

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

(SKRIPSI)

Oleh:

ARAHMAN SAPUTRA



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

2024

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

**OLEH:
ARAHMAN SAPUTRA**

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 PERPINDAHAN KALOR PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL

Oleh:

Arahman Saputra

Pemanas air tenaga surya (*solar water heater*) merupakan sumber energi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pemanas air dengan mengubahnya menjadi energi termal. Salah satu media penyimpanan energi termal adalah *phase change material* (PCM) dimana dapat mengalami proses *reversible* dari proses peleburan (*melting*) maupun pembekuan (*solidifikasi*) sehingga dapat dimanfaatkan untuk mempertahankan suhu konstan selama periode waktu tertentu. Energi kalor ini diserap dan dilepaskan menggunakan alat penukar kalor berjenis *Shell and Tube Heat Exchanger*. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan sistem aliran terbuka dan tertutup 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 pembekuan parafin. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa semakin besar variasi debit aliran air, maka laju perpindahan panas akan semakin besar yang memungkinkan parafin mencapai titik beku lebih cepat. Waktu pembekuan parafin dari suhu awal 60°C hingga melewati titik beku 40°C tercatat proses pembekuan tercepat pada variasi aliran terbuka dengan debit aliran 6 l/min, dalam waktu 11 menit 40 detik. Dengan demikian, alat ini terbukti mampu mencapai perubahan suhu dengan efektif, tergantung pada variasi sistem aliran dan debit aliran air yang digunakan.

Kata Kunci: Pemanas air, PCM, Parafin, Perpindahan Panas

ABSTRACT

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

By:

Arahman Saputra

Solar water heater is an 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 can undergo a reversible process of melting and solidification so that it can be utilized to maintain a constant temperature over a period of time. This heat energy is absorbed and released using a Shell and Tube Heat Exchanger. This research was conducted by varying the open and closed flow systems 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 freezing time. The results of the study show that the greater the variation in water flow discharge, the greater the heat transfer rate which allows the paraffin to reach freezing point faster. The paraffin freezing time from the initial temperature of 60°C to the freezing point of 40°C was recorded as the fastest freezing process in the open flow variation with a flow rate of 6 l/min, in 11 minutes 40 seconds. Thus, the device proved to be able to achieve temperature changes effectively, depending on the variation of the flow system and the water flow rate used.

Keywords: Water heater, PCM, Paraffin, Heat Transfer

Judul Skripsi : **KAJIAN EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL**

Mahasiswa : **Arahman Saputra**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021047

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing


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

NIP. 197112142000121001

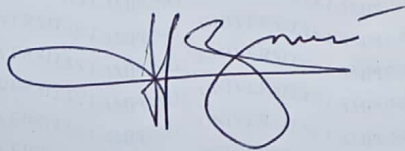

Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

NIP. 199301102019031008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan

Teknik Mesin

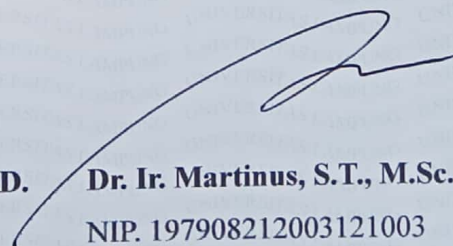


Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197108171998021003

Ketua Program Studi

S1 Teknik Mesin



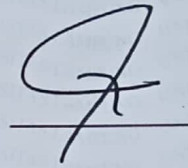
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.

NIP. 197908212003121003

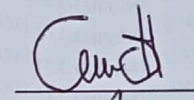
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

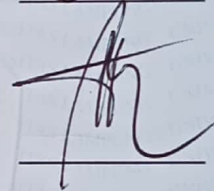
Ketua : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



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



Penguji Utama : **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: 5 Juli 2024

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul “KAJIAN EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL” 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, 15 Juli 2024

Pembuat Pernyataan



Arahman Saputra

NPM. 2015021047

MOTO

“Spirit Like A Sea Brave Like A Mountain”

(MATALAM)

“Tetap Berbisik Kebumi, Agar Terdengar di Penghuni Langit”

(Ngerek Dolot)

“Ubah hidupmu hari ini, Jangan bertaruh pada masa depan, Bertindaklah sekarang
tanpa menunda”

(Simone de Beauvoir)

“Terkadang dalam hidup kita dihadapkan dengan sebuah pilihan, Namun jangan
penah menyesali apapun pilihan yang kita ambil, Percayalah semua sudah ada
jalannya”

(Tunut Manut)

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 Suhaimi dan Ibu Sukinam 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.T. 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 SYLVESTER METANOIA yang terdiri dari Cenang, Gumas, Bedegong, dan Dupa yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita semua dapat sukses dan dapat bertemu kembali dikemudian hari.
10. Keluarga besar grup TA lurr yang terdiri dari Bayu, Alfito, dan Agung yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
11. Keluarga besar grup sing penting KP yang terdiri dari Alfito, Gumas, dan Pico yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan dukungan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga yang sudah lulus dimudahkan untuk mendapatkan pekerjaan, dan yang masih berjuang dalam tugas akhir dilancarkan penelitiannya.
12. Teman-teman Teknik Mesin 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 Bandar Lampung, pada tanggal 22 Juni 2002 sebagai anak pertama, dari pasangan Bapak Suhaimi dan Ibu Sukinam. Penulis menempuh Pendidikan Dasar di SD NEGERI 1 SUKABUMI INDAH BANDAR LAMPUNG hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 24 BANDAR LAMPUNG yang diselesaikan tahun 2017, dan SMK NEGERI 7 BANDAR LAMPUNG 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 Mahasiswa Teknik Pecinta Alam (MATALAM) dari tahun 2021. Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di PT Geo Dipa Energi (Persero) Unit Patuha Tahun 2023 dengan judul laporan **“ANALISIS EFEKTIVITAS *COOLING TOWER* SEBELUM DAN SESUDAH PERGANTIAN *FAN* DI PT. GEO DIPA ENERGI (PERSERO) UNIT PATUHA”**.

Tahun 2023 penulis melakukan penelitian dengan judul **“KAJIAN EKSPERIMENTAL PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI HORIZONTAL”** dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Perpindahan Panas	5
2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi	5
2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi	7
2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi	8
2.2 Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchanger</i>)	8
2.2.1 Aliran Searah (<i>Co-Current</i>)	9
2.2.2 Berlawanan Arah (<i>Counter-Current</i>)	9
2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor	10
2.3.1 <i>Double Pipe Heat Exchanger</i>	10
2.3.2 <i>Shell and Tube</i>	11
2.4 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	13
2.5 Material Berubah Fasa (<i>Phase Change Materials</i>)	14
2.6 Klasifikasi PCM	15
2.6.1 PCM Organik	15
2.6.2 PCM Anorganik	15
2.6.3 PCM <i>Eutectic</i>	16
2.7 Parafin	16
2.8 Sifat-sifat Parafin	18

