KAJIAN EXPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PELELEHAN *PCM* PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL

(SKRIPSI)

OLEH:

BAYU ARYA PRATAMA

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2024

KAJIAN EXPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PELELEHAN *PCM* PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL

Oleh

BAYU ARYA PRATAMA

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 EXPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PELELEHAN *PCM* PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL

Oleh:

Bayu Arya Pratama

Salah satu energi terbarukan yang melimpah ketersediannya yaitu energi radiasi surya yang 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 merupakan salah satu media penyimpan energi termal dengan tingkat kepadatan penyimpanan energi panas yang jauh lebih tinggi selama perubahan fasa dan dapat menjaga suhu panas tetap konstan sehingga 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 yaitu 2, 4 dan 6 l/min. Penelitian ini bertujuan untuk menganalis perpindahan panas dari air ke parafin pada proses pelelehan terhadap variasi temperatur masuk dan laju aliran air 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 8 menit 30 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 OF PARAFFIN PCM MELTING PROCESS IN SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER WITH VERTICAL POSITION

By:

Bayu Arya Pratama

One of the abundant renewable energy availability is solar radiation energy which 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 is one of the thermal energy storage media with a much higher density of thermal energy storage during phase change and can keep the heat temperature constant so it 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 temperature of 60°C, 70°C, and 80°C and also the water flow rate of 2, 4 and 6 l/min. This study aims to analyze the heat transfer from water to paraffin in the melting process against variations in inlet temperature and water flow rate of the time required for paraffin to undergo phase change. 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 8 minutes 30 seconds. Thus, the device proved to be able to achieve temperature changes effectively, depending on the variation in flow rate and water temperature used.

Keywords: Solar energy, PCM, Paraffin, Heat transfer

Judul Skripsi	:	**KAJIAN EXPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PELELEHAN *PCM* PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL**
Mahasiswa	:	Bayu Arya Pratama
Nomor Pokok Mahasiswa	:	2015021051
Fakultas	:	Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.	**Ahmad Yonanda, S.T., M.T.**
NIP. 197112142000121001	NIP. 199301102019031008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan	Ketua Program Studi
Teknik Mesin	S1 Teknik Mesin
Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.	**Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.**
NIP. 197108171998021003	NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

   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: **27 Mei 2024**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul "KAJIAN EXPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PELELEHAN *PCM* PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL" 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, 7 Juni 2024

Pembuat Pernyataan

Bayu Arya Pratama

NPM 2015021051

MOTO

"Masa depan kita gemilang, *The future is your do your best*, berbuat yang baik jangan sakiti orang"

(Prabowo Subianto)

"Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan, maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain)."

(Qs. Al-Insyirah : 6-7)

"Tidak ada kesuksesan tanpa kerja keras. Tidak ada keberhasilan tanpa kebersamaan. Tidak ada kemudahan tanpa doa"

(Ridwan Kamil)

"Hidup yang tidak dipertaruhkan tidak akan pernah dimenangkan, dan untuk memulai hal yang baru mencoba sesuatu yang lain yang memang terkadang kita harus mempertaruhkan apa yang kita punya"

(Najwa Shihab)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

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

1. Orang tua penulis, Bapak Ali Suwandi dan Ibu Rukmini 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. Ahmad Yonanda, S.T., M.T. 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. Keluarga besar grup TA lurrrr yang terdiri dari Alfitto, Arahman, dan Agung yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
10. Keluarga besar grup ENG (ENGINEER MAN) yang terdiri dari Aldo, Bala, Daud dan Malik yang saling memberikan dukungan, motivasi serta bantuan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita semua dapat sukses dikemudian hari.
11. Teman-teman angkatan 2020 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 28 September 2020 menjalin kekeluargaan.

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 Kotabumi, pada tanggal 18 Maret 2002 sebagai anak pertama, dari pasangan Bapak Ali Suwandi dan Ibu Rukmini. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD NEGERI 04 TANJUNG AMAN KOTABUMI hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 1 GEDUNG SURIAN yang diselesaikan tahun 2017 dan SMA NEGERI 2 KOTABUMI 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 Organisasi diluar kampus seperti Ikatan Mahasiswa Lampung Utara (IKAM LAMPURA). Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tahun 2023 dengan judul laporan **"ANALISIS HASIL UJI KINERJA MESIN PERONTOK SORGUM TIPE *HOLD ON* KADAR AIR BIJI TINGGI DI PUSAT RISET TEKNOLOGI TEPAT GUNA"**

Tahun 2023 penulis melakukan penelitian dengan judul **"KAJIAN EXPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PELELEHAN *PCM* PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL"** dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan Bapak Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR ..... **iii**
DAFTAR TABEL ..... **v**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Tujuan 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Sistematika Penulisan 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA **5**
2.1 Perpindahan Panas 5
2.1.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi 5
2.1.2 Perpindahan Panas secara Konveksi 7
2.1.3 Perpindahan Panas secara Radiasi 8
2.2 Alat Penukar Panas (*Heat Exchangers*) 9
2.2.1 Aliran Searah 9
2.3 Jenis – Jenis Alat Penukar Kalor 11
2.4 Material Berubah Fasa 13
2.5 Persamaan Dasar *Heat Exchanger* 14
2.5.1 Panas Yang Diserap 14
2.6 Klasifikasi *PCM* 17
2.6.1 *PCM* Organik 18
2.6.2 *PCM* Anorganik 18
2.7 Parafin 18
2.8 Sifat-Sifat Parafin 21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN **23**
3.1 Tempat Pelaksanaan 23
3.2 Waktu Pelaksanaan 23
3.3 Alat dan Bahan 25
3.4 Diagram Alir 34
3.5 Skema Pengujian 36
3.6 Penempatan titik pengukuran 37
3.7 Metode Pengambilan Data 37

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 39
4.1 Hasil Pengambilan Data 40
4.1.1 Temperatur Air Masuk dan Keluar Alat Penukar Kalor 40
4.1.2 Temperatur Parafin 41
4.1.3 Waktu Untuk Mencapai Titik Leleh 43
4.2 Hasil Perhitungan 46
4.2.1 Laju Perpindahan Panas Air 46
4.2.2 Bilangan Reynold 48
4.2.3 Perhitungan Energi 51
BAB 5 PENUTUP 58
5.1 Kesimpulan 58
5.2 Saran 59
DAFTAR PUSTAKA 60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perpindahan Panas Konduksi ..... …..6
Gambar 2. 2 Perpindahan Panas Konveksi ..... …..7
Gambar 2. 3 Profil Temperatur Aliran *Co-Current* (Cengel, 2003) ..... ….10
Gambar 2. 4 Profil temperatur aliran *counter-current* (Cengel, 2003) ..... ….10
Gambar 2. 5 Aliran *double pipe heat exchanger* ..... ….11
Gambar 2. 6 *Plate-Frame Heat Exchanger* ..... ….12
Gambar 2. 7 *Shell and tube heat exchanger* ..... ….13
Gambar 2. 8 Klasifikasi PCM ..... ….17
Gambar 2. 9 (a) Parafin padat (b) Parafin cair ..... ….19
Gambar 3. 1 Pemanas Air Listrik..... ….25
Gambar 3. 2 *Data Logger* dan *Thermocouple* ..... ….26
Gambar 3. 3 Pompa Air ..... ….27
Gambar 3. 4 *Water flow meter* ..... ….28
Gambar 3. 5 Kontroler suhu dan *SSR* ..... ….29
Gambar 3. 6 selang pipa air panas ..... ….30
Gambar 3. 7 Katup Air..... ….31
Gambar 3. 8 Alat Penukar Panas *Shell and Tubee*..... ….31
Gambar 3. 9 Diagram Alir Pembuatan *Shell and Tube*..... ….34
Gambar 3. 10 Diagram Alir Pengujian ..... ….35
Gambar 3. 11 Instalasi alat pengujian..... ….36
Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Nilai Rata-rata ΔT Air ..... ….40
Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-Rata Parafin Variasi Temperatur Air 60˚C..... ….42
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-Rata Parafin Variasi Temperatur Air 70˚C..... ….42
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-Rata Parafin Variasi Temperatur Air 80˚C..... ….42
Gambar 4. 5 grafik perbandingan waktu parafin mencapai 57˚C ..... ….44
Gambar 4. 6 Perbandingan Laju Perpindahan Panas Air..... ….47

