

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES PERPINDAHAN KALOR PADA
SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER DENGAN POSISI HORIZONTAL
BERISI PCM PARAFIN UNTUK PROSES PELELEHAN**

(Skripsi)

Oleh

MUHAMMAD ALFITTO BAHRI



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

2024

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES PERPINDAHAN KALOR PADA
SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER DENGAN POSISI HORIZONTAL
BERISI PCM PARAFIN UNTUK PROSES PELELEHAN**

Oleh

MUHAMMAD ALFITTO BAHRI

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**

2024

ABSTRAK

KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES PERPINDAHAN KALOR PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL BERISI PCM PARAFIN UNTUK PROSES PELELEHAN

Oleh:

Muhammad Alfitto Bahri

Energi matahari merupakan sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pemanas air dengan mengubahnya menjadi energi termal. Salah satu media penyimpanan energi termal adalah *phase change material* (PCM) yang memiliki kelebihan yaitu perubahan temperatur saat perubahan fasa sangat kecil dalam waktu yang lebih lama sehingga laju perpindahan panas tidak mengalami penurunan yang signifikan, maka lilin parafin cocok untuk menyimpan energi panas. Energi kalor ini diserap dan dilepaskan menggunakan alat penukar kalor berjenis *Shell and Tube Heat Exchanger*. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan temperatur fluida air panas 60°C, 70°C, dan 80°C dan juga debit aliran airnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas dan waktu yang dibutuhkan parafin sehingga mengalami perubahan fasa. Parameter yang diukur adalah temperatur masuk dan keluar alat penukar kalor, temperatur parafin, dan waktu pelelehan parafin. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa semakin besar variasi temperatur air dan debit aliran, maka laju perpindahan panas juga semakin besar yang memungkinkan parafin mencapai suhu pelelehan lebih cepat. Waktu pelelehan parafin dari suhu awal 32 °C hingga 57°C tercatat proses pelelehan tercepat pada variasi 80°C dengan debit aliran 6 l/min, dalam waktu 12 menit 20 detik. Dengan demikian, alat ini terbukti mampu mencapai perubahan suhu dengan efektif, tergantung pada variasi debit aliran dan temperatur air yang digunakan.

Kata Kunci: Energi matahari, PCM, Parafin, Perpindahan panas

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESS IN SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER WITH HORIZONTAL POSITION CONTAINING PARAFFIN PCM FOR MELTING PROCESS

By:

Muhammad Alfitto Bahri

Solar energy is a renewable energy source that can be utilized as a source of water heating by converting it into thermal energy. One of the thermal energy storage media is phase change material (PCM) which has the advantage that the temperature change during phase change is very small in a longer time so that the heat transfer rate does not decrease significantly, so paraffin wax is suitable for storing heat energy. This heat energy is absorbed and released using a Shell and Tube Heat Exchanger. This research was conducted by varying the hot water fluid temperatures of 60°C, 70°C, and 80°C and also the water flow rate. This study aims to determine the heat transfer characteristics and the time required for paraffin to undergo phase changes. The parameters measured were the inlet and outlet temperatures of the heat exchanger, paraffin temperature, and paraffin melting time. The results showed that the greater the variation in water temperature and flow rate, the greater the heat transfer rate which allows the paraffin to reach the melting temperature faster. Paraffin melting time from an initial temperature of 32°C to 57°C recorded the fastest melting process in the 80°C variation with a flow rate of 6 l/min, in 12 minutes and 20 seconds. Thus, this device is proven to be able to achieve temperature changes effectively, depending on the variation of flow rate and water temperature used.

Keywords: Solar energy, PCM, Paraffin, Heat transfer

Judul Skripsi

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES
PERPINDAHAN KALOR PADA SHELL
AND TUBE HEAT EXCHANGER DENGAN
POSISI HORIZONTAL BERISI PCM
PARAFIN UNTUK PROSES PELELEHAN**

Mahasiswa

Muhammad Alfitto Bahri

Nomor Pokok Mahasiswa

2015021088

Fakultas

Teknik

MENYUTUJUI

Komisi Pembimbing

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

NIP. 197112142000121001

M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng.

NIP. 198010012008121001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan

Teknik Mesin

Ketua Program Studi

S1 Teknik Mesin

Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197108171998021003

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

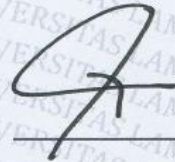
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



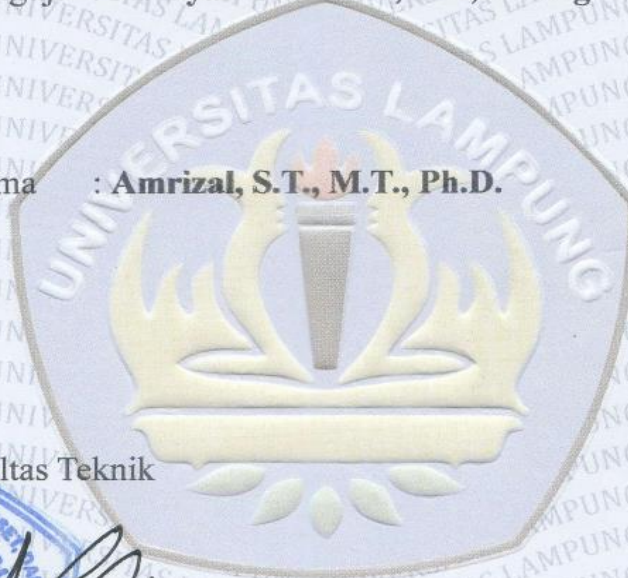
Anggota Penguji

: **M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng.**



Penguji Utama

: **Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509282001121002



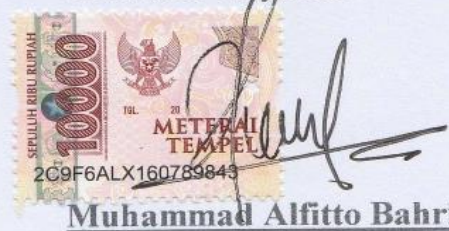
Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **20 Mei 2024**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul “KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES PERPINDAHAN KALOR PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL BERISI PCM PARAFIN UNTUK PROSES PELELEHAN” merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 25 Mei 2024

Pembuat Pernyataan



Muhammad Alfitto Bahri

NPM. 2015021088

MOTO

“Sukses itu bukan hanya berhasil meraih yang kita rencanakan, sukses juga adalah berhasil bangkit ketika jatuh, itulah sukses”

(Anies Baswedan)

“Kau boleh menangis tapi kembali berdiri, Kau boleh terluka tapi hanya sementara, Jangan kau terlalu lama tenggelam”

(Nabila Taqiyyah, Hanya Lolongan)

“Semua manusia di muka bumi ini bingung, nanti tidak bingung kalau sudah di surga”

(Aldi Taher)

“My life was black & white before I met Sonya, she was the color”

(Otto, A Man Called Otto)

SANWACANA

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 Khairul Bahri dan Ibu Betriyani yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. 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 dekan 1 fakultas teknik Universitas Lampung dan juga sebagai Dosen Pembimbing utama yang telah membimbing serta memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir di perkuliahan.
6. M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. 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 Rahmavinda dan Vinza, serta Apuk Halida terima kasih banyak sudah hadir menjadi keluarga yang baik dan pengertian.
10. Keluarga besar grup TA lurr yang terdiri dari Bayu, Tunut, dan Agung 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 Bg Edo (hibah resin), Bg Rizky (pudding metro), Bg Yokew (tiba tiba suplai cepek), Hakeem (starboy), Sahrul (plp), Ari (dj lampung), Topan (belum kkn), Bagong (makelar hp), Rupik (kosan nyaring), fillah (tukang papan), dan juliys (s.kp IP 15) 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 2020 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 28 September 2020 menjalin kekeluargaan.
13. Teruntuk pemilik NIM E2401211050 yang sudah membantu dalam pengerjaan skripsi ini walaupun hanya dalam bentuk keluh kesah, cerita dan bantuan logistik kepada penulis, namun tidak bisa dipungkiri bahwa pemilik NIM E2401211050 telah menyemangati dengan cara lewat belakang layar yang tak kasat mata oleh penulis. Sekali lagi terima kasih banyak. Semoga skripsinya dilancarkan sampai wisuda nanti.

