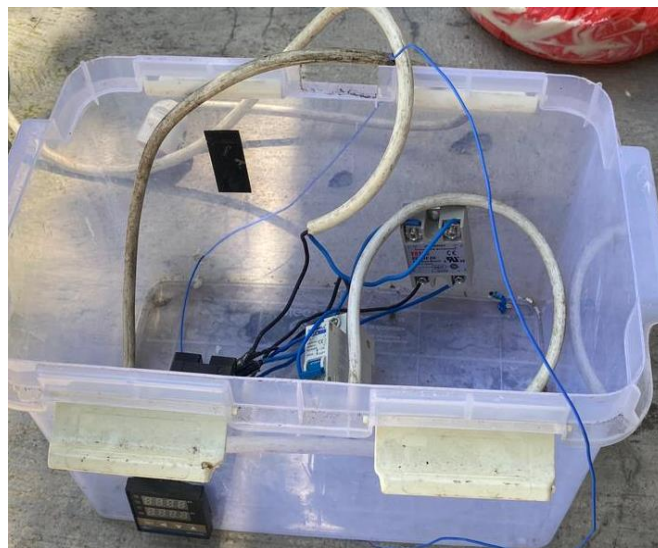
Water flow meter yang digunakan dalam pengujian ini memiliki spesifikasi alat sebagai berikut:

Tabel 5. Spesifikasi water flow meter

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

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

Pengontrol suhu yang dipakai adalah PID Digital ganda REX-C100 dengan termokopel tipe K sebagai input pembaca suhu. Memiliki fungsi sebagai pengontrol mati hidupnya elemen pemanas, yang mana termokopel akan membaca suhu air dan dikirimkan ke kontroler untuk mengontrol elemen pemanas. Apabila suhu air telah tercapai maka kontroler mematikan elemen pemanas.



Gambar 15. Kontroler suhu dan SSR

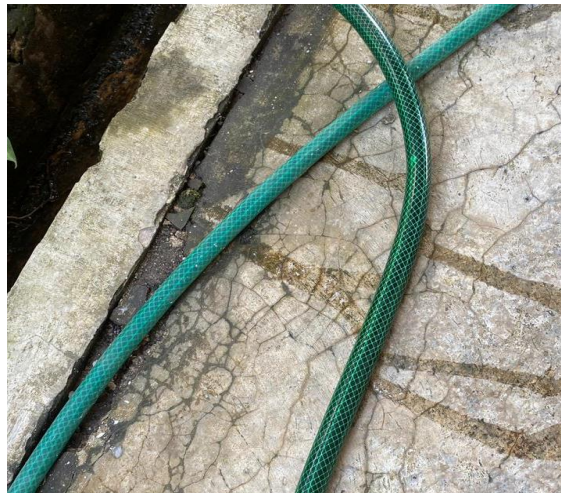
Spesifikasi Kontroler suhu dan SSR adalah sebagai berikut:

Tabel 6. Spesifikasi kontroler dan SSR

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

f. Selang pipa air panas

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



Gambar 16. Selang pipa air panas

g. Katup air

Katup air berfungsi mengontrol jumlah fluida yang mengalir seperti memperbesar dan memperkecil serta memutus aliran fluida dengan

cara memutar pegangannya. penelitian ini menggunakan keran air sistem putar yang di dalamnya terdapat bola sebagai penutup seperti terlihat pada Gambar 17 berikut ini:



Gambar 17. Katup air

h. Penampungan Air

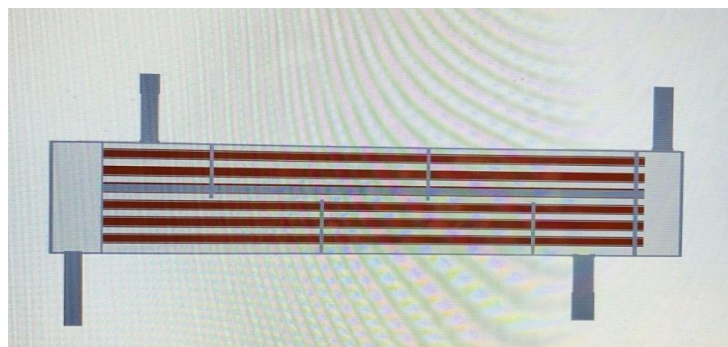
Penampungan air berfungsi sebagai tempat penampungan sementara air sebelum dialirkan ke sistem utama melalui jaringan pipa. Dalam konteks penelitian ini, penampungan air digunakan untuk menyuplai kebutuhan fluida panas secara kontinu ke dalam sistem penukar kalor, khususnya selama proses pelelehan dan pembekuan material perubahan fasa pada stearic. Air yang disimpan dalam wadah ini dipanaskan terlebih dahulu menggunakan elemen pemanas sebelum dialirkan ke dalam alat penukar kalor untuk mentransfer energi panas ke material PCM. Selain itu, keberadaan penampungan air ini juga mempermudah proses pengisian ulang dan pengontrolan suhu awal air sebelum masuk ke dalam sistem sirkulasi. Penampungan air yang digunakan dapat dilihat seperti pada gambar 18 berikut:



Gambar 18. Penampungan Air

i. Alat penukar kalor

Alat penukar kalor yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat penukar kalor tipe *shell and tube* dimana parafin terletak di bagian luar pipa sedangkan air mengalir di bagian dalam pipa. Bagian dalam pipa menggunakan bahan tembaga sebanyak 15 buah dengan diameter masing-masing $\frac{3}{8}$ inch dan pada bagian luar menggunakan pipa PVC dengan diameter 4 inch. Panjang keseluruhan dari alat penukar kalor ini adalah 61 cm. Pada penelitian ini dilakukan variasi kecepatan aliran air juga digunakan tambahan sirip pada sisi luar pipa dalam.



Gambar 19. Alat penukar panas shell and tube

Detail dari variasi dan desain alat penukar kalor dapat dilihat pada table 7 Berikut ini:

Tabel 7. Ukuran alat penukar panas

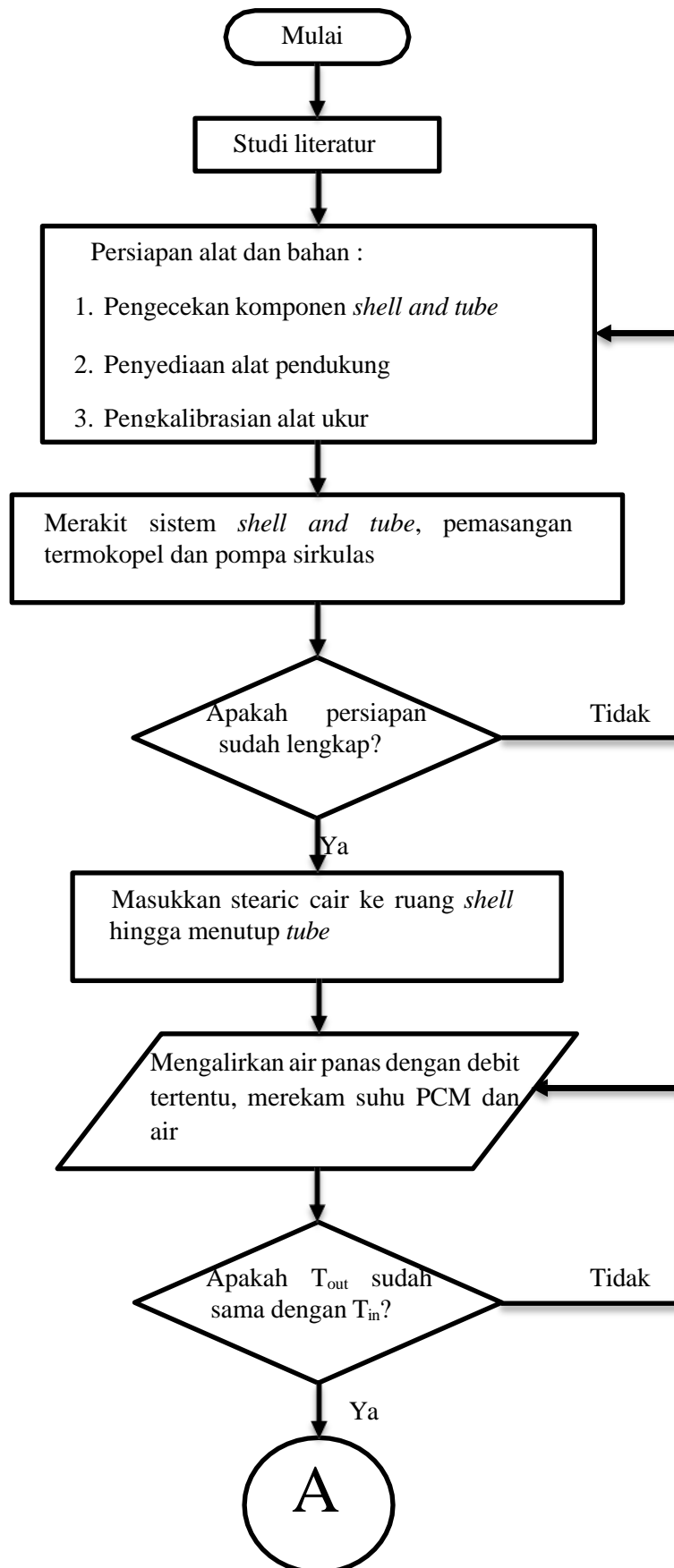
Nama	Keterangan
Pipa Tembaga	Ukuran: 3/8" Panjang: 530 mm Diameter dalam: 9,5 mm Diameter luar: 10,5 mm
Pipa PVC	Ukuran: 4" Panjang: 635 mm Diameter dalam: 110 mm Diameter luar: 115 mm
Sirip	Diameter luar: 100 mm Jarak antar sirip: 30 mm Jumlah sirip: 4 buah