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Tempat Pelaksanaan	21
3.2 Waktu Pelaksanaan	21
3.3 Alat dan Bahan	22
3.4 Diagram Alir	29
3.5 Skema Pengujian	32
3.6 Penempatan Titik Pengukuran	34
3.7 Metode Pengambilan Data	34
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Hasil Pengambilan Data	37
4.1.1 Temperatur Air Masuk dan Keluar Alat Penukar Kalor.....	37
4.1.2 Temperatur Parafin.....	38
4.1.3 Proses Pembekuan Parafin.....	41
4.1.4 Temperatur Penampungan Air	42
4.1.5 Waktu Parafin Mencapai Titik Beku.....	43
4.2 Hasil Perhitungan	45
4.2.1 Laju Perpindahan Panas Air.....	45
4.2.2 Bilangan Reynold	48
4.2.3 Perhitungan Energi	50
BAB 5 PENUTUP.....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi	6
Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi	7
Gambar 2.3 Profil temperatur aliran <i>co-current</i>	9
Gambar 2.4 Profil temperatur aliran <i>counter-current</i>	10
Gambar 2.5 Aliran <i>double pipe heat exchanger</i>	10
Gambar 2.6 <i>Shell and tube heat exchanger (one shell pass and two tube passes)</i>	11
Gambar 2.7 <i>Shell and tube heat exchanger (two shell passes and four tube passes)</i>	12
Gambar 2.8 <i>Shell and tube heat exchanger</i>	12
Gambar 2.9 (a) Parafin padat (b) Parafin cair	17
Gambar 3.1 Selang pipa air panas.....	23
Gambar 3.2 Penampung air.....	23
Gambar 3.3 Data <i>logger</i> dan <i>thermocouple</i>	24
Gambar 3.4 Pompa air.....	25
Gambar 3.5 <i>Water flow meter</i>	26
Gambar 3.6 Katup air.....	26
Gambar 3.7 Aluminium <i>foil</i>	27
Gambar 3.8 Alat penukar kalor <i>shell and tube</i>	28
Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan <i>shell and tube</i>	30
Gambar 3.10 Diagram alir pengujian.....	31
Gambar 3.11 Skema pengujian sistem aliran terbuka	32
Gambar 3.12 Skema pengujian sistem aliran tertutup	33
Gambar 3.13 Titik pengukuran pada <i>shell and tube</i>	34
Gambar 4.1 Grafik selisih nilai rata-rata ΔT air alat penukar kalor.....	37
Gambar 4.2 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin variasi aliran terbuka.....	39
Gambar 4.3 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin variasi aliran tertutup pada suhu air 38°C.....	40

Gambar 4.4 (a) Pembekuan awal parafin (b) Pembekuan tengah parafin (c) Pembekuan akhir parafin.....	41
Gambar 4.5 Grafik perbandingan temperatur rata-rata pada penampungan air..	42
Gambar 4.6 Grafik perbandingan waktu parafin membeku.....	44
Gambar 4.7 Grafik perbandingan laju perpindahan panas air.....	47
Gambar 4.8 Perbandingan energi air dan parafin pada variasi aliran terbuka	52
Gambar 4.9 Perbandingan energi air dan parafin pada variasi aliran tertutup.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Data <i>Logger</i>	24
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Thermocouple</i>	24
Tabel 3.3 Spesifikasi Pompa Air	25
Tabel 3.4 Spesifikasi <i>Water Flow Meter</i>	26
Tabel 3.5 Ukuran Alat Penukar Kalor	28
Tabel 4.1 Data Laju Perpindahan Panas	46
Tabel 4.2 Perhitungan Bilangan Reynolds	49
Tabel 4.3 Energi yang Diserap Air	50
Tabel 4.4 Energi yang Dilepas Parafin	51

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanas air (*water heater*) merupakan perangkat yang umum digunakan dalam memanaskan air untuk keperluan domestik seperti halnya untuk mencuci alat dapur, hingga untuk kebutuhan mandi. Sedangkan pada keperluan industri pemanas air digunakan dalam proses produksi mulai dari pabrik makanan, kimia, industri farmasi, penyediaan air panas pada kolam renang ataupun hotel, dan untuk kegiatan proses lainnya. Pada umumnya alat pemanas air masih menggunakan sumber utama berupa bahan bakar fosil sehingga dibutuhkan suatu alat, untuk mendapatkan air panas dengan cara yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis (Ganang, 2018). Penggunaan pemanas air tenaga surya (*Solar Water Heater*) di dunia saat ini sudah berkembang sangat pesat. Potensi energi panas matahari di Indonesia sekitar 4,8 KWh/m² (Nadjib, 2023). Dalam memanfaatkan energi matahari sebagai pemanas air maka dibutuhkan sebuah perangkat kolektor surya untuk dapat mengumpulkan panas dari energi matahari yang nantinya akan diubah menjadi energi termal. Namun energi matahari ini memiliki waktu tertentu untuk dapat dimanfaatkan. Maka diperlukan sebuah media yang dapat menyimpan energi termal pada sistem pemanas air tenaga surya tersebut.

Salah satu media penyimpanan energi termal adalah *phase change material* (PCM). Dimana *phase change material* dapat mengalami proses *reversible* dari proses peleburan (*melting*) maupun pembekuan (solidifikasi) yang dapat dimanfaatkan untuk mempertahankan suhu konstan selama periode waktu tertentu, sehingga dapat dimanfaatkan pada

aplikasi penyimpanan panas laten (Mofijur, 2019). Salah satu *phase change material* yang dapat digunakan untuk menyimpan energi termal yaitu berupa parafin yang memiliki sifat termal yang baik, dan juga tidak beracun serta tidak mudah bereaksi dengan wadah penampungan yang akan dipakai. Hal yang dapat mendukung pengaplikasian lilin parafin ini dikarenakan harganya yang tergolong murah dan banyak tersedia di pasaran (Adriyanto dkk., 2022).

Parafin dapat berubah fase yaitu terjadi dalam bermacam bentuk dengan melibatkan wujud benda padat-padat, padat-cair, padat-gas, dan cair-gas. Dimana dari berbagai wujud pada perubahan fase tersebut, perubahan fase padat-cair memiliki kapasitas penyimpanan panas laten yang lebih tinggi dengan perubahan volume dan temperatur kecil selama transisi dibandingkan dengan perubahan fase bentuk padat-padat. Parafin sendiri mempunyai konduktivitas termal sebesar 0,2 W/m.K dengan titik leleh yaitu 51°C sampai 60°C, serta kalor laten 170 kJ/kg (Yuliani, 2016). Besar nilai perpindahan kalor yang terjadi pada parafin hingga beku atau bisa disebut dengan proses pembekuan. Pada penelitian sebelumnya penggunaan *heat exchanger* untuk mengetahui nilai perpindahan kalor pada parafin hanya menggunakan jenis *double pipe* dan menggunakan beberapa variasi sirip. Sedangkan pada penelitian ini akan menggunakan *heat exchanger* jenis *shell and tube* dengan posisi horizontal yang terdiri dari *shell* silinder dengan seikat tabung didalamnya.