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

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Padang, pada tanggal 08 Agustus 2002 sebagai anak kedua, dari pasangan Bapak Khairul Bahri dan Ibu Betriyani. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD NEGERI 01 SAWAHAN hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 30 PADANG yang diselesaikan tahun 2017 dan SMA NEGERI 9 PADANG yang diselesaikan tahun 2020, hingga pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Selain aktif dalam HIMATEM, penulis pernah menjadi bagian panitia kegiatan yang ada di Jurusan Teknik Mesin, Kemudian juga mengikuti Organisasi Koperasi Konsumen Mahasiswa Universitas Lampung (Kopma Unila) dari tahun 2022 dan Organisasi diluar kampus seperti Ikatan Mahasiswa Minang (IMAMI). Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di PT Geo Dipa Energi (Persero) Unit Patuha Tahun 2023 dengan judul laporan **“ANALISIS EFISIENSI KINERJA *STEAM TURBINE* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI DI PT. GEO DIPa ENERGI (PERSERO) UNIT PATUHA”**.

Tahun 2023 penulis melakukan penelitian dengan judul **“KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES PERPINDAHAN KALOR PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL BERISI PCM PARAFIN UNTUK PROSES PELELEHAN”** dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan M. Dyan Susila ES, S.T., M.Eng.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	7
1.1 Latar Belakang	7
1.2 Tujuan Penelitian.....	9
1.3 Batasan Masalah.....	9
1.4 Sistematika Penulisan.....	9
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Perpindahan Panas.....	11
2.1.1 Perpindahan Panas secara Konduksi.....	12
2.1.2 Perpindahan Panas secara Konveksi	13
2.1.3 Perpindahan Panas secara Radiasi	14
2.2 Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchangers</i>).....	15
2.2.1 Aliran Searah.....	15
2.2.2 Berlawanan Arah.....	16
2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor	17
2.4 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	20
2.4.1 Panas Yang Diserap.....	20
2.4.2 Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritmik (<i>Logaritmik Mean Temperature Diference</i>).....	21

2.4.3	Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh	21
2.4.4	Efisiensi Termal	22
2.5	Material Berubah Fasa.....	23
2.6	Klasifikasi PCM	24
2.6.1	PCM Organik	25
2.6.2	PCM Anorganik	25
2.6.3	PCM Eutektik.....	25
2.7	Parafin	26
2.8	Sifat Sifat Parafin	29
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1	Tempat Pelaksanaan	31
3.2	Waktu Pelaksanaan	31
3.3	Alat dan Bahan	32
3.4	Diagram Alir.....	40
3.5	Skema Pengujian	41
3.6	Penempatan titik pengukuran	42
3.7	Metode Pengambilan Data	43
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1	Hasil Pengambilan Data	46
4.1.1	Temperatur Air Masuk dan Keluar Alat Penukar Kalor.....	46
4.1.2	Temperatur Parafin.....	47
4.1.3	Waktu Untuk Mencapai Titik Leleh.....	49
4.2	Hasil Perhitungan	51
4.2.1	Laju Perpindahan Panas Air	51
4.2.2	Bilangan Reynolds	54
4.2.3	Perhitungan Energi.....	56

BAB 5 PENUTUP.....	64
5.1 Kesimpulan.....	64
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA.....	66
LAMPIRAN.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perpindahan Panas Konduksi	12
Gambar 2. 2 Perpindahan panas konveksi	14
Gambar 2. 3 Profil Temperatur Aliran <i>Co-Current</i>	16
Gambar 2. 4 Profil temperatur aliran <i>counter-current</i>	16
Gambar 2. 5 Aliran <i>double pipe heat exchanger</i>	17
Gambar 2. 6 <i>Plate-Frame Heat Exchanger</i>	18
Gambar 2. 7 <i>Spiral plate heat exchanger</i>	19
Gambar 2. 8 <i>Shell and tube heat exchanger</i>	19
Gambar 2. 9 Klasifikasi PCM	24
Gambar 2. 10 (a) Parafin padat (b) Parafin cair	27
Gambar 3. 1 Pemanas Air Listrik.....	33
Gambar 3. 2 <i>Data Logger</i> dan <i>Thermocouple</i>	33
Gambar 3. 3 Pompa Air.....	34
Gambar 3. 4 <i>Water flow meter</i>	35
Gambar 3. 5 Kontroler suhu dan SSR.....	36
Gambar 3. 6 Selang pipa air panas.....	37
Gambar 3. 7 Katup air.....	37
Gambar 3. 8 Alat penukar panas <i>shell and tube</i>	38
Gambar 3. 9 Diagram alir penelitian.....	40
Gambar 3. 10 Instalasi alat pengujian	41
Gambar 3. 11 Penempatan titik pengukuran	42
Gambar 4. 1 Grafik Selisih Nilai Rata-rata ΔT air.....	46
Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-rata Parafin Variasi Temperatur Air 60°C	47
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-rata Parafin Variasi Temperatur Air 70°C	48

Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-rata Parafin Variasi Temperatur Air 80°C	48
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Waktu Parafin Mencapai 57 °C.....	49
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Panas Air.....	52
Gambar 4. 7 Perbandingan Energi Air dan Parafin Pada Temperatur 60°C	60
Gambar 4. 8 Perbandingan Energi Air dan Parafin Pada Temperatur 70°C	60
Gambar 4. 9 Perbandingan Energi Air dan Parafin Pada Temperatur 80°C	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Jenis-jenis material PCM <i>eutectic</i>	26
Tabel 3. 1 Spesifikasi Data Logger	33
Tabel 3. 2 Spesifikasi <i>Thermocouple</i>	34
Tabel 3. 3 Spesifikasi Pompa Air	34
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>water flow meter</i>	35
Tabel 3. 5 Spesifikasi kontroler dan SSR.....	36
Tabel 3. 6 Ukuran Alat penukar panas	38
Tabel 4. 1 Data Laju Perpindahan Panas.....	52
Tabel 4. 2 Perhitungan Bilangan Reynolds Temperatur Air 60°C	54
Tabel 4. 3 Perhitungan Bilangan Reynolds Temperatur Air 70°C	55
Tabel 4. 4 Perhitungan Bilangan Reynolds Temperatur Air 80°C	55
Tabel 4. 5 Energi Yang Dilepas Air	56
Tabel 4. 6 Energi Yang Diserap Parafin	59
Tabel 4. 7 Energi yang Dilepaskan Air	62

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Potensi energi matahari di Indonesia dapat diukur dengan memperhitungkan potensi radiasi matahari yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik setiap daerah di Indonesia. Indonesia memiliki wilayah yang sangat luas dan terbagi ke dalam tiga zona waktu dan pastinya berpengaruh pada penyinaran matahari di setiap daerah (Hutajulu dkk., 2021). Energi matahari merupakan salah satu potensi sumber energi terbarukan yang tidak akan habis ataupun kekal yang dapat dimanfaatkan terutama di daerah tropis.

Energi surya adalah bentuk energi terbarukan yang bersih, berlimpah dan mudah diperoleh. Perilaku radiasi matahari yang terputus-putus dan dinamis membuat sistem penyimpanan energi panas sangat berharga untuk banyak aplikasi seperti pendinginan mesin, bangunan, dan juga pemanas (Hamed dkk., 2017). Di wilayah tropis seperti Indonesia, memperoleh energi surya adalah hal yang sangat mudah karena sinar matahari tersedia setiap hari. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), tingkat pencahayaan matahari mencapai 40-65% dalam setahun. Untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari sebagai sumber pemanas air, diperlukan perangkat bernama kolektor surya yang berfungsi mengumpulkan panas dari sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi termal. Jadi, sangat penting untuk menyediakan sistem penyimpanan untuk mengatasi masalah ini. Sistem penyimpanan harus dirancang untuk menutupi energi yang dibutuhkan untuk beban termal malam hari (Shalaby dkk., 2020).