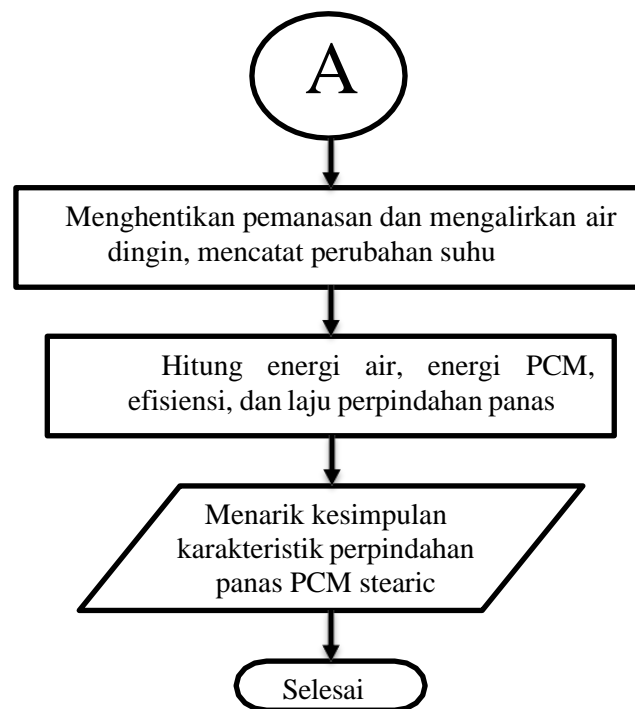
1. Bahan

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah air dan *stearic*. Air disirkulasikan oleh pompa dari penampungan air menuju alat penukar kalor kemudian kembali ke penampungan air. *Stearic* sebagai material berubah fasa yang digunakan berjenis padat atau lilin *stearic* yang kemudian diletakkan diantara pipa dalam dan luar *shell and tube*.