Hal inilah yang melatarbelakangi kegiatan penelitian ini yang berjudul **“Kajian Eksperimental Perpindahan Kalor Proses Pembekuan PCM Parafin Pada *Shell and Tube Heat Exchanger* Dengan Posisi Horizontal”**. Dimana pada penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya yang hanya dengan menggunakan *double pipe* pada proses *heat exchanger* nya dan pada penelitian ini digunakan PCM jenis parafin sebagai penyimpanan energi termal dimana memiliki sifat-sifat yang baik dan memungkinkan jika dikembangkan lebih lanjut.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik perpindahan panas dari parafin ke fluida air pada proses pembekuan.
2. Mengetahui waktu yang dibutuhkan dalam proses perpindahan panas ke fluida air sehingga mengalami perubahan fasa dari cair menjadi padat.

1.3 Batasan Masalah

Dalam proses penelitian ini 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 (101 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 sistem aliran terbuka dan tertutup.
7. Temperatur fluida air yang digunakan yaitu *ambient*.

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 dari 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 PEMBAHA

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

5. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB 2

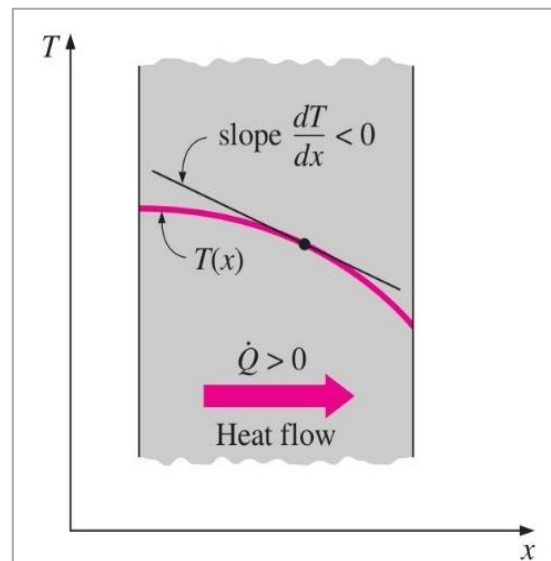
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

Perpindahan panas atau perpindahan kalor merupakan berpindahnya suatu kalor dari benda dengan suhu tinggi ke benda dengan suhu yang rendah dan terjadi secara alami maupun secara paksa. Perpindahan panas adalah perpindahan energi dari satu tempat ke tempat lain karena perbedaan suhu (Adib dkk., 2016). Proses terjadinya perpindahan panas dapat dilakukan secara langsung, yaitu fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida yang dingin. Perbedaan temperatur merupakan potensi utama terjadinya perpindahan energi dalam bentuk panas yang sering lebih populer disingkat dengan perpindahan panas. Ada 3 (tiga) cara pada perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi merupakan proses perpindahan panas dimana panas yang mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium padat, cair, dan gas. Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena interaksi molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Kecepatan gerak molekul media perpindahan panas konduksi berupa gas lebih besar dari gerak molekul cairan, namun jarak antara molekul-molekul cairan lebih pendek dari jarak antara molekul pada fasa gas (Buchori, 2004).



Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi
(Cengel, 2003)

Perpindahan panas konduksi yang terjadi pada permukaan dinding dapat dilihat pada Gambar 2.1 diatas. Perpindahan panas secara konduksi satu dimensi dalam keadaan studi dapat ditulis menggunakan persamaan berikut:

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

Dimana:

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

A : Luas penampang (m^2)

k : Konduktivitas thermal ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

T : Temperatur (K)

x : Tebal (m)

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

$$\dot{Q} = -kA_r \frac{dT}{dx} = -2k\pi r l \frac{dT}{dr} \quad (2.2)$$

Dimana:

A_r : Luas permukaan silinder (cm^2)

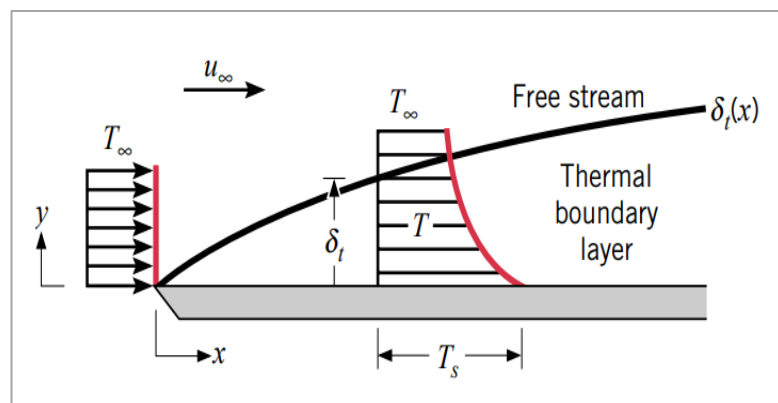
r : Jari-jari silinder (cm)

l : Panjang silinder (cm)

2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya dengan menggunakan media pengantar berupa fluida (cairan atau gas). Semakin cepat Gerakan fluida, semakin besar perpindahan panas konveksi (Cengel,2003). Perpindahan panas konveksi secara umum dibagi menjadi 2 macam, yaitu:

- Konveksi bebas, dimana disebabkan oleh beda kerapatan dan beda temperatur serta tidak ada tenaga dari luar yang mendorong.
- Konveksi paksa, dimana perpindahan panas yang alirannya dipengaruhi oleh gaya dari luar atau gaya tambahan.



Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi

(Incropera, 2007)

Perpindahan panas secara konveksi dasar Hukum Newton yaitu dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut:

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

Dimana:

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

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

- A : Luas permukaan perpindahan panas (m^2)
 T_s : Suhu permukaan ($^{\circ}C$)
 T_{∞} : Suhu fluida di sekitarnya ($^{\circ}C$)

2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah 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, 2007). Panas radiasi dipancarkan oleh suatu benda dalam bentuk kumpulan (*batch*) energi yang terbatas atau quanta. Perpindahan panas secara radiasi dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

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

Dimana:

- \dot{Q}_{rad} : Laju perpindahan panas radiasi (W)
 ε : Koefisien Emisivitas ($0 < \varepsilon < 1$)
 σ : Konstanta Stefan-Bolzman $5,67 \times 10^{-8}$ ($W/m^2 \cdot K^4$)
 A : Luas permukaan (m^2)
 T : Suhu permukaan benda ($^{\circ}K$)

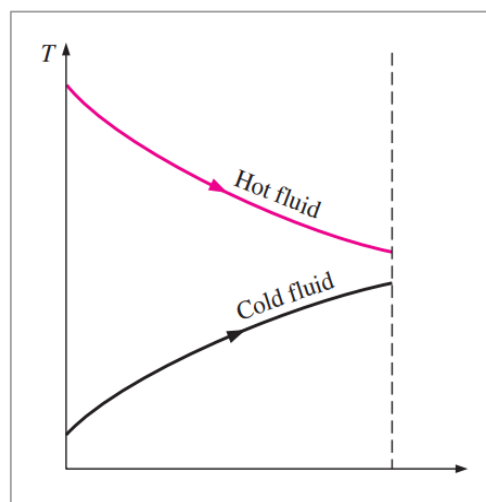
2.2 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

Penukar kalor atau *heat exchanger* (HE) merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk menurunkan dan 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. Tujuan dari alat penukar kalor tersebut yaitu untuk mengontrol suatu sistem (temperatur) dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya. Terdapat

dua aliran penukar panas yaitu penukar panas dengan aliran searah (*co-current*) dan penukar panas dengan aliran berlawanan arah (*counter-current*) (Cengel, 2003).