Meskipun Indonesia memiliki potensi besar dalam hal energi matahari, sayangnya pemanfaatannya belum optimal. Sebagian besar daerah di Indonesia masih mengandalkan sumber energi konvensional seperti minyak bumi dan batu bara. Oleh karena itu adanya langkah inovatif dalam mendukung keberlanjutan energi yaitu dengan adanya pemanfaatan potensi energi matahari dengan media penyimpanan energi termal.

Salah satu media penyimpanan energi termal adalah *phase change material* (PCM). Salah satu *phase change material* yang dapat digunakan yaitu parafin. Lilin parafin memiliki stabilitas termal yang baik, panas laten yang tinggi yaitu 206 kJ/kg, dengan temperatur leleh 50-60°C dan konduktivitas termal 0,2 W/mK sebagai penyimpan energi termal. Temperatur perubahan fasa lilin parafin ini sangat cocok untuk menyimpan energi panas dari air panas yang dihasilkan oleh kolektor surya maupun pemanas air. PCM memiliki kelebihan yaitu perubahan temperatur saat perubahan fasa sangat kecil dalam waktu yang lebih lama sehingga laju perpindahan panas tidak mengalami penurunan yang signifikan. Dengan perbedaan temperatur antara air panas dan PCM cukup besar, maka lilin parafin sangat cocok untuk menyimpan energi panas. Hal lain yang mendukung lilin parafin ini untuk diaplikasikan dikarenakan harganya yang murah dan banyak tersedia di pasaran (Andriyanto dkk., 2022).

Pengoptimalan energi matahari untuk kondisi air panas yang mana sudah mencapai temperatur yang diinginkan, namun masih memungkinkan untuk dapat digunakan lebih lanjut dengan bantuan media penyimpanan energi termal *phase change material* (PCM) yaitu parafin. Hal inilah yang melatar belakangi kegiatan penelitian ini yang berjudul Kajian Eksperimental Proses Perpindahan Kalor Pada *Shell and Tube Heat Exchanger* Dengan Posisi Horizontal Berisi Pcm Parafin Dalam Proses Pelelehan. Dalam penelitian ini digunakan PCM jenis parafin sebagai penyimpan energi termal dimana memiliki sifat-sifat yang baik dan sangat memungkinkan jika dikembangkan lebih lanjut. Pada penelitian ini juga dilakukan pemasangan sirip melintang pada pipa bagian dalam *Shell and Tube* untuk mengetahui pengaruh perpindahan kalornya.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik perpindahan panas dari fluida air panas ke parafin pada jenis alat penukar kalor *shell and tube*.
2. Mengetahui waktu yang dibutuhkan dalam proses perpindahan panas ke parafin 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. Alat penukar kalor yang digunakan berjenis *shell and tube* berdiameter 4 inch (110 mm), panjang *shell* 520 mm dan panjang *tube* 530 mm.
2. Jenis material pipa luar (*shell*) alat penukar panas yang digunakan adalah pipa akrilik dengan ukuran 4 inch dan ketebalan 5 mm.
3. Jenis material pipa dalam (*tube*) alat penukar panas yang digunakan adalah pipa tembaga berdiameter 3/8 inch (9,5 mm) sebanyak 15 buah.
4. Jenis PCM yang diuji adalah parafin padat atau lilin parafin.
5. Variasi kecepatan aliran air yang digunakan sebesar 2 l/min, 4 l/min, dan 6 l/min.
6. Variasi temperatur air masuk sebesar 60 °C, 70 °C, dan 80 °C.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. PENDAHULUAN

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

2. TINJAUAN PUSTAKA

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

3. METODOLOGI PENELITIAN

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

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

5. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

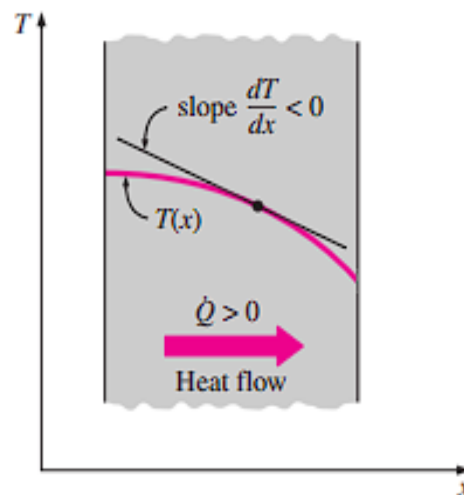
2.1 Perpindahan Panas

Panas adalah salah satu bentuk energi yang dapat dialihkan dari satu lokasi ke lokasi lain, namun tidak dapat diciptakan atau dihilangkan sepenuhnya. Dalam suatu proses, panas dapat menyebabkan peningkatan suhu suatu materi, perubahan tekanan, reaksi kimia, dan arus listrik. Perpindahan panas merupakan energi yang berpindah dikarenakan adanya perbedaan suhu. Perpindahan panas atau *heat transfer* ini merupakan ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur diantara benda atau material. Energi yang berpindah ini dinamakan kalor atau panas (*heat*). Perpindahan kalor ini tidak hanya menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu (Atmadja, 2006).

Fenomena perpindahan panas berperan penting dalam beberapa persoalan industri dan lingkungan. Sebagaimana tempat penting pada produksi dan konversi energi. Tidak hanya satu penggunaan dalam tempat ini yang tidak melibatkan efek perpindahan panas dalam berbagai proses. Di dalam pembangkit tenaga listrik, baik menggunakan bahan bakar nuklir, minyak, magneto hidrodinamik atau menggunakan sumber bumi ada begitu banyak persoalan perpindahan panas yang harus dipecahkan. Adapun persoalan dalam perpindahan panas itu melalui proses konduksi, konveksi dan radiasi (Walujodjati, 2006).

2.1.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Perpindahan panas melalui konduksi merupakan proses di mana energi panas mengalir dari suatu daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah melalui suatu medium yang bersinggungan. Hal ini terjadi melalui interaksi langsung antara molekul-molekul tanpa memerlukan perpindahan molekul yang signifikan. Meskipun gerak molekul dalam gas pada konduksi lebih cepat dibandingkan cairan, namun jarak antar molekul dalam fase cairan lebih dekat dibandingkan dengan gas. Sehingga, terjadi pertukaran energi panas antara molekul-molekul dalam medium tersebut (Buchori, 2004). Contoh perpindahan panas konduksi yang terjadi pada permukaan dinding yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Perpindahan panas konduksi

(Cengel, 2003)

Konduksi adalah satu-satunya cara di mana panas dapat berpindah dalam materi padat yang tidak dapat dilalui oleh cahaya. Selain itu, konduksi juga memegang peranan penting dalam fluida, di mana dalam medium yang tidak padat biasanya berinteraksi dengan konveksi, dan dalam beberapa kasus juga berhubungan dengan radiasi. Persamaan dasar untuk konduksi satu dimensi dalam keadaan studi dapat ditulis:

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

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

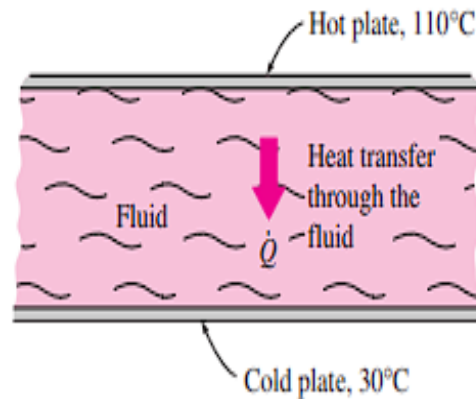
Konduksi melalui *shell* bentuk silinder (pipa) dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

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

Dimana: A_r : Luas permukaan silinder (cm^2)
 r : Jari-jari silinder (cm)
 L : Panjang silinder (cm)

2.1.2 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 2.2. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar perpindahan panas konveksi. Dengan tidak adanya gerakan fluida massal, perpindahan panas antara permukaan padat dan fluida yang berdekatan adalah dengan konduksi murni (Cengel, 2003).



Gambar 2. 2 Perpindahan panas konveksi

(Cengel, 2020)

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

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

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

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

A_s : Luas penampang (m^2)

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

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

2.1.3 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 termal merupakan energi yang dipancarkan oleh materi yang berada pada temperatur nol, dan faktanya perpindahan panas radiasi terjadi dengan sangat efisien dalam ruang hampa (Incropera, 2011).