Gambar 4. 7 Perbandingan Energi Air dan Parafin Pada Variasi Temperatur 60°C ……54
Gambar 4. 8 Perbandingan Energi Air dan Parafin Pada Variasi Temperatur 70°C ……54
Gambar 4. 9 Perbandingan Energi Air dan Parafin Pada Variasi Temperatur 80°C ……55

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Rencana Pelaksanaan Penelitian ..... ….24
Tabel 3.2 Spesifikasi *Data Logger* ..... ….26
Tabel 3.3 Spesifikasi *Thermocouple* ..... ….26
Tabel 3.4 Spesifikasi Pompa Air ..... ….27
Tabel 3.5 Spesifikasi *water flow meter* ..... ….28
Tabel 3.6 Spesifikasi kontroler dan SSR ..... ….29
Tabel 3.7 Ukuran Alat penukar panas ..... ….32
Tabel 4. 1 Data Laju Perpindahan Panas ..... ….46
Tabel 4. 2 Perhitungan Bilangan Reynolds Temperatur Air 60°C ..... ….49
Tabel 4. 3 Perhitungan Bilangan Reynolds Temperatur Air 70°C ..... ….49
Tabel 4. 4 Perhitungan Bilangan Reynolds Temperatur Air 70°C ..... ….50
Tabel 4. 5 Energi yang Dilepas Air ..... ….51
Tabel 4. 6 Energi Yang Diserap Parafin ..... ….53
Tabel 4. 7 Energi Air yang Mendekati Energi Parafin ..... ….56

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu energi terbarukan yang melimpah ketersediannnya yaitu energi radiasi surya, energi surya merupakan salah satu sumber daya energi terbarukan yang berpotensi untuk dapat dimanfaatkan terutama di daerah yang beriklim tropis. Indonesia merupakan negara beriklim tropis yang terletak di garis khatulistiwa dengan intensitas radiasi matahari yang relatif stabil sepanjang tahun, berkisar antara 10 hingga 12 jam sehari, sehingga memiliki potensi energi radiasi surya yang melimpah serta dapat menerima radiasi surya yang hampir sama sepanjang tahunnya. Sebagian besar wilayah di Indonesia memiliki potensi penyinaran energi matahari dengan rata-rata radiasi harian sekitar 4,8 kWh/m^2 (Nadjib, 2016). Kondisi tersebut dapat menjadikan matahari sebagai sumber energi alternatif di masa depan. Dimana sumber energi matahari ini merupakan sumber yang tidak akan habis bila digunakan sebagai sumber energi alternatif, serta sumber energi yang ekonomis dan ramah lingkungan. Pemanfaatan dari energi matahari ini dapat digunakan secara termal maupun energi listrik. Pemanfaatan secara termal dapat dilakukan secara langsung dengan cara membiarkan objek pada radiasi penyinaran matahari, atau menggunakan peralatan seperti kolektor dan konsentrator surya.

Salah satu pengaplikasian dari pemanfatan energi matahari yaitu sistem pemanas air untuk mandi, dimana panas matahari merupakan sumber energi utama yang dibutuhkan. Untuk memanfaatkan energi matahari sebagai pemanas air maka dibutuhkan juga sebuah perangkat yaitu kolektor surya yang berfungsi untuk mengumpulkan panas dari energi matahari yang kemudian diubah menjadi energi kalor. Pemanas air dengan tenaga surya/*Solar Water Heater* (*SWH*) merupakan penghasil air panas termurah dan efektif untuk kebutuhan sehari-hari, mulai dari

keperluan rumah tangga, kebutuhan dalam dunia industri serta untuk kegiatan proses produksi lainnya. Teknologi pemanas air berbasis kolektor surya kini banyak tersedia di pasar komersial, namun masih menggunakan pemanas listrik pada tangki untuk menjaga temperatur air agar tetap konstan ketika sistem tidak cukup menerima energi matahari. Oleh karena itu, penyimpanan energi panas dari radiasi matahari dilakukan dengan menggunakan panas sensibel dan memerlukan volume yang besar. Dengan asumsi air tidak terpakai sampai sore hari, maka air panas tersebut ditampung dalam tabung. Hal ini dilakukan untuk mengurangi volume penyimpanan energi dengan tetap mempertahankan kepadatan yang besar untuk mengatasi kehilangan panas ke lingkungan dengan menggunakan *PCM* (Andriyanto dkk., 2022). *Phase Charge Material* (*PCM*) adalah salah satu media penyimpan energi termal dengan tingkat kepadatan penyimpanan energi panas yang jauh lebih tinggi selama perubahan fasa (penyimpanan panas laten) dibandingkan dengan penyimpanan energi panas sensibel dan dapat menjaga suhu panas tetap konstan melalui karakteristik penyimpan panasnya (Mofijur dkk., 2019). Sehingga penggunaan *PCM* bisa menjadi solusi dari tidak konsistennya intensitas energi matahari yang diterima oleh Bumi.

Salah satu *Phase Charge Material* (*PCM*) yang dapat digunakan untuk menyimpan energi termal adalah parafin. Parafin sendiri memiliki sifat pada proses perubahan fasenya reversibel, densitas energi yang tinggi, dan juga kalor latennya tinggi sehingga sangat baik untuk aplikasi penyimpanan kalor dari energi matahari. Konduktivitas termal pada parafin sebesar 0,2 W/m ˚K. dengan titik leleh 42˚C sampai 62˚C, serta kalor laten 178kJ/kg (Yuliani, 2016). Nilai perpindahan kalor yang terjadi pada parafin dapat diketahui dengan cara memanaskan parafin hingga meleleh atau biasa disebut dengan proses pelelehan. Pada penelitian sebelumnya penggunaan *heat exchanger* untuk mengetahui nilai perpindahan kalor pada parafin hanya menggunakan jenis *double pipe* dan meggunakan beberapa variasi sirip. Sedangkan pada penelitian ini akan

menggunakan *heat exchanger* jenis *shell and tube* dengan posisi vertikal yang terdiri dari *shell* silinder dengan seikat tabung didalamnya. Hal inilah yang melatarbelakangi kegiatan penelitian yang berjudul "**Kajian Experimental Perpindahan Kalor Proses Pelelehan *PCM* Parafin Pada *Shell And Tube Heat Exchanger* Dengan Posisi Vertikal".** Dimana dalam penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan *double pipe* pada proses *heat exchanger* nya.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik perpindahan panas dari air ke parafin pada proses pelelehan terhadap variasi temperatur masuk dan laju aliran air.
2. Mengetahui waktu yang dibutuhkan dalam proses pelelehan oleh parafin.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan penelitian ini, peneliti membatasi cakupan pembahasan masalah. Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat penukar kalor yang digunakan berjenis shell and tube berdiameter 4 inch (11,4 cm), panjang shell 52 cm dan panjang tube 53 cm.
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, 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 beriskan hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang ingin disampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

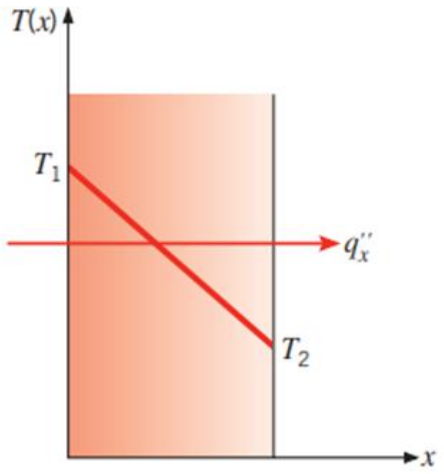
2.1 Perpindahan Panas

Panas adalah salah satu bentuk energi yang dapat dipindahkan. Namun, tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Dalam suatu proses, panas dapat menyebabkan suhu zat meningkat atau perubahan tekanan, serta reaksi kimia dan kelistrikan. Perpindahan panas dapat terjadi secara langsung ketika fluida panas bercampur secara langsung dengan fluida dingin tanpa adanya pemisah. Perpindahan panas juga dapat terjadi secara tidak langsung ketika fluida panas dan fluida dingin tidak berhubungan langsung tetapi dipisahkan oleh sekat pemisah. Perpindahan panas adalah Perpindahan energi dari satu tempat ke tempat lain karena perbedaan suhu (Adib dkk., 2016). Perpindahan panas akan terjadi apabila suhu benda berbeda satu sama lain, panas berpindah dari suhu tinggi ke suhu rendah. Ada 3 (tiga) metode perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Ada juga metode perpindahan panas gabungan.