2.2.1 Aliran Searah (*Co-Current*)

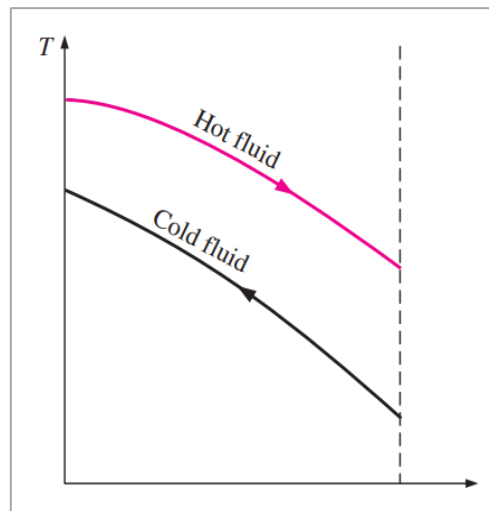
Penukar panas jenis ini, yaitu dimana kedua fluida (dingin dan panas) masuk pada sisi penukar yang sama dan mengalir dengan arah yang sama dan keluar pada sisi yang sama pula. Pada penukar panas ini memiliki karakteristik yaitu temperatur fluida dingin yang keluar dari alat penukar panas tidak dapat melebihi temperatur fluida panas yang keluar dari alat penukar panas, dan diperlukan media pendingin atau pemanas yang banyak.



Gambar 2.3 Profil temperatur aliran *co-curent*
(Cengel, 2003)

2.2.2 Berlawanan Arah (*Counter-Current*)

Penukar panas pada jenis ini yaitu kedua fluida (panas dan dingin) masuk dan keluar pada sisi yang berlawanan. Dimana temperatur fluida dingin yang keluar dari penukar panas lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur fluida panas yang keluar dari penukar kalor, maka dianggap lebih baik dari aliran searah.

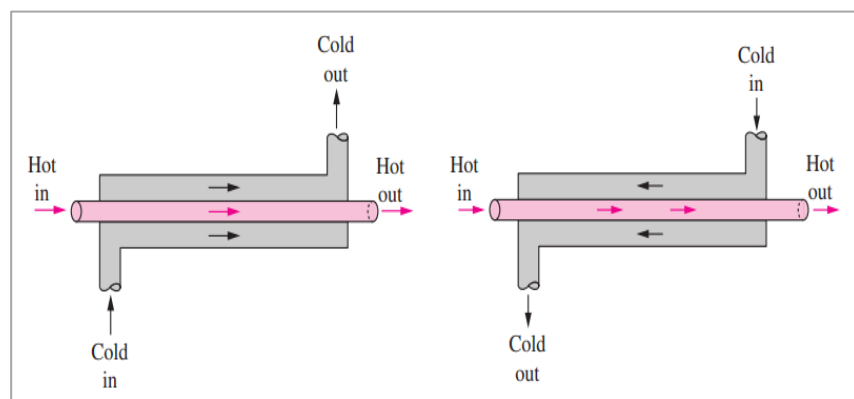


Gambar 2.4 Profil temperatur aliran *counter-current*
(Cengel, 2003)

2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor

Adapun jenis-jenis yang ada pada penukar kalor (*heat exchanger*) yaitu antara lain:

2.3.1 *Double Pipe Heat Exchanger*



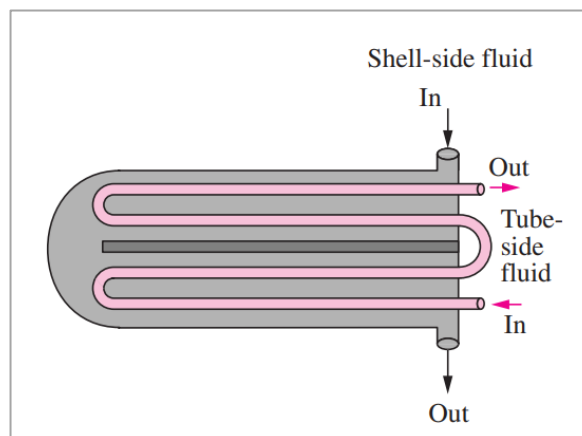
Gambar 2.5 Aliran *double pipe heat exchanger*
(Cengel, 2003)

Tipe pipa rangkap (*Double pipe heat exchanger*) adalah alat penukar kalor, dimana suatu aliran fluida dalam pipa mengalir dari

titik sisi satu ke sisi lain. Cairan yang mengalir dapat berupa aliran searah atau aliran berlawanan. Alat *heat exchanger* ini dapat dibuat dari pipa yang panjang dan dihubungkan satu sama lain. *Double pipe heat exchanger* merupakan alat yang cocok dikondisikan untuk aliran dengan laju aliran yang kecil.

2.3.2 *Shell and Tube*

Shell and tube adalah jenis penukar kalor yang terdiri dari sebuah tabung (*shell*) yang di dalamnya tersusun pipa (*tube*). Jenis alat penukar kalor ini, fluida panas mengalir di dalam *tube* sedangkan fluida dingin mengalir di luar *tube* atau di dalam *shell* atau sebaliknya. Dikarenakan kedua aliran fluida melintasi penukar kalor hanya sekali, maka susunan ini disebut penukar kalor satu lintas (*single-pass*). Dimana jika kedua fluida yaitu mengalir dalam arah yang sama, maka penukar kalor ini bertipe aliran searah (*parallel flow*). Jika mengalir dalam arah yang berlawanan, maka penukar kalor ini bertipe aliran berlawanan.

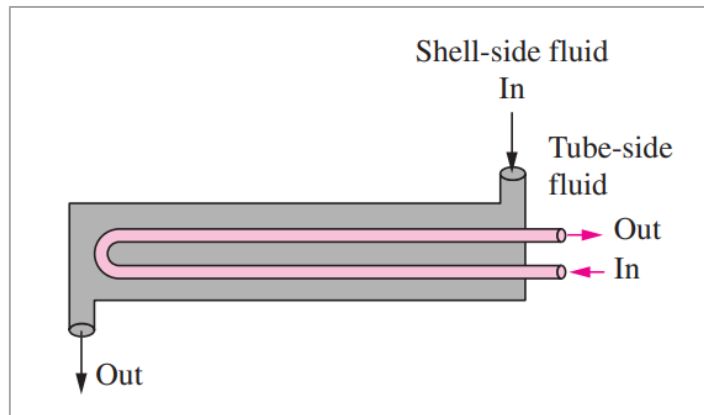


Gambar 2.6 *Shell and tube heat exchanger (one shell pass and two tube passes)*

(Cengel, 2003)