Panas radiasi dipancarkan oleh suatu benda dalam bentuk kumpulan (batch) energi yang terbatas atau quanta. Contoh perpindahan panas radiasi terjadi pada panas matahari yang sampai permukaan bumi. Dengan rumus perpindahan panas secara radiasi adalah sebagai berikut:

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

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

e : Emisivitas

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

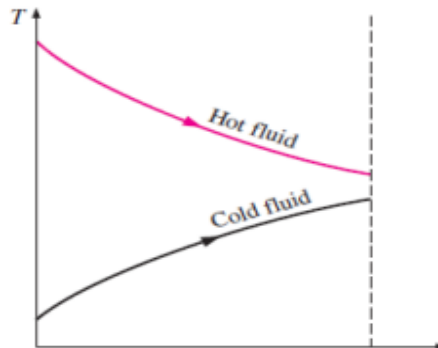
2.2 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchangers*)

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, 2003).

2.2.1 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 2.3 merupakan profil temperatur aliran *Co-current*.

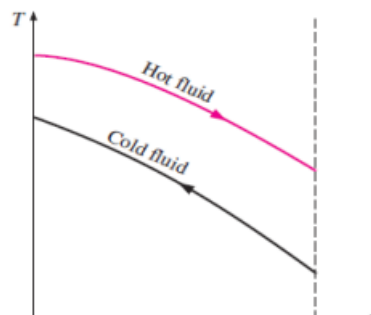


Gambar 2. 3 Profil temperatur aliran *Co-Current*

(Cengel, 2003)

2.2.2 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 2.4 merupakan bentuk grafik dari aliran yang berlawanan arah.



Gambar 2. 4 Profil temperatur aliran *counter-current*

(Cengel, 2003)

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.

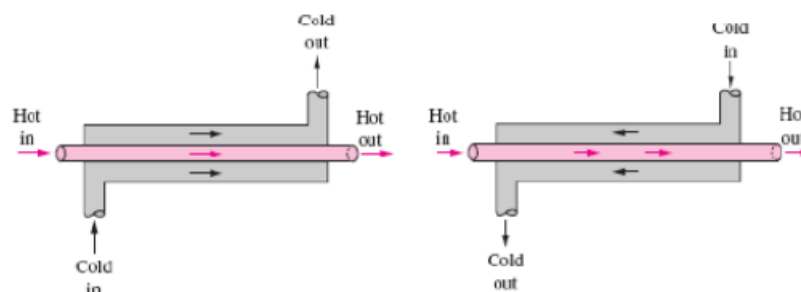
Di sisi lain, penukar panas yang bersifat tidak langsung adalah ketika fluida panas tidak memiliki kontak langsung dengan fluida dingin. Dalam hal ini, proses perpindahan panas menggunakan suatu media perantara seperti pipa, plat, atau jenis peralatan lainnya.

2.3 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 2.5.

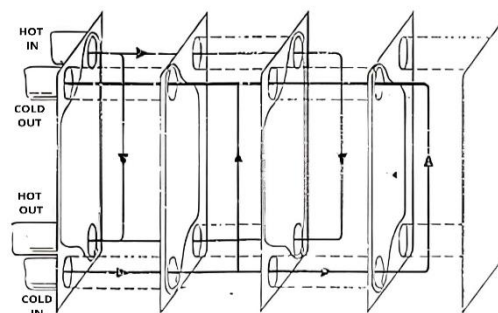


Gambar 2. 5 Aliran *double pipe heat exchanger*

(Cengel, 2003)

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. 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 dkk., 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 2.6 merupakan bentuk dari *heat exchanger tipe plate and frame*.

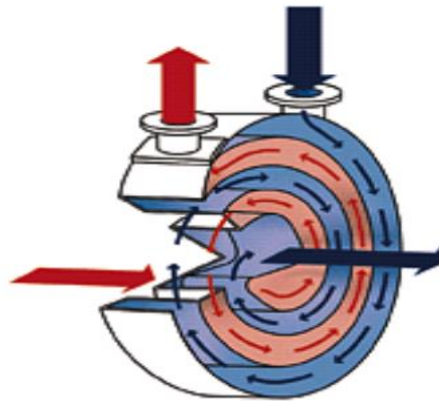


Gambar 2. 6 *Plate-frame heat exchanger*

(Syaichurrozi dkk., 2014)

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.

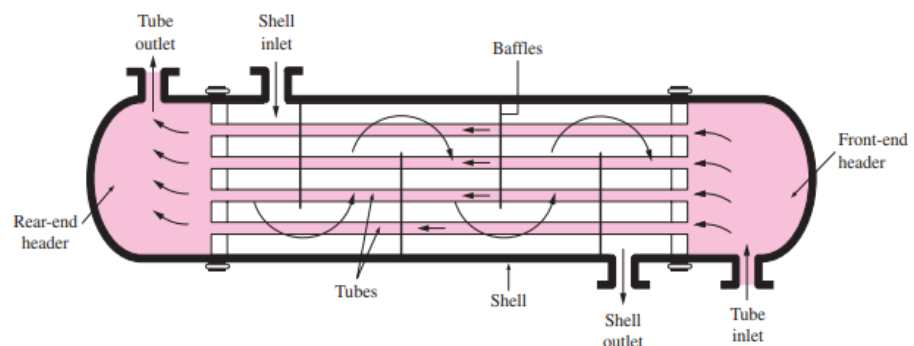


Gambar 2. 7 *Spiral plate heat exchanger*

(Khorshidi & Heidari, 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*). Pada jenis alat pertukaran panas ini, 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 2.8.



Gambar 2. 8 *Shell and tube heat exchanger*

(Cengel, 2003)

2.4 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.4.1 Panas Yang Diserap

Kenyataannya pada penelitian ini yang menjadi sasaran analisis ialah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika (Holman, 1995). 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).

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

Dimana:

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

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 parafin. Persamaannya yaitu sebagai berikut:

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

Dimana:

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

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

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

Dimana:

ρ : Massa jenis (kg/m^3)

m : Massa benda (kg)

v : Volume benda (m^3)

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

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = \dot{m}_H \cdot c_{pH} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_C \cdot c_{pC} \cdot \Delta T_C \quad (2.8)$$

2.4.2 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.

$$\text{LMTD} = \frac{(T_{H2} - T_{C2}) - (T_{H1} - T_{C1})}{\ln \left(\frac{T_{H2} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}} \right)} \quad (2.9)$$

Dimana:

LMTD : *Logaritmik Mean Temperature Difference* (K)

2.4.3 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.

$$U = \frac{Q_e}{A \times LMTD} \quad (2.10)$$

Dimana:

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

2.4.4 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:

$$\eta_H = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100 \quad (2.11)$$

Dimana:

η_H : Efisiensi termal aliran panas

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

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

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:

$$\eta_c = \frac{T_{C1} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100 \quad (2.12)$$

Dimana:

η_c : Efisiensi termal aliran dingin

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

$$\eta = \frac{\eta_H + \eta_c}{2} \quad (2.13)$$

η : Efisiensi termal menyeluruh

2.5 Material Berubah Fasa

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 (Meng & Hu, 2008). 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 dkk., 2020).

PCM merupakan satu cara penyimpanan energi panas yang paling efisien. PCM dapat digunakan untuk penyimpanan energi dan kontrol suhu. PCM menjadi menarik karena mempunyai kelebihan yaitu perbandingan yang cukup tinggi antara panas yang dilepaskan dengan variasi suhu. PCM dapat melepaskan panas lebih 4-5 kali setiap satuan volume dibandingkan bahan penyimpan energi konvensional seperti air atau batu (A. Sharma dkk., 2009). Kelebihan PCM lainnya meliputi harga terjangkau, ketersediaan yang mudah, dan dapat digunakan berkelanjutan selama strukturnya tidak berubah. PCM menggunakan panas laten pada perubahan fasa untuk menyerap dan melepaskan panas. Energi yang diserap pada perubahan fasa jauh lebih besar dibandingkan dengan panas sensibel.