2.1.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perpindahan panas terjadi ketika panas mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah tanpa mengikuti gerak penghantar panas. Ini menunjukkan bahwa perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas antar molekul tanpa pergerakan molekul sebenarnya (Ningsi, 2021). Interaksi molekul yang terjadi secara langsung tanpa perpindahan molekul yang signifikan menyebabkan energi panas dalam aliran panas konduksi. Kecepatan gerak molekul media perpindahan panas konduksi gas lebih besar daripada molekul cairan, tetapi jarak antar molekul cairan lebih pendek daripada jarak

antar molekul pada fasa gas. Contoh perpindahan panas konduksi yang terjadi pada permukaan dinding yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Perpindahan Panas Konduksi

(Incropera, 2011)

Konduksi adalah satu-satunya cara panas dapat bergerak dalam materi padat yang tidak dapat dilalui cahaya. Dalam fluida, konduksi biasanya berinteraksi dengan konveksi dan kadang-kadang juga dengan radiasi. Anda dapat menulis persamaan dasar untuk konduksi satu dimensi dalam keadaan studi sebagai berikut:

$$\bar{Q}_{cond} = -k\,A\,\frac{dT}{dx} \qquad (2.1)$$

Dimana:

$\bar{Q}_{cond}$: 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:

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

Dimana:

A_r : Luas permukaan silinder (cm^2)

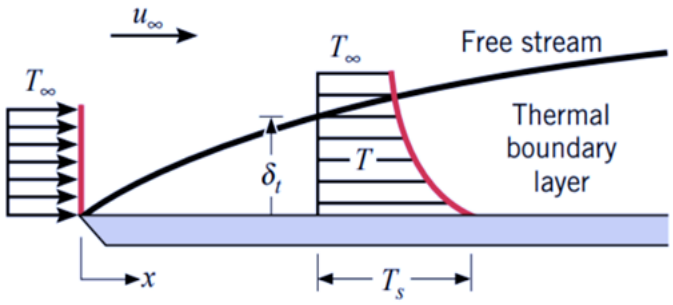
r : Jari-jari silinder (cm)

k : Konduktivitas termal (W/m.K)

l : Panjang silinder (cm)

2.1.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya dengan menggunakan media pengantar berupa fluida (cairan atau gas). Perpindahan panas konveksi secara umum dibagi menjadi 2 cara yaitu, perpindahan panas konveksi bebas terjadi karena perbedaan kerapatan dan suhu dan tidak ada gaya dari luar yang mendorong dan perpindahan panas konveksi paksa terjadi karena gaya dari luar atau gaya tambahan mempengaruhi aliran (Buchori, 2004). Contoh perpindahan panas konveksi dapat dilihat pada gambar 2.2. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar perpindahan panas konveksi (Cengel, 2003).



Gambar 2. 2 Perpindahan Panas Konveksi

(Incropera, 2007)

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

$$\bar{Q}_{conv} = h\ A\ \Delta T \tag{2.3}$$

Dimana:

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

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

A : Luas penampang (m^2)

ΔT : Beda temperatur (K)

2.1.3 Perpindahan Panas secara Radiasi

Koestoer (2002) menjelaskan bahwa radiasi adalah proses perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik atau paket energi (foton), yang dapat mencapai laju perpindahan panas. Banyak faktor memengaruhi laju perpindahan energi, termasuk suhu permukaan yang memancarkan dan menerima radiasi, emisivitas, refleksi, penyerapan dan transmisi permukaan yang diterangi, dan faktor sudut pandang antara permukaan pemancar dan penerima (wahyono, 2019) .

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:

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

Dimana:

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

e : Emisivitas

σ : Konstanta Stefan-bolzmann $5{,}67x10^{-8}$ (W/m^2K^4)

T : Suhu permukaan benda (oK)

A : Luas permukaan (m2)

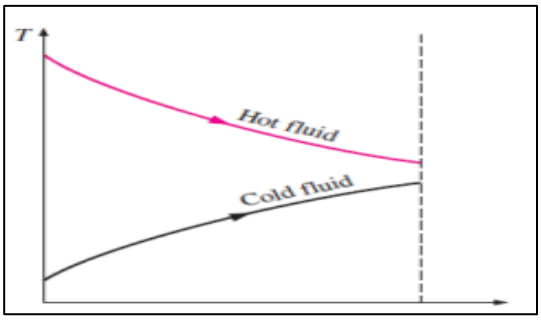
2.2 Alat Penukar Panas (*Heat Exchangers*)

Alat penukar panas, juga dikenal sebagai *heat exchangers*, adalah alat yang memungkinkan panas mengalir antara dua fluida dengan suhu yang berbeda tanpa membuat keduanya bercampur. Alat ini biasanya digunakan untuk menurunkan atau meningkatkan temperatur sebuah sistem dengan memanfaatkan suatu media pendingin atau pemanas sehingga kalor dapat berpindah dari temperatur yang tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Dalam alat penukar panas, proses perpindahan panas terdiri dari konveksi dalam fluida masing-masing dan konduksi di dinding yang memisahkan keduanya. 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

Dalam penukaran panas dengan aliran searah, dua fluida (dingin dan panas) memasuki sisi penukar panas yang sama, mengalir dalam arah yang sama, dan akhirnya keluar dari sisi yang sama. Suhu fluida dingin yang keluar dari perangkat tidak dapat melebihi suhu fluida panas yang juga keluar dari perangkat. Akibatnya, seringkali diperlukan media pemanas atau pendingin

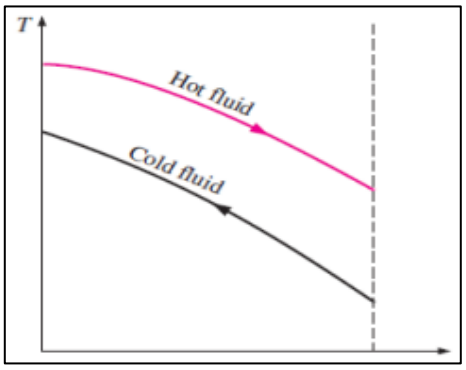
tambahan yang cukup banyak. Profil suhu aliran *co-current* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Profil Temperatur Aliran *Co-Current*
(Cengel, 2003)

2.2.2 Berlawanan Arah

Penukar panas jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk dan keluar pada sisi yang berlawanan.Temperatur fluida dingin yang keluar dari penukar panas lebih tinggi dibandingkan temperatur fluida panas yang keluar dari penukar kalor, sehingga Penukar panas berlawanan arah dianggap lebih efektif dibandingkan dengan aliran searah, di mana kedua fluida (panas dan dingin) memasuki dan keluar dari sisi yang berlawanan. Gambar 2.4 merupakan bentuk grafik dari aliran yang berlawanan arah.



Gambar 2. 4 Profil temperatur aliran *counter-current*
(Cengel, 2003)

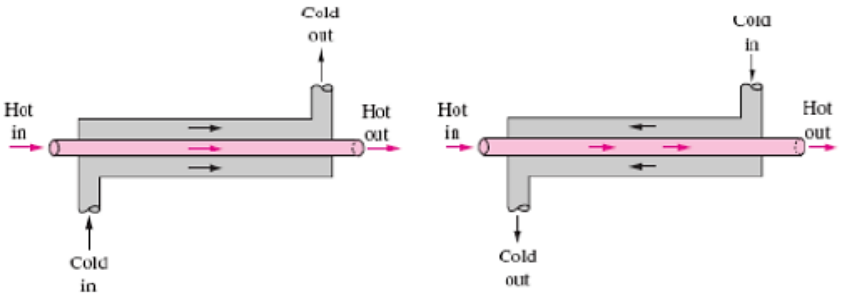
Alat penukar kalor juga dikategorikan berdasarkan proses transfernya, yaitu alat penukar kalor langsung dan tidak langsung. Alat penukar kalor langsung terjadi ketika fluida panas bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam bejana atau ruang tertentu. Sedangkan alat penukar kalor tidak langsung bercampur dengan fluida panas secara tidak langsung. Oleh karena itu, proses perpindahan panasnya membutuhkan media perantara seperti pipa, plat, atau peralatan lainnya.