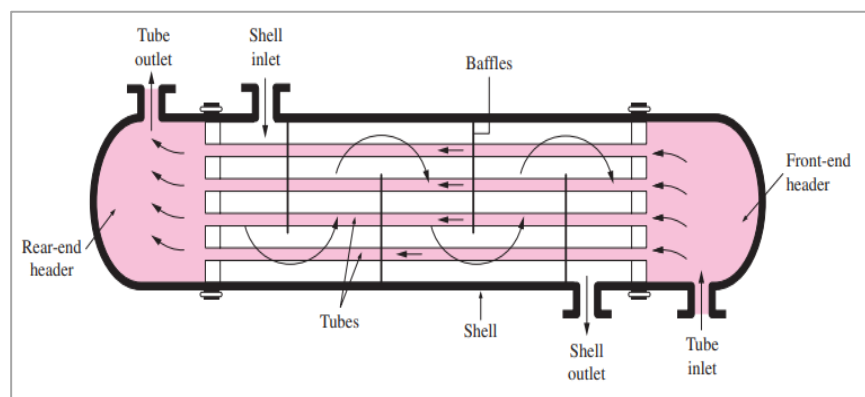
Di dalam penukar kalor kita mengenal koefisien perpindahan panas total atau biasa dituliskan dengan U dan ini identic dengan

koefisien perpindahan panas konveksi h dimana sama-sama memiliki satuan $W/m^2 \cdot ^\circ C$.



Gambar 2.7 *Shell and tube heat exchanger (two shell passes and four tube passes)*
(Cengel, 2003)

Shell and tube exchanger biasanya digunakan dalam kondisi tekanan relatif tinggi, yang terdiri dari sebuah selongsong, dimana di dalamnya disusun suatu *annulus* dengan rangkaian tertentu (untuk mendapatkan luas permukaan yang optimal). Fluida mengalir di dalam slongsong maupun di dalam *annulus* sehingga terjadi proses perpindahan panas antara fluida dengan dinding *annulus* misalnya *triangular pitch* (pola segitiga) dan *square pitch* (pola segiempat).



Gambar 2.8 *Shell and tube heat exchanger*
(Cengel, 2003)

2.4 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.4.1 Panas yang Diserap

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

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

Dimana:

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

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

c_p : Panas spesifik (J/kg.°C)

ΔT : Perbedaan temperatur (°C)

Untuk mengetahui kinerja perpindahan panas yang terjadi yaitu dengan cara mengetahui panas masuk dan kapasitas penyimpanan panas dari fluida lainnya, dalam hal ini yaitu air. Persamaan yang digunakan yaitu sebagai berikut:

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

Dimana:

E_{air} : Energi air (Joule)

t : Waktu perpindahan panas (s)

Perlu diketahui dalam menghitung laju perpindahan panas dan juga energi, diperlukan massa jenis atau densitas dari bahan yang digunakan dalam proses perpindahan panas. Persamaan pada massa jenis yaitu sebagai berikut:

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

Dimana:

ρ : Massa jenis (kg/m³)

m : Massa benda (kg)

v : Volume benda (m^3)

2.5 Material Berubah Fasa (*Phase Change Materials*)

Material berubah fasa atau dikenal sebagai *phase change materials* (PCM) yang juga sering disebut bahan-bahan penyimpan panas laten. Panas laten adalah bahan yang mempunyai kemampuan untuk melepaskan energi panas yang sangat tinggi dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa perubahan suhu (Meng,2008). Perubahan pada fasa tersebut dapat berupa benda padat menjadi cair ataupun sebaliknya. *Phase change materials* (PCM) sering ditemui di dalam kehidupan sehari-hari misalnya asam lemak, minyak nabati, garam hidrat, dan parafin atau yang biasa digunakan sebagai bahan baku lilin. Saat temperatur meningkat, ikatan kimia pada molekul PCM akan lepas. Pada PCM padat-cair material tersebut akan meleleh atau mencair. Dalam perubahan fasa ini terjadi reaksi endotermik ketika temperatur naik, sebaliknya pada saat temperatur turun maka PCM akan membeku yang diiringi reaksi isotermik, yaitu artinya terjadi proses pelepasan kalor hingga proses pembekuan selesai (Kusumah, 2020).

Phase change materials (PCM) merupakan satu cara penyimpanan energi panas yang paling efisien. PCM juga dapat digunakan untuk penyimpanan energi dan kontrol suhu. Dimana PCM dapat melepaskan panas lebih 4-5 kali setiap satuan volume dibandingkan bahan penyimpanan energi konvensional seperti air atau batu (Sharma, 2009). Kelebihan yang dimiliki dari PCM adalah harga yang ekonomis, mudah ditemukan, dan dapat digunakan secara terus menerus selama struktur materialnya tidak berubah (Amin, 2016). PCM sebagai penyimpan energi termal memanfaatkan panas laten pada proses perubahan fasa untuk menyerap panas maupun melepaskan panas. Energi yang diserap oleh PCM pada *range* temperatur perubahan fasa jauh lebih besar apabila dibandingkan

dengan memanfaatkan panas *sensible*. Potensi udara dingin pada malam hari perlu dimanfaatkan untuk membantu pendinginan ruangan dengan menggunakan alat penukar kalor yang berisi PCM. Untuk dapat mengetahui karakteristik perpindahan panas dan kinerja alat penukar kalor perlu dilakukan penelitian. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan laju aliran udara terhadap waktu pembekuan PCM (Irsyad, 2018).

2.6 Klasifikasi PCM

Secara luas PCM di klasifikasikan menjadi 3 (tiga) bagian yaitu solid-liquid, liquid-gas, dan solid-gas. Dimana jenis-jenis PCM tersebut solid liquid merupakan PCM yang paling sering digunakan sebagai *thermal energy storage*. Secara umum PCM solid-liquid diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) bagian yaitu PCM senyawa organik, senyawa anorganik dan *eutectic* (Zhou, 2011).

2.6.1 PCM Organik

Material berubah fasa organik terdiri dari parafin dan *non* paraffin. Bahan organik termasuk dalam bahan yang dapat melebur dan membeku berulang kali tanpa adanya pengurangan volume dan juga biasanya tidak korosif. Lilin paraffin terdiri dari campuran dengan rumus kimia $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$. *Non-organik* paraffin adalah yang paling banyak dari bahan fase perubahan dengan sifat yang sangat bervariasi.

2.6.2 PCM Anorganik

Bahan anorganik dapat lebih diklasifikasikan sebagai *salt hydrate* dan *metallics*. *Stearid acid* ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) yang menjadi material berubah fasa yang termasuk kedalam golongan inorganik.

2.6.3 PCM *Eutectic*

Eutectic merupakan komposisi minimum peleburan dari dua atau lebih komponen, masing-masing melebur dan membeku secara sejalan membentuk campuran darkristal komponen selama proses kristalisasi. *Eutectic* dapat dikatakan juga gabungan antara dua material PCM atau lebih untuk dapat menghasilkan material PCM baru. Syarat dari penggabungan kedua material ini yaitu kedua materialnya harus dapat bercampur rata (tidak memisah) dan harus memiliki temperatur leleh dan temperatur beku yang sama sehingga pada saat PCM mengalami pembekuan dan peleburan pada kedua material tersebut dapat berlangsung secara bersamaan.