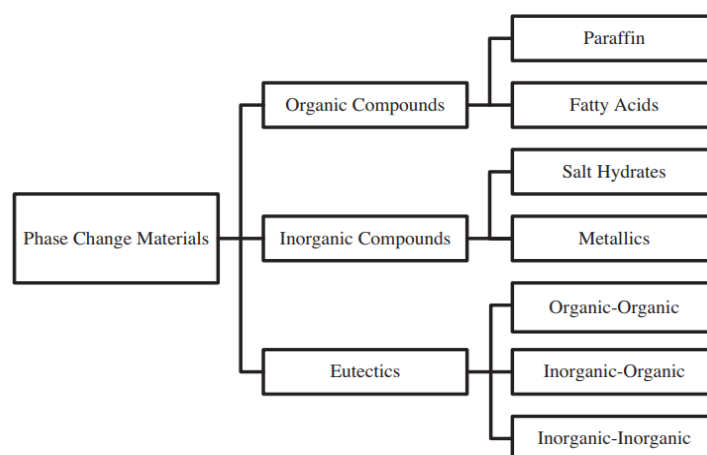
PCM memiliki sifat fisik yaitu keseimbangan fasa, dimana stabilitas fase selama peleburan dan pembekuan akan menguntungkan dalam pengaturan temperatur penyimpan kalor. Kemudian massa jenis material yang tinggi, yang mana akan memperkecil ukuran dari bejana penampung. Serta

perubahan volume yang kecil, dan tekanan penguapan yang rendah akan mengurangi masalah dalam penampungan. PCM juga memiliki sifat kimia yaitu tidak beracun dan tidak menimbulkan kebakaran.

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 (Hasenöhrl, 2009). 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 (Bouadila dkk., 2014).

2.6 Klasifikasi PCM

Berdasarkan kondisi perubahan fasanya, PCM dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu padat-cair, cair-gas dan padat-gas. Di antara jenis ini, PCM padat-cair adalah PCM yang paling umum digunakan untuk penyimpanan energi panas. Secara umum, PCM padat-cair dibagi menjadi tiga bagian, yaitu PCM komposisi organik, PCM komposisi anorganik dan eutektik (Zhou dkk., 2012). Adapun klasifikasi PCM organik, senyawa inorganik dan eutectic dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Klasifikasi PCM

(Zhou dkk., 2012)

2.6.1 PCM Organik

PCMs organik dapat berupa alifatik atau organik lain. Umumnya PCMs 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 parafin dan non parafin. Bahan organik termasuk bahan yang dapat melebur dan membeku berulang kali tanpa adanya pengurangan volume dan biasanya tidak korosif. Lilin parafin terdiri dari campuran dengan rumus kimia $\text{CH}_3-14 (\text{CH}_2)-\text{CH}_3$. Parafin memenuhi syarat sebagai panas bahan penyimpanan fusi karena ketersediaan mereka dalam berbagai suhu yang besar.

Non-organik parafin adalah yang paling banyak dari bahan fase perubahan dengan sifat yang sangat bervariasi. Masing-masing bahan akan memiliki sifat sendiri tidak seperti parafin, 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 dkk., 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 Eutektik

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.

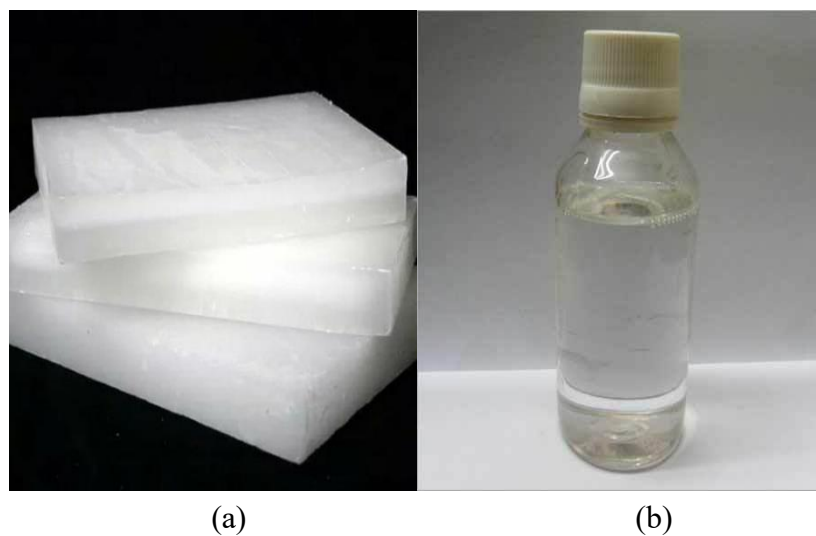
Tabel 2. 1 Jenis-jenis material PCM *eutectic*

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 Parafin

Parafin merupakan komponen dari kelompok hidrokarbon alkana dengan formula C_nH_{2n+2} . Alkana, yang juga dikenal sebagai parafin, adalah jenis senyawa hidrokarbon yang cenderung tidak reaktif terhadap senyawa lain. Parafin memiliki berbagai kegunaan yang meliputi bidang pertanian, makanan, kosmetik, farmasi, hingga keperluan rumah tangga, tergantung pada jenis hidrokarbon dalam kelompok alkana. Penggunaan parafin meliputi peran sebagai pelarut, bahan bakar, bahan dasar untuk sintesis senyawa kimia, bahan pembuat plastik, medium penyimpanan panas, dan banyak lagi.

Parafin berasal dari proses destilasi minyak bumi di mana hasil destilasinya masih mengandung sejumlah besar hidrokarbon. Parafin memiliki variasi dalam kandungan atom karbonnya, semakin tinggi kandungannya, maka rantai karbonnya akan semakin panjang, mengakibatkan fasa parafin menjadi lebih padat. Parafin dengan kandungan atom karbon antara C5 hingga C15 terutama berbentuk cair, sementara parafin dengan kandungan atom karbon di atas C15 adalah parafin padat, yang sering disebut sebagai parafin wax, seperti yang terlihat pada Gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2. 10 (a) Parafin padat (b) Parafin cair

Parafin padat biasanya memiliki titik leleh berkisar antara 42 °C hingga 62°C dan memiliki panas laten yang tinggi, sehingga seringkali dimanfaatkan sebagai penyimpan energi termal. Hal ini dikarenakan kemampuannya yang mudah dalam menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi termal. Parafin dengan kandungan atom C5-C15 merupakan parafin dengan fasa cair, sedangkan parafin dengan kandungan atom karbon lebih dari C15 merupakan parafin dengan fasa padat atau yang biasa disebut parafin *wax*. Karakteristik parafin cair adalah minyak kental tembus cahaya, tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, tidak larut dalam air dan etanol, tetapi mudah larut dalam minyak menguap dan sukar larut dalam etanol absolut

Parafin cukup banyak digunakan sebagai media untuk penyimpan energi termal. Hal ini dikarenakan parafin memiliki banyak keunggulan

dibandingkan material perubah fasa yang lainnya. Panas atau energi yang disimpan oleh parafin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E_{par} = \dot{m}_{par\ total} \times c_p(solid) \times (T_m - T_i) + \dot{m}_{par(liquid)} \times L + \dot{m}(liquid) \cdot c_p(liquid) \cdot (T_f - T_m) \quad (2.14)$$

Dimana:

- E_{par} : Energi parafin (Joule)
- T_m : Temperatur tengah parafin (°C)
- T_i : Temperatur awal (°C)
- T_f : Temperatur akhir parafin (°C)
- L : Kalor peleburan (kJ/kg)

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

1. Kelebihan

Kelebihan parafin sebagai penyimpan energi termal yaitu tidak menunjukkan adanya perubahan thermal properties setelah digunakan terus menerus, memiliki panas laten yang tinggi, cenderung tidak mengalami proses *supercooling*, non-reaktif, tidak berbau, secara ekologi tidak berbahaya, tidak beracun, cocok disimpan di dalam kontainer logam, serta cocok diaplikasikan sebagai penyimpan energi termal dengan berbagai tipe (Sarier & Onder, 2012).