Gambar 20. Gambar *stearic acid*

3.4 Diagram Alir

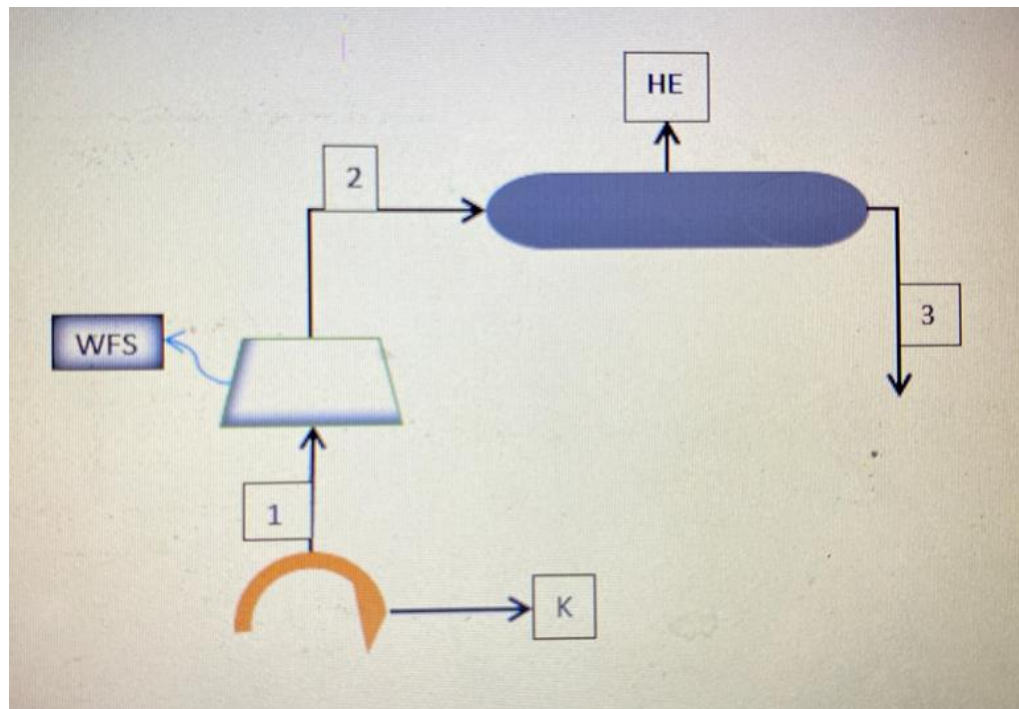




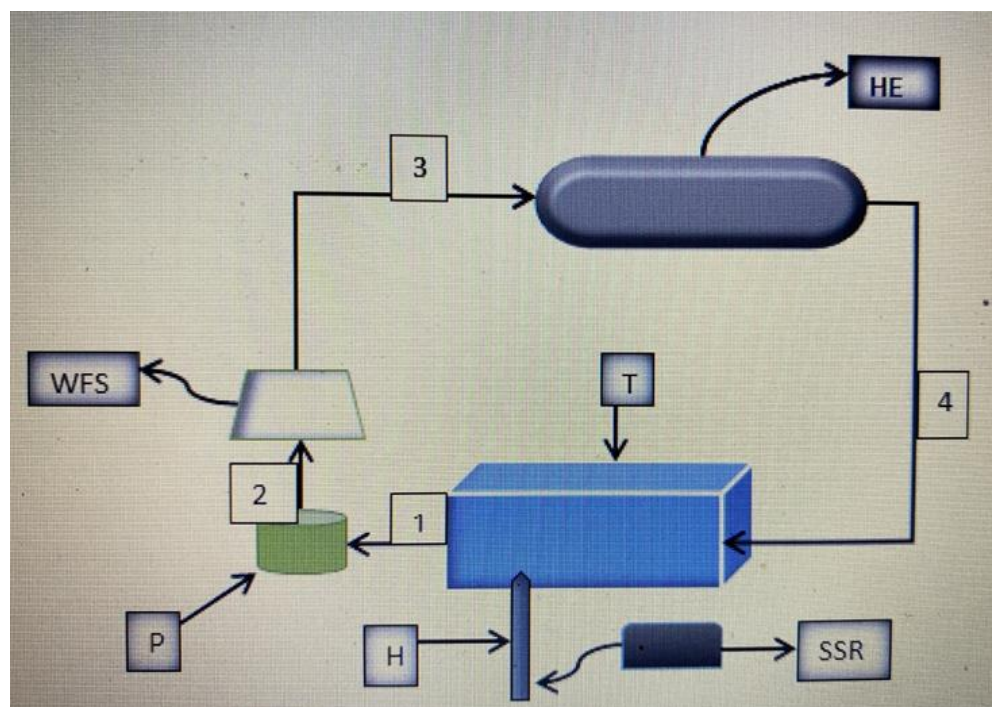
Gambar 21. Diagram alir penelitian

3.5 Skema Pengujian Titik Beku Dan Titik Leleh Stearic

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian yang mana bermula dari *stearic* masih dalam bentuk cair, kemudian di lakukannnya pengujian titik beku *stearic* yang sudah berada pada shell and tube, kemudian fluida berupa air dipanaskan di tempat penampung air panas yang kemudian panasnya dialirkan ke shell and tube dengan menggunakan pompa hingga *stearic* mencair. Kecepatan dari aliran air ini dapat dikontrol dengan menggunakan katup air serta kecepatan alirannya dapat dilihat melalui *water flow meter sensor*. Temperatur *stearic*, temperatur fluida masuk dan keluar penukar panas, serta temperatur masuk dan keluar tempat penampung air dapat diketahui dengan *thermocouple* dan data logger. Instalasi pengujian titik leleh dan titik beku dapat di lihat gambar di bawah berikut:



Gambar 22. Skema pengujian titik beku

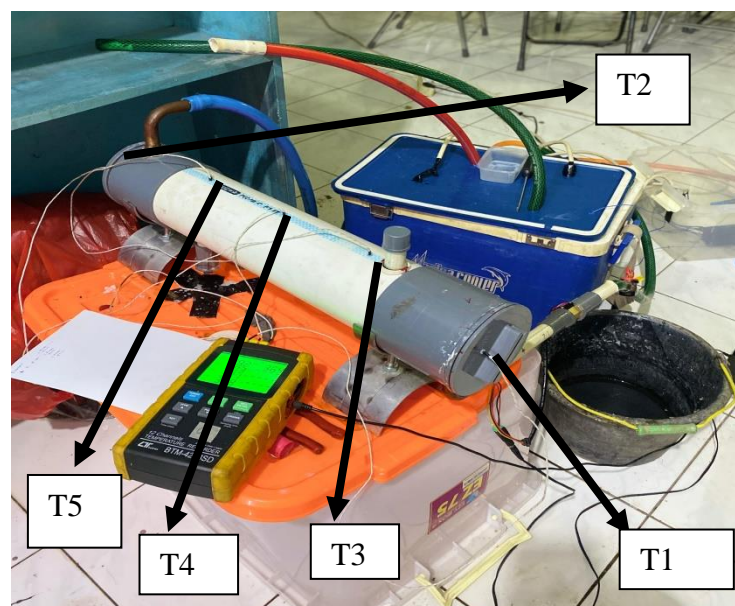


Gambar 23. Skema pengujian titik leleh

Keterangan:

- T : Tempat penampung air
- H : Pemanas Air
- HE : Alat penukar kalor
- P : Pompa air
- WFS : *Water flow meter sensor*
- K : Keran Air
- SSR : *Solid State Relay*

3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 24. Penempatan titik ukur

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan data logger dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Digunakan 5 buah termokopel untuk melakukan pengukuran temperatur. Untuk mengukur debit aliran air, *water flow meter* akan disambungkan dengan pipa penghubung diantara *shell and tube* dan katup ypass.

Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 detik dengan menggunakan data logger. Percobaan dilakukan sebanyak 6 kali dimana terdiri dari 3 variasi debit air (8 L/menit, 10 L/menit, dan 12 L/menit).

3.7 Prosedur Pengambilan Data

Prosedur pengambilan data pengujian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pompa air, *thermocouple* dan *data logger*, *water flow meter sensor*, pemanas air, tempat penampung air, alat penukar kalor, *stearic*, selang, dan katup air.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Menghidupkan data logger dan memasang *thermocouple*, dengan susunan T1, dan T2 temperatur fluida masuk keluar penukar panas, T3, T4, dan T5, adalah temperatur PCM di dalam penukar panas.
4. Panaskan dahulu *stearic acid* pada wadah dengan metode di panaskan di atas kompor.
5. Setelah panas hingga benar- benar mencair lalu di masukkan kedalam alat penukar kalor.
6. Menghidupkan pompa air.
7. Mengalirkan air dingin untuk mengambil data titik beku terlebih dahulu dengan mengatur aliran air dengan *flowmeter* dengan pengambilan data 3, 8, 10, dan 12 L/menit sebanyak 3 kali percobaan setiap *flowmeter*.
8. Setelah pengambilan data lalu pindahkan ke *Ms. excel*.
9. Memanaskan air yang berada pada tempat penampung air panas untuk temperatur yaitu 80 °C.
10. Menghidupkan pompa air.
11. Memanaskan *stearic acid* didalam alat penukar kalor dengan mengalirkan air panas yang terdapat ditempat penampung air panas sampai temperatur *stearic* mencapai 58 °C dengan toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
12. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 10 detik.
13. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat kecepatan aliran.

14. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air.
15. Biarkan air bersiklus hingga temperatur air didalam tempat penampung air mengalami pemanasan optimal dari *stearic* yang menyimpan panas.
16. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam *Ms. Excel*.
17. Mengulangi langkah 9-11 dengan variasi kecepatan aliran yang telah ditentukan.
18. Membuat kesimpulan hasil penelitian
19. Selesai.

Pengambilan data ini dilakukan secara langsung dengan melakukan eksperimen pada alat penukar kalor. Sebelum air dialirkan ke alat uji, kita harus menentukan kecepatan aliran air dan variasi temperatur air yang akan digunakan untuk penelitian. Setelah air pada tempat penampung mencapai temperatur yang dikehendaki dan sudah konstan, kemudian air tersebut dialirkan ke dalam pipa bagian dalam (*tube*). Untuk mengetahui suhu pada *stearic acid* dan juga air digunakan *thermocouple*, serta untuk mengetahui kecepatan aliran air digunakan *flowmeter*, sehingga akan didapatkan data-data yang diperlukan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan diperoleh data dan juga pengolahan data yang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju aliran fluida sangat mempengaruhi karakteristik perpindahan panas antara air dan *stearic acid*. Pada proses pemanasan (*charging*), energi terbesar yang diserap air terjadi pada laju aliran 8 L/menit sebesar 808,02 kJ, sedangkan energi terbesar yang diserap *stearic* terjadi pada laju aliran 12 L/menit sebesar 648,01 kJ. Pada proses pendinginan (*discharging*), energi terbesar yang dilepaskan baik oleh air maupun *stearic* terjadi pada laju aliran 10 L/menit, masing-masing sebesar 723,19 kJ dan 733,61 kJ, sehingga laju aliran ini merupakan kondisi paling optimal untuk pelepasan energi panas *stearic*.
2. Berdasarkan hasil pengujian, waktu perubahan fasa *stearic acid* sangat dipengaruhi oleh laju aliran fluida. Debit 12 L/menit menghasilkan waktu pemanasan tercepat sebesar 240 detik, sedangkan pada proses pendinginan waktu tercepat sebesar 480 detik juga terjadi pada debit 12 L/menit. Namun, debit 10 L/menit merupakan kondisi paling seimbang pada proses pendinginan karena menghasilkan pelepasan energi terbesar dengan waktu pendinginan yang relatif cepat. Secara umum, proses pendinginan *stearic* berlangsung lebih lama dibandingkan pemanasan akibat pelepasan kalor laten yang terjadi secara bertahap pendinginan.

5.2 Saran

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

1. Disarankan untuk menambahkan titik pengukuran temperatur PCM untuk memperoleh gambaran distribusi panas yang merata, mengingat PCM sering mengalami gradien temperature internal.
2. Perbaiki isolasi kalor pada perangkat uji agar kehilangan panas di lingkungan dapat diminimalisir sehingga energi lebih akurat.
3. Menggunakan variasi laju alir lebih luas untuk mengidentifikasi titik optimal perpindahan panas lebih detail.
4. Menggunakan PCM campuran untuk membandingkan karakteristik perubahan fasa dan performa penyimpanan panas.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, A., Hassan, A., El-Sayed, M. A., & Abdelrahman, M. A. (2021). *Performance enhancement of solar thermal collectors using absorber surface modification and optical concentration techniques. Renewable Energy*, 172, 742–754.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.027>

Ahmed, M. S., Pandey, A. K., & Kothari, R. (2021). *Performance enhancement of solar thermal collectors using advanced absorber materials: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111065.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>

Alwan, N. T., Ali, A. H., & Ibrahim, O. M. (2022). *Assessment of the performance of solar water heater: An experimental and theoretical investigation. International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 528–539.