2.3 Jenis – Jenis Alat Penukar Kalor

Jenis-jenis *heat exchanger* dapat dibedakan atas:

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

   Alat penukar panas dengan dua pipa di mana fluida mengalir dari satu tempat ke tempat lain dikenal sebagai *heat exchanger*. Fluida memiliki kemampuan untuk bergerak dalam arah yang sama atau berlawanan. *Double pipe heat exchanger* adalah alat yang terdiri dari pipa yang saling terhubung yang panjang. Alat ini cocok untuk kondisi di mana laju aliran cairan relatif rendah. Ilustrasi dari aliran dalam penukar panas ini dapat dilihat pada

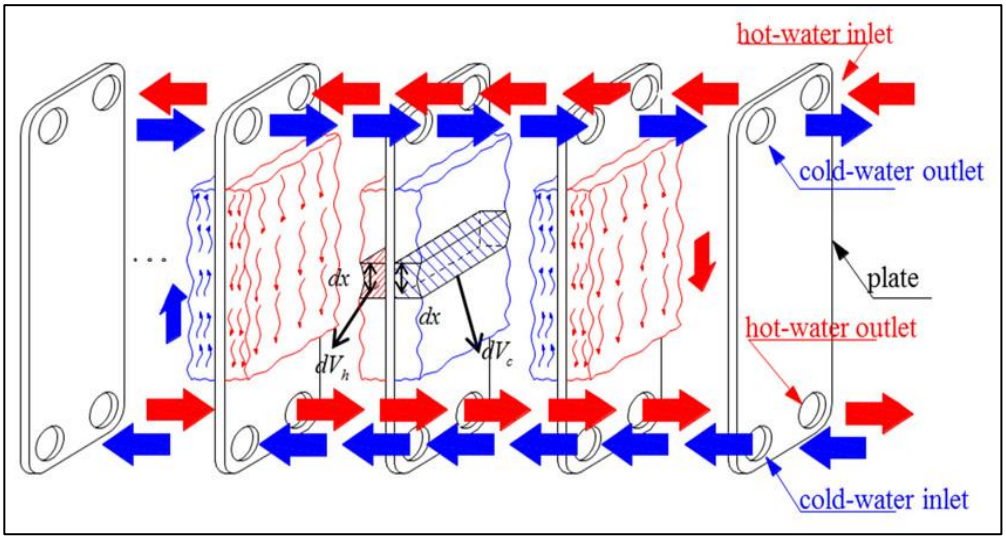


Gambar 2. 5 Aliran *double pipe heat exchanger*

(Cengel, 2003)

2. Tipe *plate and frame*

Alat penukar panas jenis ini terdiri dari paket pelat yang tegak lurus, bergelombang, atau dengan profil lainnya. Penyekat lunak dipasang di antara pelat tegak lurus. Sebagian besar pelat berbentuk segi empat memiliki lubang untuk mengalirkan fluida. Fluida mengalir masuk dan keluar pada sisi yang lain melalui dua lubang ini, sementara fluida lain mengalir melalui sekat dan ruang pada sisi di sebelahnya karena ada sekat (Syaichurrozi dkk., 2014). Gambar 2.6 merupakan contoh dari *heat exchanger* tipe *plate and frame*.



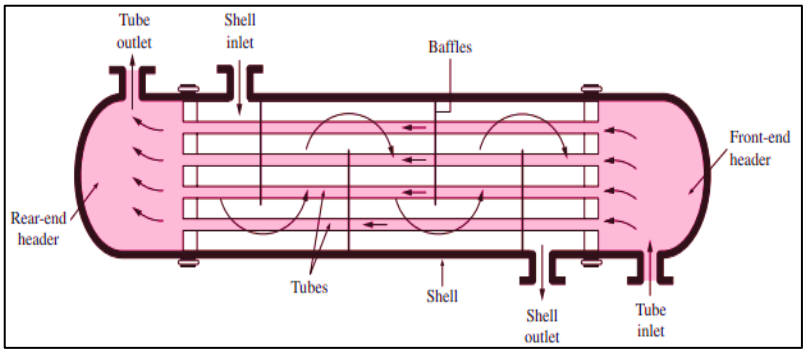
Gambar 2. 6 *Plate-Frame Heat Exchanger*

(Miao dkk., 2017)

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

Jenis alat pertukaran panas yang dikenal sebagai *shell and tube* terdiri dari sebuah tabung (*shell*) dengan susunan pipa (*tube*) di dalamnnya. Fluida panas mengalir di dalam tabung, sedangkan fluida dingin mengalir di luar atau di dalam tabung, atau sebaliknya. Dalam kondisi tekanan relatif tinggi, *shell dan tube heat exchanger* biasanya digunakan. Yang terdiri dari selongsong dengan annulus dengan rangkaian tertentu di dalamnya untuk

mendapatkan luas permukaan yang optimal. Fluida mengalir baik di selongsong maupun di annulus, menyebabkan perpindahan panas antara dinding annulus dan fluida. Contoh perpindahan panas ini adalah pola segitiga dan segiempat. Gambar 2.7 merupakan contoh *heat exchanger* dengan tipe *shell and tube*.



Gambar 2. 7 *Shell and tube heat exchanger*

(Cengel, 2003)

2.4 Material Berubah Fasa

kemampuan untuk melepaskan energi panas yang sangat tinggi dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa mengalami perubahan suhu dikenal sebagai bahan berubah fasa atau *Phase Change Material* (*PCM*), juga disebut sebagai bahan penyimpan panas laten (Meng, 2008). Transisi dari keadaan padat menjadi cair atau sebaliknya adalah salah satu contoh dari proses perubahan fasa ini. *PCM*, yang sering digunakan sebagai bahan baku lilin, termasuk asam lemak, minyak nabati, garam hidrat, dan parafin. Ikatan kimia di antara molekul *PCM* akan terlepas ketika suhu meningkat. Pada *PCM* yang dalam keadaan padat-cair, bahan akan meleleh atau berubah menjadi cair. Proses perubahan fasa ini bersifat endotermik. Di sisi lain, saat suhu turun, *PCM* akan mengalami proses pembekuan. Reaksi isotermik akan terjadi, yang berarti panas akan dilepaskan selama proses pembekuan (Kusumah dkk., 2020). *PCM* adalah metode

penyimpanan energi panas yang paling efektif. *PCM* dapat digunakan untuk penyimpanan energi dan pengendalian suhu. *PCM* dapat melepaskan panas hingga empat hingga lima kali lipat per satuan volume dibandingkan dengan bahan penyimpan energi biasa seperti air atau batu. (Sharma dkk., 2009). Harga yang terjangkau, ketersediaan yang mudah, dan kemampuan untuk digunakan secara berkelanjutan selama strukturnya tidak berubah adalah keuntungan tambahan dari *PCM*.

Pada perubahan fasa, *PCM* menyerap dan melepaskan panas melalui panas laten. Ini jauh lebih banyak energi yang diserap daripada panas sensibel. Salah satu sifat fisik *PCM* adalah keseimbangan fasa. Dengan demikian, stabilitas fase selama peleburan dan pembekuan akan membantu mengatur suhu penyimpan kalor. Massa jenis material yang tinggi kemudian mengurangi ukuran bejana penampung. Jika ada perubahan volume dan tekanan penguapan yang rendah, masalah penampungan akan berkurang. Selain itu, *PCM* memiliki sifat kimia, yang berarti bahwa itu tidak beracun dan tidak memicu kebakaran.