2. Kekurangan

Kekurangan parafin sebagai penyimpan energi termal yaitu memiliki konduktivitas termal yang rendah pada saat fasa padat sehingga menjadi masalah jika digunakan sebagai penyimpan energi termal, akan tetapi masalah ini dapat diatasi dengan penambahan fin pada permukaan

perpindahan kalor atau dengan menambahkan material logam pada parafin untuk meningkatkan konduktivitas termal. Selain itu parafin mempunyai sifat yang mudah terbakar sehingga perancangan kontainer sebagai penyimpan parafin harus lebih diperhatikan (S. D. Sharma & Sagara, 2005).

2.8 Sifat Sifat Parafin

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

1. Massa jenis

Parafin memiliki masa jenis padat $876.62 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ dan masa jenis cair $760 \text{ (kg/m}^3\text{)}$. Parafin dapat mengalami peningkatan masa jenis ketika pada temperatur rendah. Peningkatan masa jenis ini disebabkan karena parafin mengalami penyusutan atau peningkatan kerapatan masa sehingga volume parafin menjadi berkurang. Namun sebaliknya, parafin juga dapat mengalami penurunan masa jenis ketika pada temperatur tinggi. Hal ini disebabkan karena parafin memuai pada temperatur tinggi sehingga volume parafin menjadi meningkat (Seter & Luouye, 1935).

Maka dari itu, perlu dilakukan pengawasan khusus terhadap penggunaan parafin sebagai penyimpan energi termal, terutama mengenai perubahan volume saat mengalami ekspansi. Volume yang digunakan untuk menampung parafin harus diperbesar, sehingga saat parafin mengalami peningkatan suhu, proses ekspansi sekitar 20 persen dapat diprediksi dengan mempertimbangkan volume yang telah disiapkan, dan menghindari kemungkinan kebocoran.

2. Panas Spesifik

Panas spesifik Parafin pada fasa padat yaitu 2 kJ/kg K sedangkan pada fasa cair parafin memiliki panas spesifik sebesar 2 kJ/kg K (*Data Sheet RT50*, 2020). Parafin jika digunakan sebagai penyimpanan energi termal

maka jumlah panas yang dapat diserap cukup besar sesuai dengan jumlah massa parafin yang digunakan. Namun waktu yang diperlukan untuk melepaskan panas menjadi lebih lama. Hal tersebut dikarenakan panas spesifik pada saat fasa cair lebih besar dari pada saat fasa padat (Fischer, 2006).

3. Konduktifitas Termal

Konduktifitas termal parafin sangat rendah yaitu sebesar 0.232 W/m.K. Sehingga laju perpindahan panas pada saat penyerapan maupun pelepasan panas menjadi sangat lambat. Namun, meskipun konduktivitas termal parafin lebih rendah, keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya sebagai penyimpan energi termal. Parafin dapat menyerap dan menyimpan panas dalam jumlah besar, sehingga sangat efektif dalam aplikasi penyimpanan energi termal seperti pemanasan atau pendinginan bertahap.

4. Panas Laten

Parafin adalah PCM dengan panas laten yang signifikan. Panas laten pada parafin bervariasi tergantung pada jumlah ikatan karbonnya. Tingginya panas laten pada parafin merupakan keunggulan sebagai penyimpan energi termal karena material dengan panas laten tinggi mampu menyerap dan menyimpan panas lebih banyak tanpa mengalami kenaikan suhu. Beberapa nilai panas laten parafin dapat diidentifikasi berdasarkan jumlah ikatan karbon yang berbeda.

5. Temperatur Leleh

Temperatur leleh parafin bervariasi tergantung pada jumlah ikatan atom karbonnya. Semakin tinggi kandungan atom karbon, maka temperatur lelehnya akan semakin tinggi. Sebaliknya, jika kandungan atom karbon rendah, temperatur lelehnya juga lebih rendah. Ini disebabkan oleh jumlah ikatan atom karbon yang lebih banyak, menghasilkan rantai karbon yang lebih panjang dan membentuk molekul yang lebih lurus dan teratur. Akibatnya, interaksi antara molekul menjadi lebih luas dan gaya tarik antar molekul menjadi lebih kuat.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian yang mengkaji karakteristik perpindahan kalor pada material berubah fasa berupa parafin di dalam alat penukar kalor sebagai media untuk menyimpan serta memberikan kalor. Bahan baku PCM yang digunakan pada penelitian ini yaitu parafin. Hal ini disebabkan karena parafin 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 *shell and tube heat exchanger* 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 November 2023 sampai dengan bulan Maret 2023. 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, parafin dan karakteristiknya.

2. Persiapan Alat

Pengujian Mempersiapkan alat pengujian dan bahan yang dibutuhkan seperti alat penukar panas, penyimpanan air, parafin, 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 *shell and tube* 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 3.1 berikut:



Gambar 3. 1 Pemanas air

b. *Data Logger* dan *Thermocouple*

Data Logger serta *Thermocouple* berperan dalam mengambil pengukuran suhu pada parafin, 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 3. 2 *Data logger* dan *thermocouple*Tabel 3. 1 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. 2 Spesifikasi *thermocouple*

Diameter Kabel	2*0.5mm
Panjang Kabel	1 meter
Layer	<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 3.3 berikut:



Gambar 3. 3 Pompa air

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

Tabel 3. 3 Spesifikasi pompa air

Daya	60/85/120 Watt
Voltase	220 V
Temperatur air (maks.)	90° C
Tekanan system (maks.)	10 bar
Daya dorong (maks.)	9 meter
Kapasitas (maks.)	1,6 m/h
Ukuran pipa	$\frac{3}{4}$ 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 3.4 berikut ini:



Gambar 3. 4 *Water flow meter*

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

Tabel 3. 4 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 3. 5 Kontroler suhu dan SSR

Spesifikasi kontroler suhu dan SSR adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 5 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 3.6 di bawah ini:



Gambar 3. 6 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 3.7 berikut ini:



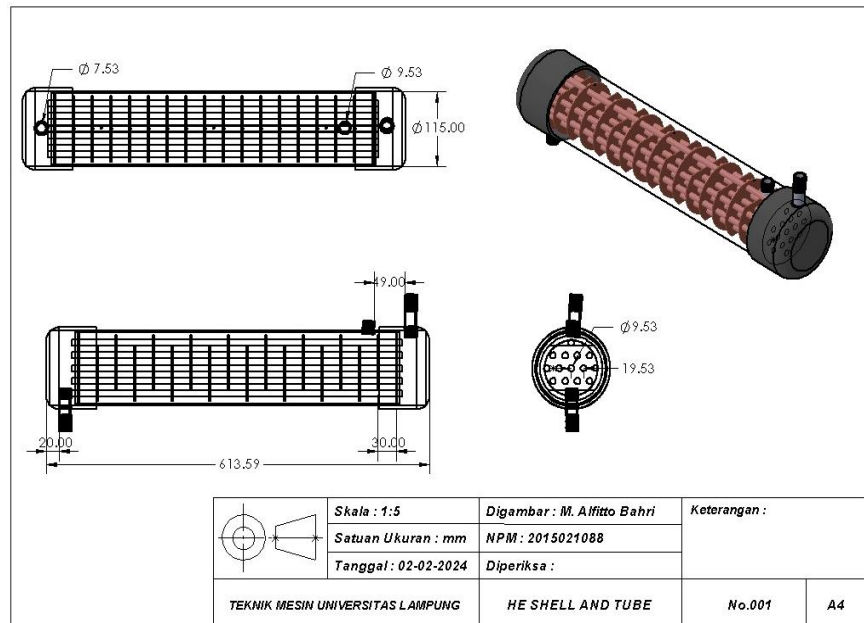
Gambar 3. 7 Katup air

h. 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 akrilik 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 *shell and tube*

dan dilakukannya percobaan dengan posisi alat penukar kalor horizontal yang dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 3. 8 Alat penukar panas *shell and tube*

Detail dari variasi dan desain alat penukar kalor dapat dilihat pada tabel 3.7 Berikut ini.