2.7 Parafin

Parafin merupakan bagian dari hidrokarbon alkana yaitu dengan formula C_nH_{2n+2} . Parafin didapatkan dari proses destilasi pada minyak bumi yang mana hasil dari destilasinya masih banyak mengandung hidrokarbon. Parafin memiliki kandungan atom C yang berbeda-beda, semakin banyak kandungan atom C maka rantai karbonnya akan semakin panjang sehingga membuat fasa parafin akan semakin padat. Parafin dengan kandungan atom C_5 - C_{15} merupakan parafin dengan fasa cair, sedangkan parafin dengan kandungan atom karbon lebih dari C_{15} merupakan parafin dengan fasa padat atau yang biasa disebut parafin *wax*.

Dimana parafin padat mempunyai temperatur leleh antara 51°C sampai 57°C dan mempunyai panas laten yang cukup tinggi sehingga dimanfaatkan sebagai penyimpanan energi termal. Hal tersebut terjadi disebabkan karena parafin mudah menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi termal yang ditandai dengan perubahan fasa dari bentuk padat menjadi cair atau sebaliknya.



Gambar 2.9 (a) Parafin padat (b) Parafin cair

Parafin cukup banyak digunakan sebagai media untuk penyimpanan energi termal. Hal ini dikarenakan parafin memiliki banyak keunggulan dibandingkan material perubah fasa yang lainnya. Energi yang disimpan oleh parafin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_{par} = m_{(liquid)} \times C_{p(liquid)} \times (T_m - T_f) + m_{par(Total)} \times L + m_{(solid)} \times C_{p(solid)} \times (T_i - T_m) \quad (2.8)$$

Dimana:

E_{par} : Energi Parafin (Joule)

T_m : Temperatur Tengah Parafin ($^{\circ}\text{C}$)

T_i : Temperatur Awal ($^{\circ}\text{C}$)

T_f : Temperatur Akhir Parafin ($^{\circ}\text{C}$)

L : Kalor Peleburan (kJ/kg)

Penggunaan parafin sebagai penyimpanan energi termal memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan parafin merupakan keuntungan bagi penggunaannya, sedangkan kerugian dari parafin merupakan masalah yang harus diatasi bila digunakan sebagai penyimpanan energi termal. Karena itu, pemilihan material PCM sebagai penyimpanan energi termal harus diperhatikan. Berikut ini kelebihan dan kekurangan parafin sebagai penyimpanan energi termal.

1. Kelebihan

Kelebihan parafin sebagai penyimpanan energi termal yaitu tidak menunjukkan perubahan sifat termal setelah penggunaan terus menerus, memiliki panas laten yang tinggi, tidak mengalami proses *supercooling*, *non-reaktif*, tidak berbau, aman lingkungan, tidak beracun, cocok untuk penyimpanan dalam wadah logam, dan cocok untuk digunakan dalam penyimpanan energi termal dengan berbagai tipe (Sarier, 2012).

2. Kelemahan

Kelemahan parafin sebagai penyimpanan energi termal yaitu memiliki konduktivitas termal yang rendah pada fasa padat sehingga menjadi masalah ketika digunakan sebagai penyimpanan energi termal, namun masalah ini dapat diatasi dengan menambahkan material logam pada parafin untuk meningkatkan konduktivitas termal. Selain itu, parafin memiliki sifat mudah terbakar, sehingga dalam perancangan tangki penyimpanan parafin harus lebih dapat diperhatikan (Sharma, 2005).

2.8 Sifat-sifat Parafin

Sifat-sifat didalam parafin merupakan suatu karakteristik yang terdapat didalam parafin. Karakteristik tersebut juga dapat berupa massa jenis, panas spesifik, konduktivitas termal, panas laten, dan temperatur leleh pada parafin. Adapun sifat-sifat parafin yaitu sebagai berikut:

1. Massa Jenis

Massa jenis parafin adalah 880 kg/m^3 pada 20°C . Kepadatan parafin dapat meningkat pada temperatur rendah. Peningkatan densitas ini disebabkan oleh penyusutan parafin, atau peningkatan kerapatan massa sehingga volume pada parafin berkurang. Parafin juga dapat mengalami penurunan massa jenis ketika temperatur tinggi, hal ini dikarenakan parafin memuai pada temperatur tinggi sehingga

membuat volume parafin menjadi meningkat (Inouye, 1934). Oleh karena itu, penggunaan parafin sebagai suatu penyimpanan energi termal harus diperhatikan, terutama dalam mengenai volume parafin yang mengambang.

2. Panas Spesifik

Panas spesifik dalam parafin pada suatu fasa padat yaitu 2 kJ/kg.K sedangkan pada fasa cair memiliki panas spesifik yaitu 2,2 kJ/kg.K (Data sheet RT50, 2020). Saat parafin digunakan sebagai penyimpanan energi termal maka jumlah panas yang dapat diserap cukup besar sesuai dengan jumlah massa parafin yang digunakan. Namun waktu yang dibutuhkan untuk melepaskan panas menjadi lebih lama, hal tersebut dikarenakan saat panas spesifik pada fasa cair lebih besar dari pada fasa padat (Fischer, 2006).

3. Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal didalam parafin sangat rendah yaitu 0.232 W/m.K. Sehingga laju perpindahan panas ketika penyerapan maupun pelepasan panas akan menjadi sangat lambat. Konduktivitas termal pada parafin dapat juga ditingkatkan dengan mencampurkan parafin dengan bahan konduktivitas termal yang tinggi.

4. Panas Laten

Parafin merupakan bahan perubah fasa dengan panas laten yang relative tinggi. Nilai pada panas laten parafin dapat bervariasi tergantung jumlah pada ikatan karbon. Panas laten pada parafin yang tinggi menguntungkan sebagai penyimpanan energi termal, karena pada dasarnya bahan dengan panas laten yang tinggi dapat menyerap dan menyimpan panas lebih banyak dan lebih baik tanpa perubahan suhu.

5. Temperatur Leleh

Pada parafin sendiri memiliki temperatur leleh yang berbeda-beda bergantung pada jumlah ikatan didalam atom karbonnya. Dimana semakin tinggi kandungan atom karbon pada parafin maka temperatur lelehnya akan semakin tinggi begitupun sebaliknya. Hal ini dikarenakan jumlah ikatan pada atom karbon yang banyak memiliki rantai karbon yang semakin panjang dan membentuk molekul yang lurus dan beraturan. Maka akibatnya, persinggungan antar molekul semakin kuat sehingga diperlukan energi yang besar dan dapat dicapai pada temperatur tinggi untuk mengalahkan gaya-gaya tersebut.