2.5 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.5.1 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 alat penukar panas, transfer panas ini mengalir dari sirkuit air panas ke sirkuit air dingin. Dalam penelitian ini tingkat perpindahan panas adalah fungsi dari tingkat cairan massa aliran, perubahan suhu dan kapasitas panas spesifik dari cairan (pada suhu rata-rata), yang menggunakan persaman dasar perpindahan panas sebagai berikut:

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

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:

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

Dimana:

E_{air} : Energi air (Joule)

$\dot{m}$: Laju aliran massa (kg/s)

ΔT : Perbedaan temperatur (°C)

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)

2.5.2 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah sebuah perbandingan antara rasio gaya inersia (vsρ) terhadap gaya viskos (μ/L). Hal ini berfungsi untuk mengukur hubungan kedua gaya dalam kondisi aliran tertentu. Misalnya pada Jenis aliran yang berbeda, seperti aliran laminar dan aliran turbulen. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$Re = \frac{V.D.\rho}{\mu} \tag{2.8}$$

Dimana :

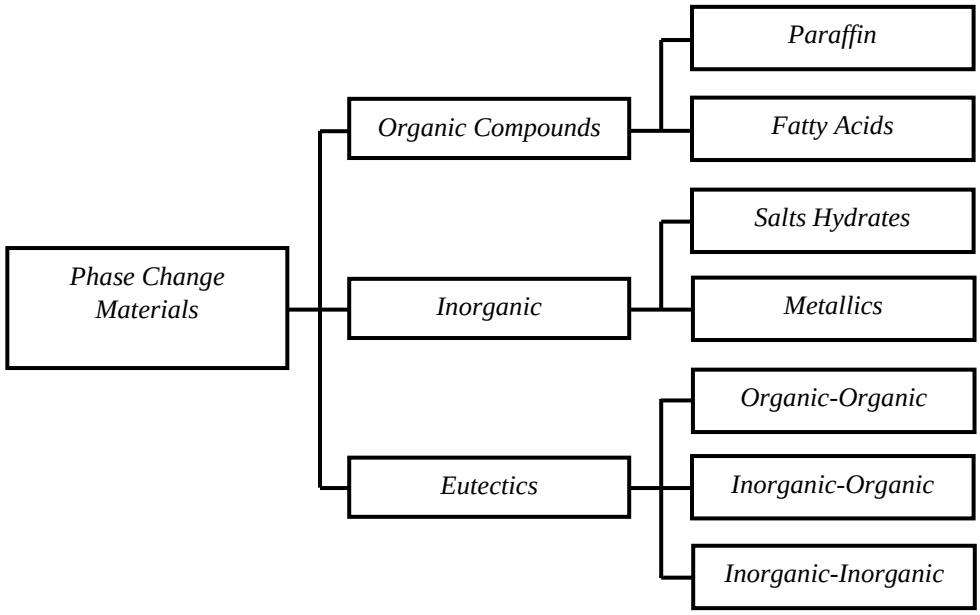
Re : *Reynolds number*
ρ : Massa jenis fluida (kg/s)
V : Kecepatan aliran fluida (m/s)
D : Diameter pipa (m)
μ : Viskositas fluida dinamik ($N.s/m^2$)

Untuk menemukan angka Reynold ini, kita perlu mengetahui kecepatan air mengalir (V), diameter pipa tembaga (D), massa jenis air (ρ), dan viskositas dinamik air (μ). Bilangan Reynolds biasanya digunakan untuk menentukan apakah suatu aliran fluida termasuk dalam aliran laminar atau turbulen.

Adanya kemiripan dinamis antara aliran turbulen dan aliran laminar sehingga memungkinkan penggunaan bilangan Reynold. Kesulitan yang ditemukan ialah pada pola geometri yang mirip meski pada jenis fluida dan laju alir yang berbeda. Bilangan Reynold dapat membantu mengidentifikasi aliran fluida dalam dinamika fluida yang mengalami kemiripan dinamis.

2.6 Klasifikasi *PCM*

PCM biasanya termasuk dalam dua kelompok besar yaitu organik dan anorganik. Pengelompokan ini didasarkan pada panas peleburan laten dan titik leleh. Namun, karena tidak ada satu bahan yang dapat memenuhi semua sifat yang diinginkan, *PCM* adalah kombinasi dari dua kelompok bahan (Sharma & Sagara, 2005). *PCM* dapat dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan kondisi perubahan fasanya: padat-cair, cair-gas, dan padat-gas. *PCM* padat-cair biasanya digunakan untuk penyimpanan energi panas dan terdiri dari tiga komponen yaitu komposisi organik, komposisi anorganik, dan eutektik (Zhou dkk., 2012). Adapun klasifikasi *PCM* organik, senyawa inorganik dan eutectic dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Klasifikasi PCM

(Zhou dkk., 2012)

2.6.1 *PCM* Organik

Sebagian besar *PCM* organik mudah terbakar di alam. *PCM* organik dapat berupa alifatik atau jenis organik lainnya, biasanya memiliki rentang suhu rendah, mahal, dan memiliki panas laten rata-rata per satuan volume yang rendah. Material berubah phasa organik terdiri dari parafin dan nonparafin.

Bahan organik termasuk bahan yang dapat melebur dan membeku berulang kali tanpa kehilangan volumenya dan biasanya tidak korosif. Lilin parafin terdiri dari campuran dengan rumus kimia CH3- 14 (CH2)-CH3. Parafin memenuhi syarat sebagai panas bahan penyimpanan fusi karena ketersediaan mereka dalam berbagai suhu yang besar. Tidak seperti parafin organik, yang memiliki sifat yang sangat mirip, parafin non organik adalah yang paling banyak dari bahan fase perubahan yang memiliki sifat yang sangat bervariasi. Ini merupakan kategori bahan potensial terbesar untuk penyimpanan fase perubahan.

2.6.2 *PCM* Anorganik

PCM anorganik biasanya terdiri dari garam alami laut, endapan mineral, atau produk sampingan dari proses lainnya. Kategori ini mencakup garam hidrat dan *metallic* (Kusumah dkk., 2020). Keunggulan *PCM* anorganik termasuk panas laten volumetric tinggi, konduktivitas termal lebih tinggi, fusi termal yang sangat baik, harga yang lebih rendah, ketersediaan yang melimpah, dan tidak mudah terbakar. Kekurangan PCM anorganik adalah pendinginan super yang sangat tinggi dan sifat korosifnya.

2.7 Parafin

Parafin, atau alkana, adalah kelompok hidrokarbon alkana dengan formula CnH2n+2. Parafin dapat digunakan di banyak bidang, seperti pertanian,

makanan, kosmetik, farmasi, dan kebutuhan rumah tangga. Mereka cenderung tidak reaktif terhadap senyawa lain. Parafin digunakan dalam berbagai cara, termasuk sebagai pelarut, bahan bakar, bahan pembuat plastik, medium penyimpan panas, dan bahan dasar untuk sintesis senyawa kimia. Parafin diperoleh dari minyak yang masih banyak mengandung hidrokarbon yang disulingan. Parafin memiliki konsentrasi atom karbon yang berbeda, dan panjang rantai karbon parafin meningkat seiring dengan jumlah atom karbon yang ada (Sharma dkk., 2009) .Parafin dengan kandungan atom C_{14}–C_{32} adalah parafin dengan fasa cair. Dapat dilihat pada gambar 2.9 yang merupakan contoh dari parafin padat dan parafin cair.

(a) (b)

Gambar 2. 9 (a) Parafin padat (b) Parafin cair

Parafin padat sering digunakan sebagai penyimpan energi termal karena titik lelehnya yang tinggi, yang berkisar antara 42˚C dan 62˚. Ini adalah hasil dari kemampuan termalnya yang mudah menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi. Parafin cair memiliki sifat minyak kental tembus cahaya, tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan tidak larut dalam etanol dan air, tetapi parafin dengan kandungan atom karbon lebih dari C_{15} memiliki fasa padat atau parafin wax. 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:

$$E_{par} = m_{par\ total}\ x\ c_{p\ (solid)}\ x\ (T_m - T_i) + m_{par(liquid)}\ x\ L + m_{(liquid)}.\ c_{p\ (solid)}.\ (T_f - T_m) \quad (2.9)$$

Dimana:

E_{par} : Energi Parafin (kJ)

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 penyimpanan energi termal memiliki kelebihan dan kekurangan. Parafin menawarkan keuntungan bagi pengguna, tetapi kekurangannya bisa menjadi masalah yang perlu diatasi. Oleh karena itu, saat memilih material *PCM* untuk penyimpanan energi termal, harus dipertimbangkan dengan hati-hati. Parafin sebagai penyimpan energi termal memiliki kelebihan dan kekurangan berikut.