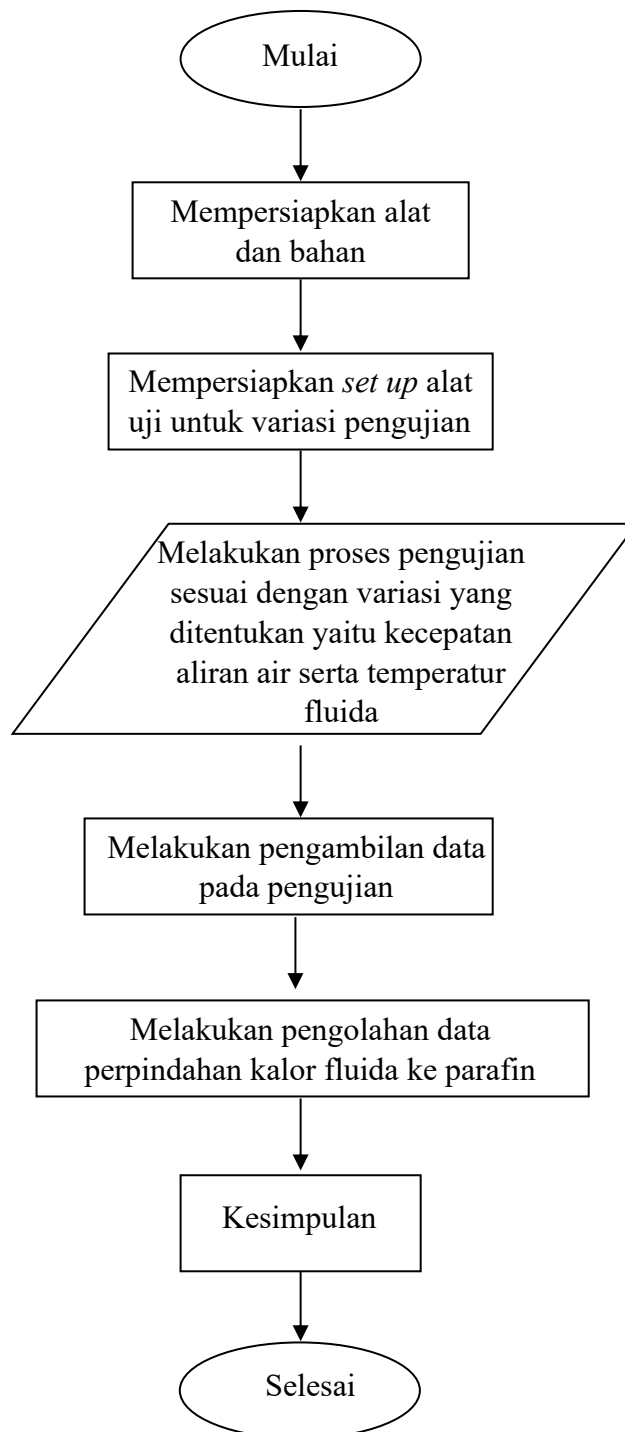
Tabel 3. 6 Ukuran alat penukar panas

Nama	Keterangan
Pipa Tembaga	Ukuran: 3/8" Panjang: 530 mm Diameter dalam: 9,5 mm Diameter luar: 10,5 mm
Pipa Akrilik	Ukuran: 4" Panjang: 520 mm Diameter dalam: 110 mm Diameter luar: 115 mm
Sirip	Diameter luar: 100 mm Jarak antar sirip: 30 mm Jumlah sirip: 18 buah

2. Bahan

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

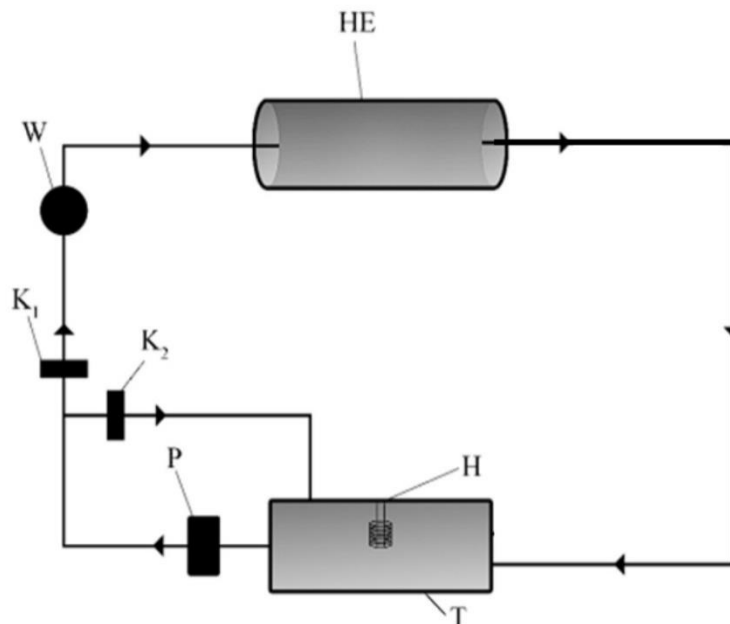
3.4 Diagram Alir



Gambar 3. 9 Diagram alir penelitian

3.5 Skema Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian yang mana bermula dari parafin masih dalam bentuk padat, kemudian fluida berupa air dipanaskan di tempat penampung air panas yang kemudian panasnya dialirkan ke *shell and tube* dengan menggunakan pompa hingga parafin mencair. Kecepatan dari aliran air ini dapat dikontrol dengan menggunakan katup air serta kecepatan alirannya dapat dilihat melalui *water flow meter sensor*. Temperatur parafin, temperatur fluida masuk dan keluar penukar panas, serta temperatur masuk dan keluar tempat penampung air dapat diketahui dengan *thermocouple* dan *data logger*. Instalasi alat pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut ini:

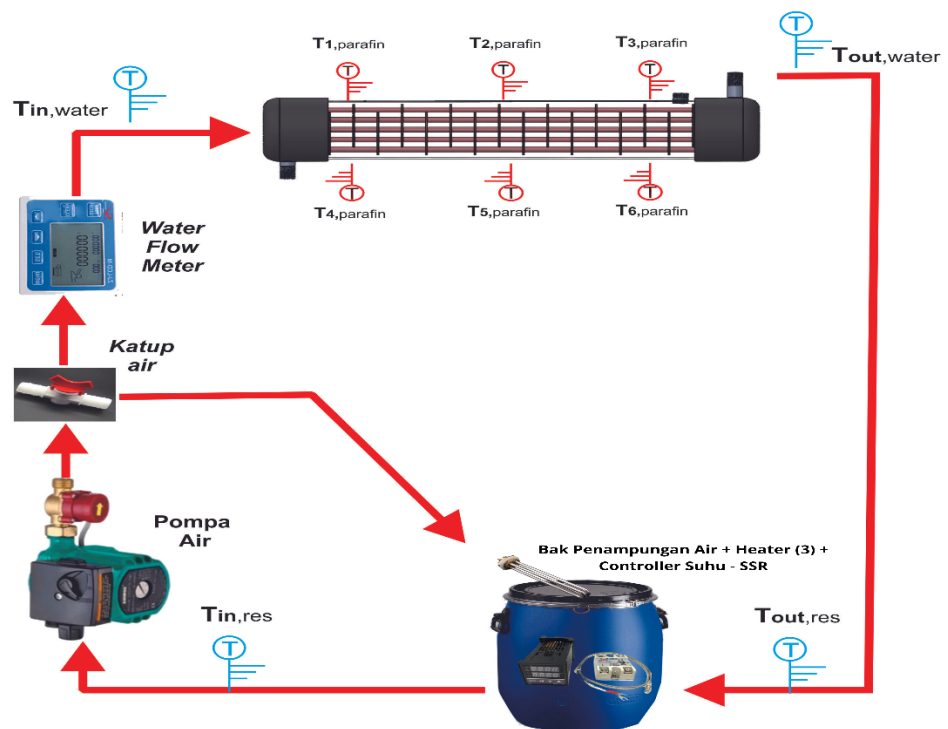


Gambar 3. 10 Instalasi alat pengujian

Keterangan:

- T : Tempat penampung air
- H : Pemanas Air
- HE : Alat penukar kalor
- P : Pompa air
- W : *Water flow meter sensor*
- K : Katup air

3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3. 11 Penempatan titik pengukuran

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Digunakan 10 buah termokopel untuk melakukan pengukuran temperatur.