<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac021>

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (6th ed.)*. McGraw-Hill Education.

Chopra, K., Tyagi, V. V., Pathak, S. K., Khajuria, A., Pandey, A. K., Rahman, N. A., Mansor, M., & Sari, A. (2023). *Impact of stearic acid as heat storage material on energy efficiency and economic feasibility of a vacuum tube solar water heater. Energies*, 16(11), 4291.

<https://doi.org/10.3390/en16114291>

Dongyi, Z., Yimin, X., & Changying, Z. (2020). *Thermal performance of fatty acid based phase change materials for low-temperature thermal energy storage applications. Journal of Energy Storage*, 30, 101472.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101472>

Ferdyson, R., & Windarta, J. (2023). Analisis durasi dan intensitas radiasi matahari di Indonesia sebagai dasar pengembangan energi surya. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 4(2), 85–94.

Jaisankar, A., Anandan, S., & Sivaraman, B. (2024). *A review on solar water heating technology: Impacts of parameters and techno-economic studies. Bulletin of the National Research Centre*, 48, 45.

<https://doi.org/10.1186/s42269-024-01187-1>

Kannan, M. S. G., Vineesh Kumar, J., Saravanan, G., Prakash, M., & Palanivelrajan, A. R. (2021). *A review on active-passive solar water heating system using phase change material. International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 4(3), 90–92.

Khorshidi, J., & Heidari, M. (2016). *Effect of corrugation angle on heat transfer and pressure drop in a plate heat exchanger. Applied Thermal Engineering*, 103, 1248–1255.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.008>

Koua, B. K., Koffi, P. M. E., & Gbaha, P. (2020). *Comparative study of the thermal performance of two thermosiphon solar water heater systems. International Journal of Renewable Energy Development*, 9(3), 401–410.

<https://doi.org/10.14710/ijred.9.3.401-410>

Kusumah, I. H., Siregar, B. M., & Hutajulu, O. Y. (2020). Thermal characteristics of inorganic phase change materials for thermal energy storage applications. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 68(1), 1–10.

Li, C., Zhang, B., Xie, B., & Long, Y. (2019). *Stearic acid/expanded graphite as a composite phase change thermal energy storage material for tankless solar water heater*. *Sustainable Cities and Society*, 44, 457–465.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.041>

Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Rahman, S. M. A., & Hasan, M. H. (2019). *Phase change materials (PCMs) for thermal energy storage in solar energy applications: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109330.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109330>

Nejat, P., Akeiber, H., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Zaki, S. A., El Haj Assad, M., & Jomehzadeh, F. (2022). *Recent advances in phase change materials for thermal energy storage applications: A review*. *Journal of Energy Storage*, 55, 105731.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105731>

Prakash, J., Gupta, R., & Shukla, A. (2019). *Thermal performance evaluation of phase change material integrated solar water heating system*. *Solar Energy*, 188, 124–138.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.010>

Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M., & Saidur, R. (2022). *Performance analysis of solar water heating systems under variable climatic conditions: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112288.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112288>

Sidiq, M. F., & Waluyo, J. (2025). *Simulasi karakterisasi solar water heater sistem aktif dengan variasi bentuk pipa kapsul PCM*. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 7(1), 13–20.

<https://doi.org/10.22146/jmdt.98503>

Syaichurrozi, I., Budiman, A., & Rahmawati, F. (2014). Heat transfer characteristics of plate heat exchanger for liquid–liquid system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 422–429.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.034>

Tyagi, V. V., Chopra, K., Pandey, A. K., & Buddhi, D. (2023). *Recent advances in phase change materials for solar thermal energy storage applications*. *Journal of Energy Storage*, 62, 106867.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106867>

Xie, B., Li, C., Zhang, B., & Yang, L. (2020). *Evaluation of stearic acid/coconut shell charcoal composite phase change thermal energy storage materials for tankless solar water heater*. *Energy and Built Environment*, 1(2), 115–123.

<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2019.08.003>