1. Kelebihan

   Parafin memiliki banyak keuntungan sebagai penyimpan energi termal. Salah satunya ialah tidak menunjukkan perubahan sifat termal setelah digunakan secara terus menerus, memiliki panas laten yang tinggi, cenderung tidak mengalami proses supercooling, tidak reaktif, tidak berbau, tidak beracun secara ekologi, dan dapat digunakan dalam berbagai jenis kontainer logam (Sarier & Onder, 2012).
2. Kekurangan

   Parafin memiliki kekurangan terutama sebagai penyimpan energi termal yaitu memiliki konduktivitas termal yang rendah saat fasa padat. Namun, masalah ini dapat diselesaikan dengan menambah fin pada permukaan

perpindahan kalor atau dengan menambahkan material logam pada parafin untuk meningkatkan konduktivitas termalnya. Selain itu, karena parafin mudah terbakar, kontainer yang digunakan untuk menyimpan parafin harus dirancang dengan cermat (Sharma & Sagara, 2005).

2.8 Sifat-Sifat Parafin

Sifat-sifat parafin adalah sifat fluida yang ada pada parafin. Ini termasuk masa jenis, panas spesifik, konduktifitas termal, panas laten, dan temperatur leleh parafin. Beberapa sifat-sifat parafin dijelaskan sebagai berikut.

1. Massa jenis

   Masa jenis parafin 880 kg/m3 pada 20^{o}C. Pada temperatur rendah, parafin dapat mengalami masa jenis yang lebih lama karena parafin mengalami penurunan atau peningkatan kerapatan masa, sehingga volume parafin berkurang. Pada temperatur tinggi, parafin juga dapat mengalami masa jenis yang lebih pendek karena parafin memuai pada suhu tinggi, sehingga volume parafin berkurang. Oleh karena itu, penggunaan parafin sebagai penyimpan energi termal memerlukan pengawasan khusus, terutama mengenai perubahan volume selama proses ekspansi. Volume yang digunakan untuk menampung parafin harus diperbesar, sehingga proses ekspansi sekitar 20% dapat diprediksi dengan mempertimbangkan volume yang telah disiapkan untuk mencegah kebocoran.

2. Panas spesifik

   Panas spesifik parafin pada fasa padat adalah 2 kJ/kg.˚K, sementara pada fasa cair adalah 2 kJ/kg.˚K (Data Sheet RT50, 2020). Parafin memiliki kapasitas untuk menyerap banyak panas jika digunakan sebagai penyimpanan energi termal. Namun, waktu yang diperlukan untuk melepaskan panas lebih lama. Ini disebabkan oleh panas spesifik yang lebih tinggi pada fasa cair daripada fasa padat (Fischer, 2006).

3. Konduktivitas termal

   Parafin memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah, sebesar 0.232 W/m.˚K, sehingga laju perpindahan panas sangat lambat baik saat diserap maupun dilepaskan. Namun, meskipun konduktivitas termalnya rendah, parafin memiliki manfaat besar sebagai penyimpan energi termal. Parafin sangat baik untuk aplikasi yang menyimpan energi termal seperti pemanasan atau pendinginan bertahap karena kemampuan mereka untuk menyerap dan menyimpan panas dalam jumlah besar.

4. Panas laten

   Parafin adalah PCM yang memiliki panas laten yang besar. Panas laten parafin bervariasi tergantung pada jumlah ikatan karbonnya. panas laten tinggi memberikan keuntungan sebagai penyimpan energi termal karena material dengan panas laten tinggi memiliki kemampuan untuk menyerap dan menyimpan panas lebih banyak tanpa mengalami peningkatan suhu. Jumlah ikatan karbon yang berbeda dapat digunakan untuk menentukan nilai panas laten parafin.

5. Temperatur leleh

   Temperatur leleh parafin bergantung pada jumlah ikatan atom karbonnya. Jumlah atom karbon yang lebih tinggi menunjukkan temperatur leleh yang lebih tinggi, sedangkan jumlah atom karbon yang lebih rendah menunjukkan temperatur leleh yang lebih rendah. Jumlah ikatan atom karbon yang lebih besar menyebabkan rantai karbon yang lebih panjang dan molekul yang lebih teratur dan lurus. Hasilnya adalah interaksi antara molekul yang lebih luas dan gaya tarik molekul yang lebih kuat. Oleh karena itu, melampaui gaya-gaya ini membutuhkan energi yang besar, yang hanya dapat terjadi pada temperatur tinggi.

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 vertikal. 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 Oktober 2023 sampai dengan bulan Maret 2024. Adapun deskripsi penelitian dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Rencana Pelaksanaan Penelitian

Nama Kegiatan	Oktober				November				Desember				Januari				Februari				Maret			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																								
Persiapan alat pengujian																								
Pengujian																								
Pembuatan laporan																								

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 vertikal berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan.

4. Penulisan Laporan

   Penulisan laporan merupakan tahapan akhir dari penelitian ini. Penulisan laporan ditujukan untuk melaporakan 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 memanas. 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 Listrik

   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. Data Logger dan Thermocouple yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut:

Gambar 3. 2 *Data Logger* dan *Thermocouple*

Tabel 3.2 Spesifikasi *Data Logger*

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

Tabel 3.3 Spesifikasi *Thermocouple*

Diameter Tabel	2*0.5mm
Panjang Kabel	1 meter
Layer	*blue teflon temperature* (ptfe)
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 3.4 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	¾ 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 3.5 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*

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. *Solid State Relay (SSR)* adalah saklar elektornik menggunakan semikonduktor yang bisa mengendalikan aliran arus listrik lebih besar hanya menggunakan arus listrik yang kecil. Dari pengertiannya memang sama dengan komponen relay seperti pada umumnya (Dharmawan dkk., 2022.)

Gambar 3. 5 Kontroler Suhu dan *SSR*

Spesifikasi Kontroler suhu dan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.6 Spesifikasi kontroler dan SSR

Daya	10 VA
Akurasi pengukuran	0.5% FS
Siklus pengambilan sampel	0.5 detik
Suhu pengukuran	0-400^{o}C
Power supply	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

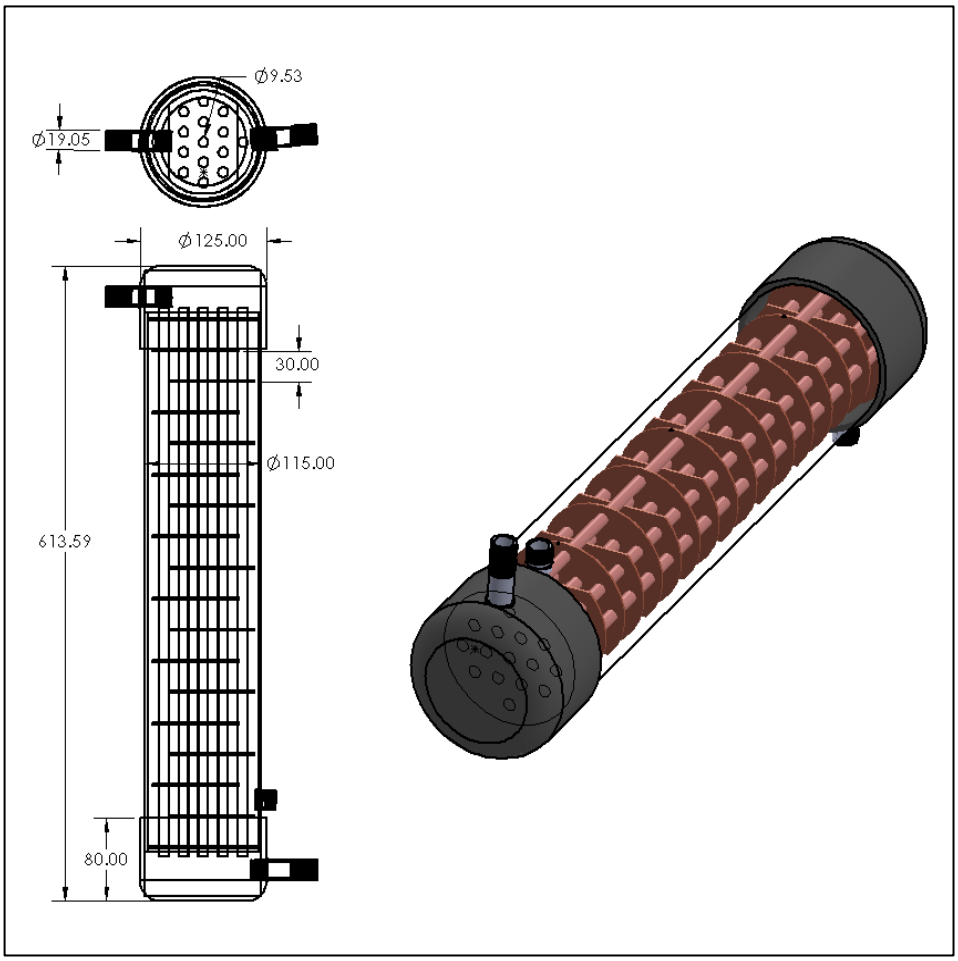
Katup air berfungsi mengontrol jumlah fluida yang mengalir seperti memperbesar dan memperkecil serta memutus aliran fluida dengan cara memutar pegangannya. penelitian ini menggunakan keran air sistem putar yang di dalamnya terdapat bola sebagai penutup seperti terlihat pada Gambar 3.7 berikut ini:

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 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 vertikal. Berikut ini merupakan sketsa dari alat penukar kalor yang digunakan, dimana ukuran yang tertera pada gambar tersebut adalah milimeter (mm) 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 3.7 Ukuran Alat penukar panas

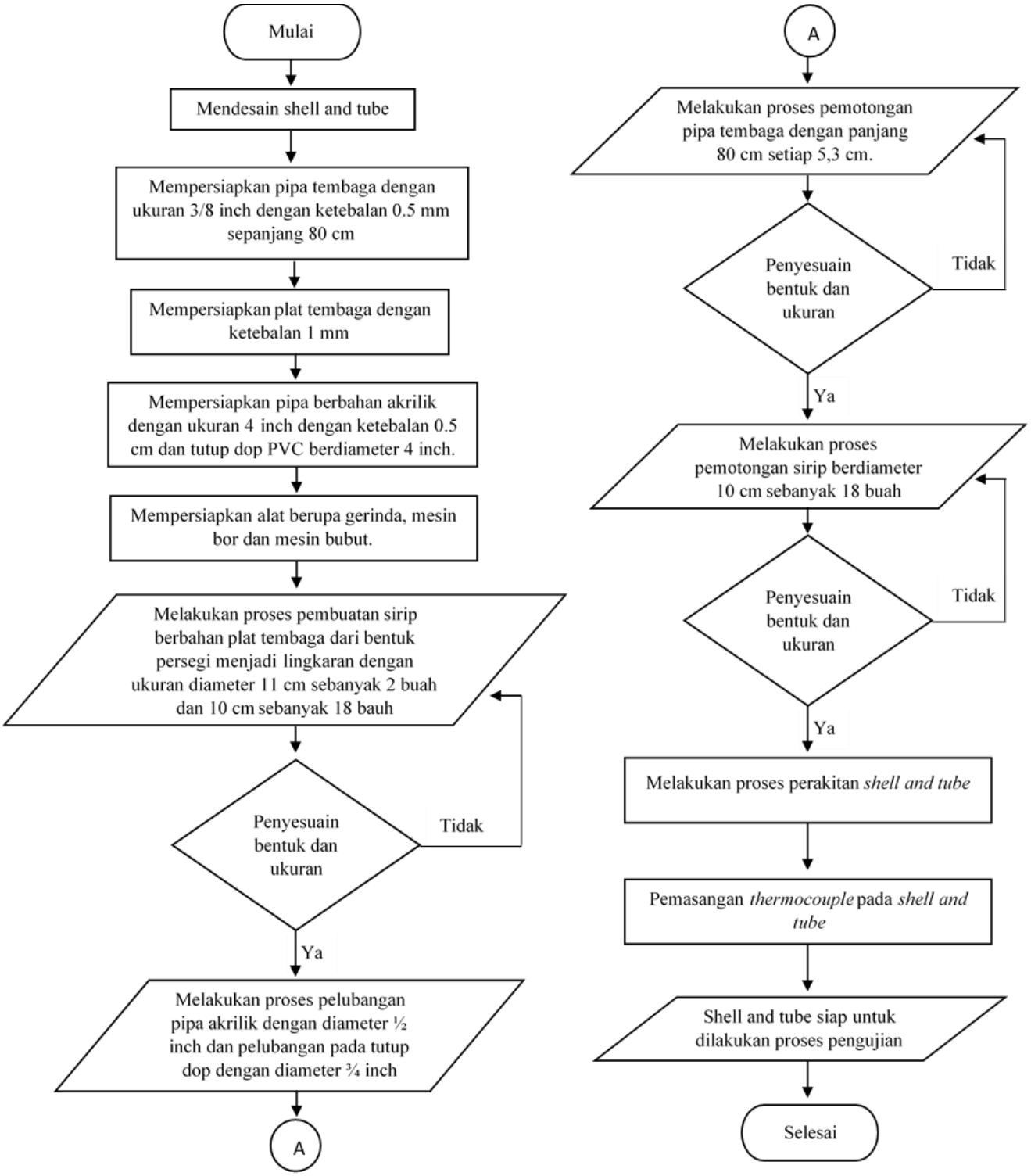
Nama	Keterangan
Pipa Tembaga	Ukuran: **3/8”** Panjang: **530 mm** Diameter dalam: **9,5 mm** Diameter luar: **10,5 mm**