$T_{in,water}$ merupakan temperatur air sebelum masuk pada *shell and tube*, $T_{out,water}$ merupakan temperatur air sesudah keluar dari *shell and tube*, $T_{1,parafin}$ merupakan temperatur parafin yang diletakkan 10 cm setelah pangkal pipa, $T_{2,parafin}$ merupakan temperatur parafin yang diletakkan ditengah pipa, $T_{3,parafin}$ merupakan temperatur parafin yang diletakkan 10 cm sebelum ujung pipa. Kemudian untuk T_4 , T_5 , dan T_6 diletakkan dan diarahkan kebagian bawah pipa agar dapat mengetahui temperatur leleh parafin bagian dangkal atau bawah pipa.

Untuk mengukur debit aliran air, *water flow meter* akan disambungkan dengan pipa penghubung diantara *shell and tube* dan katup bypass. Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 detik dengan menggunakan data logger. Percobaan dilakukan sebanyak 9 kali dimana terdiri dari 3 variasi debit air (2 l/min, 4 l/min, dan 6 l/min).

3.7 Metode Pengambilan Data

Metode 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, parafin, pipa air akrilik, dan katup air.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Menghidupkan data logger dan memasang *thermocouple*, dengan susunan CH 1, dan CH 2 temperatur fluida masuk keluar penukar panas, CH 3, CH 4, CH 5, CH 6, CH 7 dan CH 8 adalah temperatur parafin di dalam penukar panas, CH 9, dan CH 10 adalah temperatur fluida masuk dan keluar tempat penampung air.
4. Memanaskan air yang berada pada tempat penampung air panas untuk 3 variasi temperatur yaitu 60 °C, 70 °C, 80 °C.
5. Menghidupkan pompa air.
6. Memanaskan parafin di dalam alat penukar kalor dengan mengalirkan air panas yang terdapat di tempat penampung air panas sampai temperatur parafin mencapai 57 °C dengan toleransi $\pm 1^\circ\text{C}$.
7. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 10 detik.
8. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat kecepatan aliran.
9. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air.
10. Biarkan air bersiklus hingga temperatur air di dalam tempat penampung air mengalami pemanasan optimal dari parafin yang menyimpan panas.
11. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam Ms. Excel.

12. Mengulangi langkah 9-11 dengan variasi kecepatan aliran yang telah ditentukan.
13. Membuat kesimpulan hasil penelitian
14. 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 parafin 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. Karakteristik dari alat penukar kalor *shell and tube* menunjukkan semakin besar variasi temperatur air dan debit aliran, maka laju perpindahan panas juga semakin besar yang memungkinkan parafin mencapai suhu pelelehan lebih cepat. Rata-rata perbedaan temperatur *inlet* dengan *outlet* terjadi pada variasi aliran 2 l/min dengan temperatur 80°C, mencapai 3,878 °C. Kemudian hasil dari laju perpindahan panas tertinggi terjadi pada debit aliran 6 l/min, temperatur air 80°C yang mencapai 1050,70 Watt. Energi terbesar yang diserap oleh parafin terjadi pada temperatur 80°C dan debit aliran 6 l/min, dengan nilai 629.02 kJ. Pada pengujian ini, terlihat bahwa temperatur air dan debit yang lebih tinggi meningkatkan perpindahan panas ke parafin, yang mana meningkatkan proses pelelehan.
2. Alat penukar kalor *shell and tube* tergolong efisien dalam perpindahan panas ke parafin saat proses pelelehan. Pada saat pengujian, waktu pelelehan parafin dari suhu awal 32 °C hingga mencapai 57°C tercatat proses pelelehan tercepat pada variasi 80 °C dengan debit aliran 6 l/min, hanya dalam waktu 12 menit 20 detik. Hal ini dipengaruhi oleh semakin besar variasi temperatur air dan debit aliran, yang memungkinkan laju perpindahan panas menjadi lebih cepat. Dengan demikian, alat ini terbukti mampu mencapai perubahan suhu yang diinginkan dengan efektif, tergantung pada variasi debit aliran dan temperatur air yang digunakan.

5.2 Saran

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

1. Perlu ditambahkannya variasi kecepatan aliran air yang lebih kecil lagi agar dapat memperoleh nilai ΔT yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Andriyanto, Pangestu, E., Hakim, I. N., Pratama, J. A., Sugiri, A., Amrizal, Susila, M. D., & Irsyad, M. (2022). Thermal Energy Storage Characteristics Of Paraffin In Solar Water Heating Systems With Flat Plate Collectors. *Journal Of Advanced Research In Fluid Mechanics And Thermal Sciences*, 95(2), 113–
- Atmadja, S. T. (2006). Pengaruh Jarak Swirl Fan Terhadap Laju Penurunan Temperatur Case, Hambatan Termal Dan Efektifitas Fin Pada Extrude Fin.
- Bouadila, S., Fteïti, M., Oueslati, M. M., Guizani, A., & Farhat, A. (2014). Enhancement Of Latent Heat Storage In A Rectangular Cavity: Solar Water Heater Case Study. *Energy Conversion And Management*, 78, 904–912.
- Buchori, L. (2004). *Perpindahan Panas (Heat Transfer)*.
- Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer A Practical Approach*, Second Edition.
- Fischer, U. R. (2006). Thermal Conductivity And Melting Point Measurements On Paraffin-Zeolite Mixtures 1.
- Hamed, M., Fallah, A., & Ben Brahim, A. (2017). Numerical Analysis Of Charging And Discharging Performance Of An Integrated Collector Storage Solar Water Heater. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 42(13), 8777–8789.
- Hasenöhrl, T. (2009). *An Introduction To Phase Change Materials As Heat Storage Mediums*.
- Hutajulu, O. Y., Siregar, B. M., & Mendoza, M. D. (2021). Studi Kelayakan Potensi Penyinaran Matahari 34 Provinsi Di Indonesia Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Matahari Skala Rumah Tangga.
- Incropera, F. P., Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, & David P. De Witt. (2011). *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer*, Seventh Edition.

- Khorshidi, J., & Heidari, S. (2016). Design And Construction Of A Spiral Heat Exchanger. *Advances In Chemical Engineering And Science*, 06(02), 201–208.
- Kusumah, T., Wahyudi, T., & Widodo, M. (2020). Phase Change Material Dari Campuran Parafin Untuk Tekstil Swa-Termoregulasi Phase Change Material From Binary Mix Paraffins For Self-Thermoregulating Textiles.
- Meng, Q., & Hu, J. (2008). A Poly(Ethylene Glycol)-Based Smart Phase Change Material. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 92(10), 1260–1268.
- Sarier, N., & Onder, E. (2012). Organic Phase Change Materials And Their Textile Applications: An Overview. *Dalam Thermochimica Acta* (Vol. 540, Hlm. 7–60).
- Seter, W. F., & Iuouye, I. (1935). Paraffin Wax Tensile Strength And Density At Various Temperatures. *Dalam J. Assoc. Official Dgr. Cherfc* (Vol. 22, Nomor 2).
- Shalaby, S. M., Kabeel, A. E., Moharram, B. M., & Fleafl, A. H. (2020). Experimental Study Of The Solar Water Heater Integrated With Shell And Finned Tube Latent Heat Storage System. *Journal Of Energy Storage*, 31.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review On Thermal Energy Storage With Phase Change Materials And Applications. *Dalam Renewable And Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Nomor 2, Hlm. 318–345).
- Sharma, S. D., & Sagara, K. (2005). Latent Heat Storage Materials And Systems: A Review. *International Journal Of Green Energy*, 2(1), 1–56.
- Syaichurrozi, I., Metta Karina, A., & Imanuddin, A. (2014). Study Of Plate And Frame Heat Exchanger Performance : The Effects Of Mass Flow Rate, Inlet Temperature And Type Of Flow Againts The Overall Heat Transfer Coefficient: Vol. Xi (Nomor 02).
- Walujodjati, A. (2006). *Perpindahan Panas Konveksi Paksa*.

Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review On Thermal Energy Storage With Phase Change Materials (Pcms) In Building Applications. Dalam Applied Energy (Vol. 92, Hlm. 593–605). Elsevier Ltd.