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 dan memberikan kalor. Bahan baku PCM yang digunakan pada penelitian ini yaitu parafin. Hal ini disebabkan parafin memiliki harga yang ekonomis dan ketersediaannya yang melimpah di Indonesia serta memiliki karakteristik yang baik sebagai *thermal energy storage*. Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini yaitu alat penukar kalor dengan tipe *shell and tube heat exchanger* dimana pada penelitian ini alat penukar kalor diposisikan pada horizontal. Penelitian ini merupakan penelitian yang dilakukan secara experimental, 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 Desember 2023 sampai dengan bulan Mei 2024. Adapun deskripsi penelitian dapat dilihat pada uraian berikut.

1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah mempelajari mengenai perpindahan panas, alat penukar kalor, material fasa, parafin, dan karakteristiknya.

2. Persiapan Alat

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* dalam 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 sebagai berikut:

1. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

- a. Selang Pipa Air Panas

Pada penelitian ini, digunakan selang pipa air panas yang dirancang khusus untuk mengalirkan fluida panas dalam rangka dengan menghubungkan aliran fluida seperti yang tertera dalam skema pengujian. Jenis selang pipa air panas yang digunakan yaitu pipa westpex R dengan diameter 16 mm setara dengan 5/8 inch, dan mampu menahan suhu hingga 110° C. Dengan karakteristik ini, selang westpex untuk pipa air panas menjadi pilihan yang baik dan efektif dalam mengatasi kebutuhan aliran

fluida panas pada berbagai sistem perpipaan seperti yang terlihat pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Selang pipa air panas

b. Penampungan Air

Penampungan air merupakan wadah untuk menampung kebutuhan air dari keran sebelum air disalurkan melalui pipa-pipa dalam proses pembekuan parafin. Penampung air ini dapat menampung air sebanyak 85 liter air. Penampungan air yang digunakan dapat dilihat seperti pada Gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 Penampung air

c. *Data Logger dan Thermocouple*

Data Logger dan *Thermocouple* berfungsi dalam mengambil pengukuran temperatur pada parafin, temperatur fluida yang masuk dan keluar dari alat penukar panas, serta juga 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 3.3 *Data logger dan thermocouple*

Tabel 3.1 Spesifikasi *Data Logger*

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

Tabel 3.2 Spesifikasi *Thermocouple*

Diameter Tabel	2 x 0,5 mm
Panjang Kabel	1 meter
Layer	Blue Teflon temperatur (ptfe)
Temperatur Ukur	-200°C s/d 600°C
Ketelitian	0,1°C

d. Pompa Air

Pompa air ini berfungsi untuk mensirkulasi air untuk masuk dan keluar dari alat penukar kalor hingga perpindahan panas maksimal terjadi. Pompa air yang dipakai adalah pompa air akuarium, yaitu seperti pada Gambar 3.4 berikut:



Gambar 3.4 Pompa air

Tabel 3.3 Spesifikasi Pompa Air

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

e. *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 dipakai dalam penelitian ini yaitu seperti pada Gambar 3.5 berikut:



Gambar 3.5 *Water flow meter*

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

f. Katup Air

Katup air berfungsi untuk mengontrol jumlah fluida yang mengalir, seperti memperbesar dan memperkecil serta memutus aliran fluida dengan cara memutar pegangannya. penelitian ini menggunakan katup air sistem putar yang di dalamnya terdapat bola sebagai penutup seperti yang terlihat pada Gambar 3.6 berikut:



Gambar 3.6 Katup air

g. Isolator

Isolator yang digunakan dalam penelitian ini yaitu alumunium foil yang berfungsi untuk membatasi atau mengurangi transfer panas antara dua permukaan dan menjaga suhu pada box seperti yang terlihat pada Gambar 3.7 berikut:

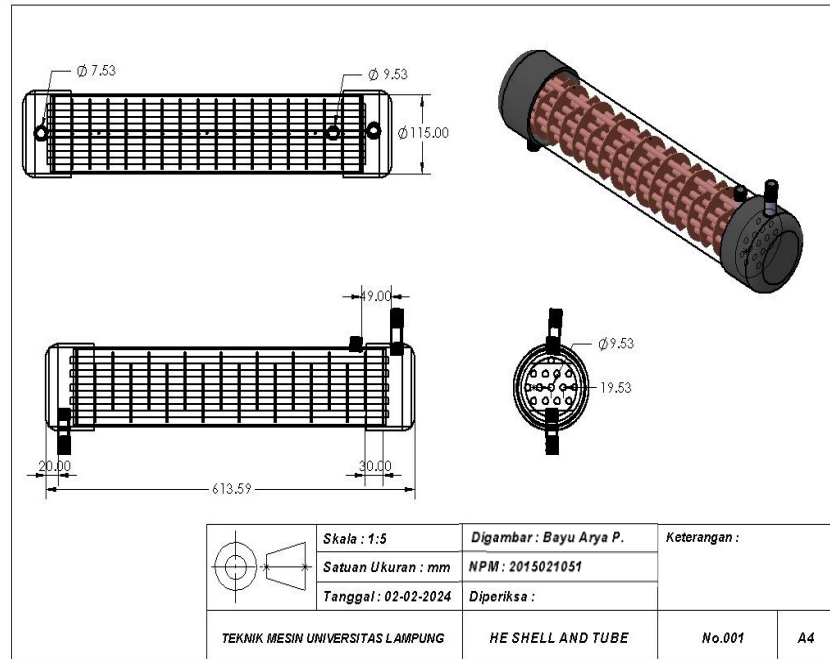


Gambar 3.7 Alumunium foil

h. Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 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 19 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 yaitu 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 seperti yang terlihat pada Gambar 3.8 berikut:



Gambar 3.8 Alat penukar kalor *shell and tube*

Detail dari variasi dan desain alat penukar kalor pada gambar 3.7 diatas dapat dilihat pada Table 3.5 berikut ini.