Pipa 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**

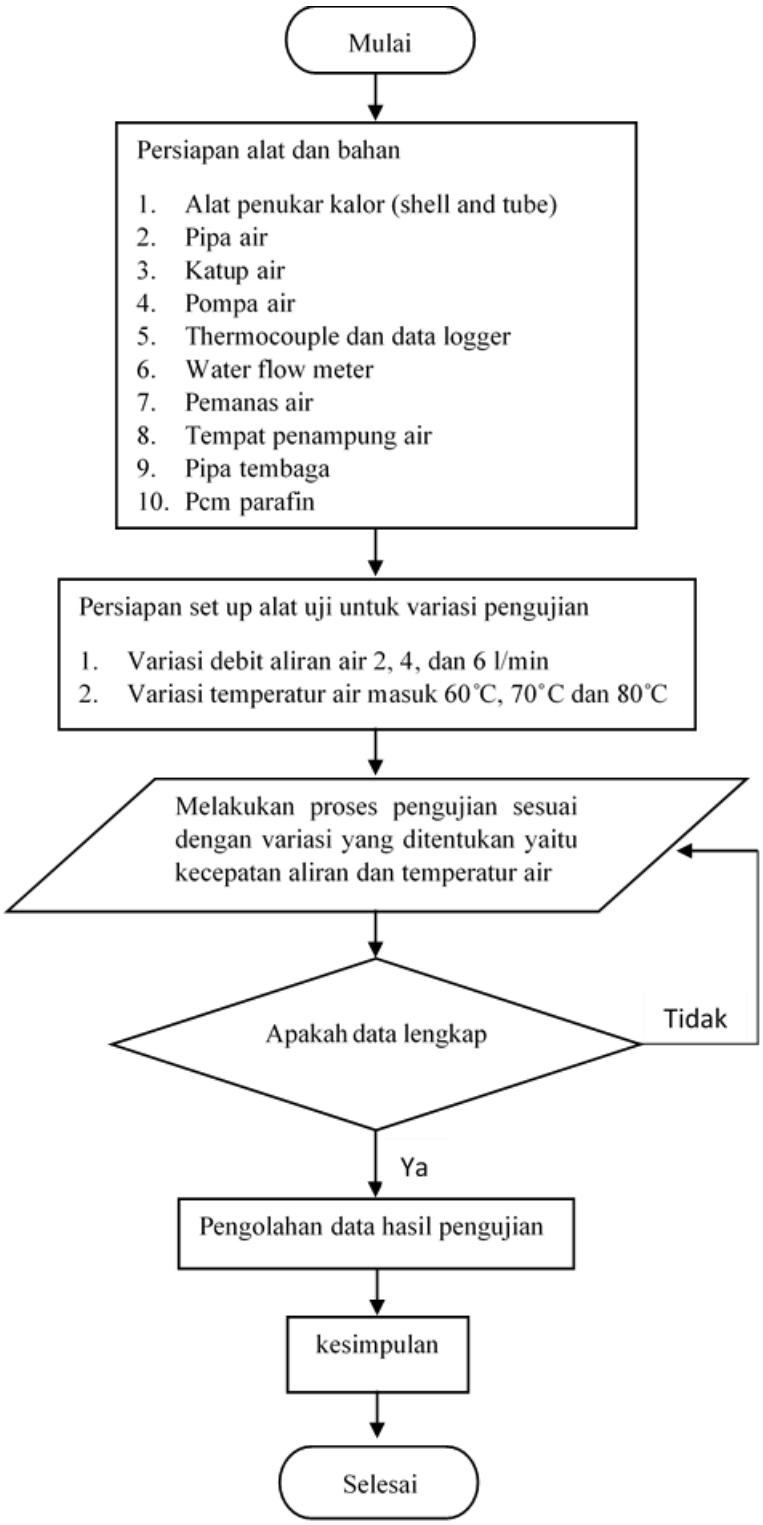
2. Bahan

   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



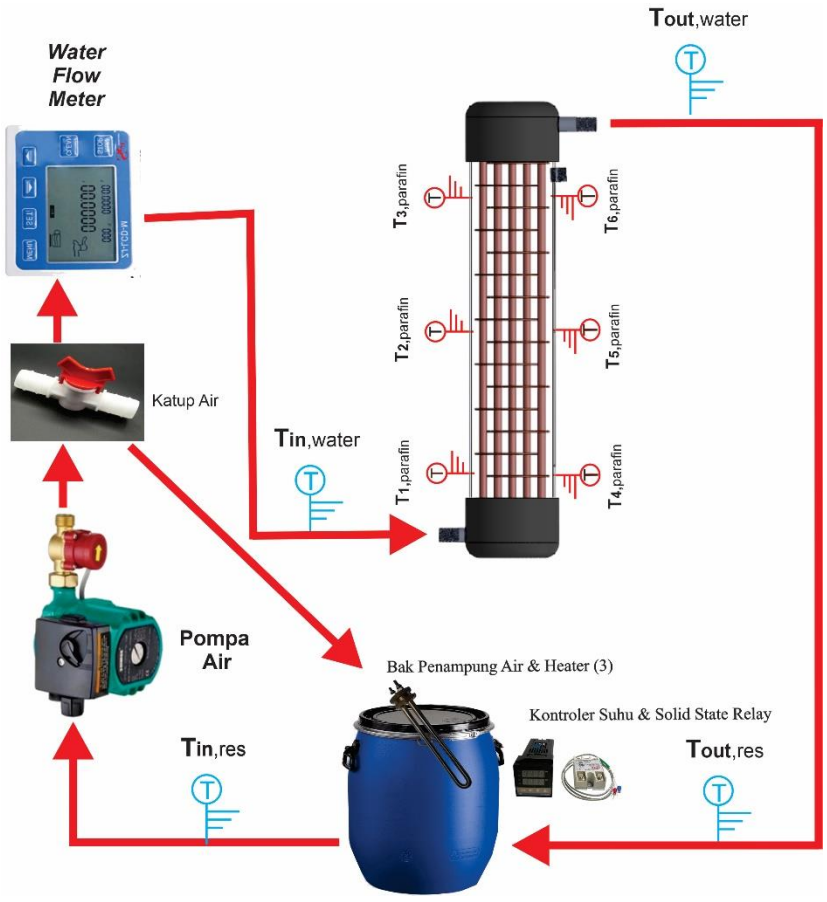
Gambar 3. 9 Diagram Alir Pembuatan *Shell and Tube*



Gambar 3. 10 Diagram Alir Pengujian

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 3.10 berikut ini:



Gambar 3. 11 Instalasi Alat Pengujian

3.6 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.
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 ºC dengan toleransi ±1ºC.
7. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 10 detik.
8. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat kecepatan aliran fluida.
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

1. Pada pengujian yang dilakukan, hasilnya menunjukan bahwa pada laju perpindahan panas terkecil didapatkan pada variasi temperatur 60˚C dengan aliran 2 l/min yaitu 218.59 watt, sedangkan yang terbesar didapatkan pada variasi temperatur 80˚C dengan aliran 6 l/min yaitu 1573.91 watt. Energi terbesar yang diserap oleh parafin terjadi pada temperatur 80°C dengan aliran 6 l/min, dengan nilai 629.0 kJ. Hal ini menunjukan bahwasannya pada variasi temperatur dan laju aliran yang masuk sangat mempengaruhi laju perpindahan panas yang terjadi. Dimana semakin besar temperatur dan laju aliran air yang masuk maka akan semakin besar pula laju perpindahan panas yang terjadi, yang mana meningkatkan proses pelelehan.
2. Pada proses pelehan parafin dari temperatur 32˚C sampai 57˚C yang terjadi pada pengujian ini diketahui bahwasannya terdapat perbedaan waktu pada setiap variasi temperatur dan variasi laju aliran air. Dari data tersebut dapat diketahui bahwasannya waktu tercepat terjadi pada variasi temperatur 80˚C dengan aliran 6 l/min yaitu 8 menit 30 detik dan waktu terlama terjadi pada variasi temperatur 60˚C dengan aliran 2 l/min yaitu 1 jam 4 menit 10 detik. Oleh karena itu variasi temperatur air dan laju aliran air yang masuk sangat berpengaruh terdahap waktu yang dibutuhkan untuk proses pelelehan parafin. Sehingga variasi dalam parameter-parameter ini dapat menghasilkan perubahan waktu yang signifikan dalam proses pelelehan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk dapat mengetahui nilai maksimum perpindahan panas yang terjadi, sebaiknya laju debit aliran air diperbesar.
2. Untuk kebutuhan penelitian selanjutnya, jika ingin mengetahui seberapa besar kalor yang dilepaskan ke suhu lingkungan sekitar, bisa dengan menambahkan titik pengukuran temperatur pada bagian pipa tube, sirip dan bagian luar pipa akrilik.

DAFTAR PUSTAKA

Adib, J. F., Mufarida, A., & Ahmad, E. N. (2016). Analisis Laju Perpindahan Panas Radiasi Pada Inkubator Penetastelur Ayam Berkapasistas 30 Butir. Dalam Jurnal Kajian Ilmiah Dan Teknologi Teknik Mesin.

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), 113–119.

Buchori, Luqman. 2004. Buku Ajar Perpindahan Panas Bagian I. Jurusaan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Semarang.

Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition*. Www.Technicalbookspdf.Comwww.Technicalbookspdf.Com

Dharmawan, A. D., Subiyanto, L., & Nugraha, A. T. (T.T.). *Elektriese: Jurnal Sains Dan Teknologi Elektro Implementasi Sistem Monitoring Pada Panel Listrik*. *12*, 2830–3512.

Fischer, U.R. 2006. *Thermal Conductivity and Melting Point Measurements on Parafin Zeolite Mixtures. Brandenburg University of Technology Cottbus*, PF 101344, 03013 Cottbus. Germany.

Incropera, F. P., Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, & David P. De Witt. (2011). *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer, Seventh Edition*.

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. and Jinlian Hu. 2008. *A Poly (Ethylene Glycol)-Based Smart Phase Change Material. Solar Energi Materials and Solar Cells* 92: 1260-1268.

Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., & Ashrafur Rahman, S. M. (2019). *Phase Change Materials (PCM) For Solar Energy Usages And Storage: An Overview*. Dalam *Energies* (Vol. 12, Nomor 16). MDPI AG.

Nadjib, M., & Selatan, J. L. (2016). Penggunaan Paraffin Wax Sebagai Penyimpan Kalor Pada Pemanas Air Tenaga Matahari Thermosyphon (Vol. 18, Nomor 3).

Ningsi, S. (2021). Metode Elemen Hingga Untuk Perpindahan Panas Konduksi *3* Pada Domain 2D Dengan Menggunakan Elemen Segitiga. *SAINTIFIK*, *7*(2).

Sarier, N., and Onder, E. 2012. *Organic Phase Change Material And Their Textile Application: An Overview. Thermochimica Acta* 540(2012) 7-60.

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).

Wahyono, W. and Rochani, I., (2019). Pembuatan Alat Uji Perpindahan Panas Secara Radiasi. Eksergi: Jurnal Teknik Energi, 15(2), pp.50-59.

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.