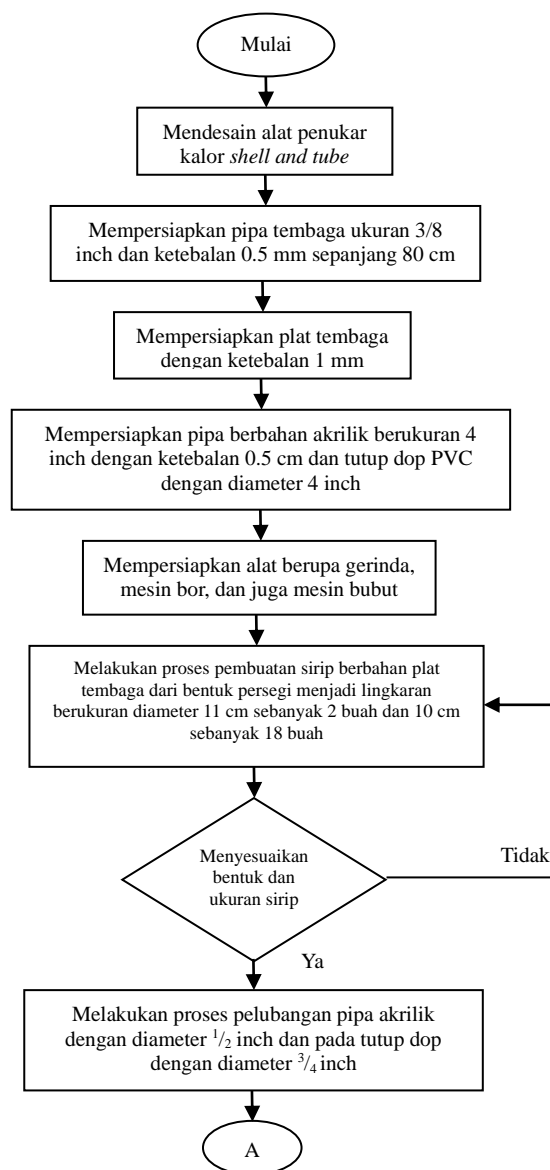
Tabel 3.5 Ukuran Alat Penukar Kalor

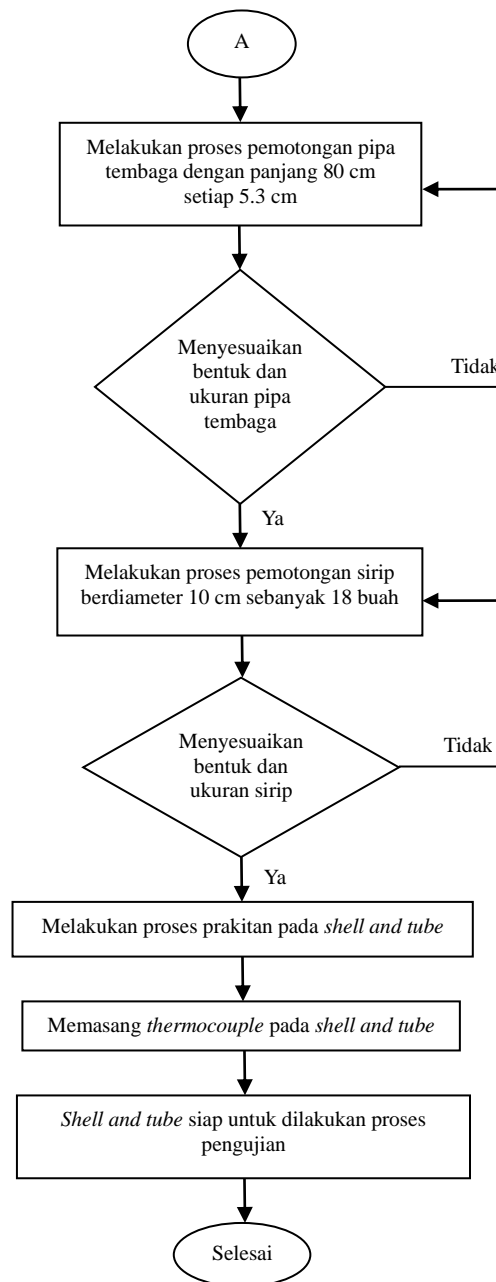
Nama	Keterangan
Pipa Tembaga	Ukuran: 3/8" Panjang: 530 mm Diameter dalam: 9,5 mm Diameter luar: 10,5 mm
Pipa Akrilik	Ukuran: 4" Panjang: 520 mm Diameter dalam: 110 mm Diameter luar: 115 mm
Sirip	Diameter luar: 100 mm Jarak antar sirip: 30 mm Jumlah sirip: 18 buah

2. Bahan

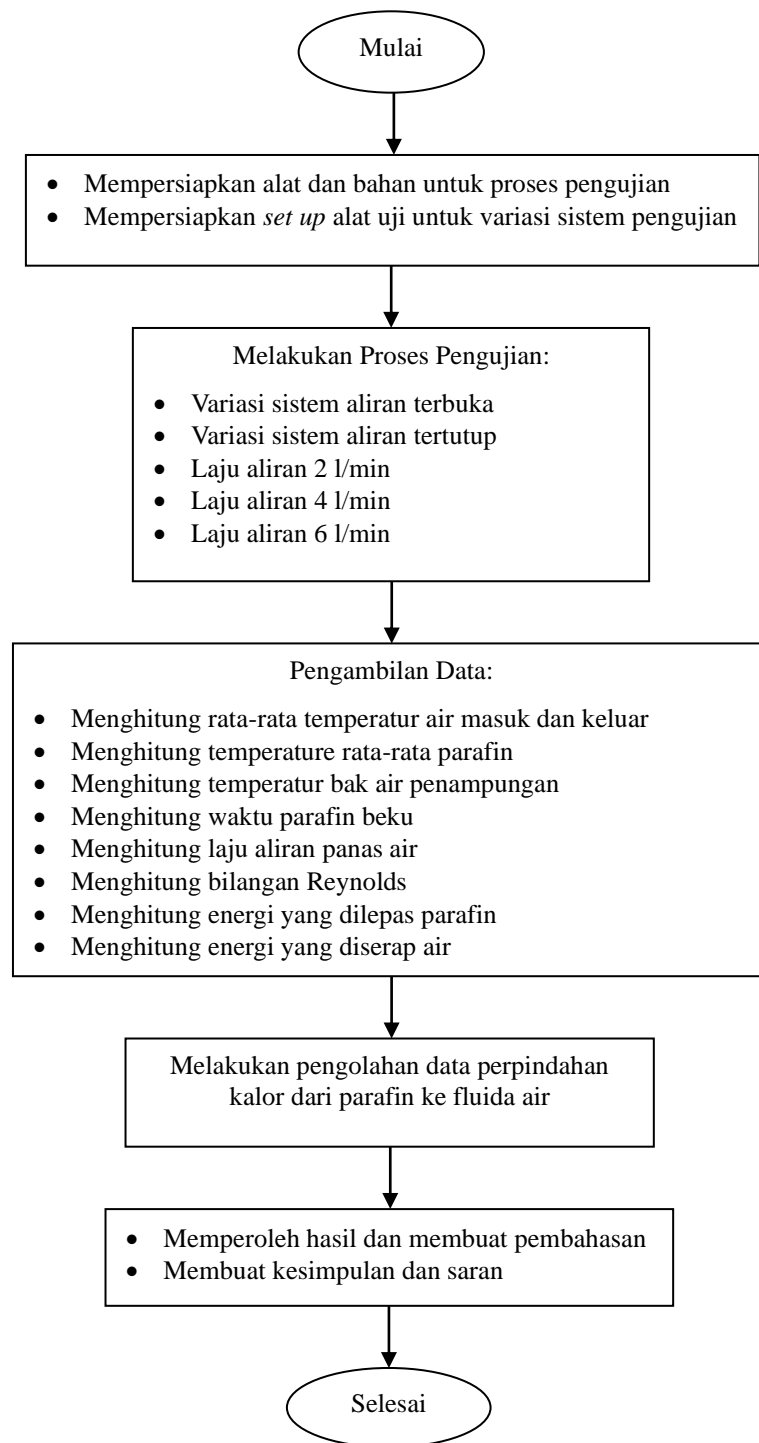
Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah air dan parafin. Air disirkulasikan oleh pompa dari penampungan air menuju alat penukar kalor kemudian kembali ke penampungan air. Parafin sebagai material berubah fasa yang digunakan berjenis padat atau lilin parafin yang kemudian diletakkan diantara pipa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

3.4 Diagram Alir





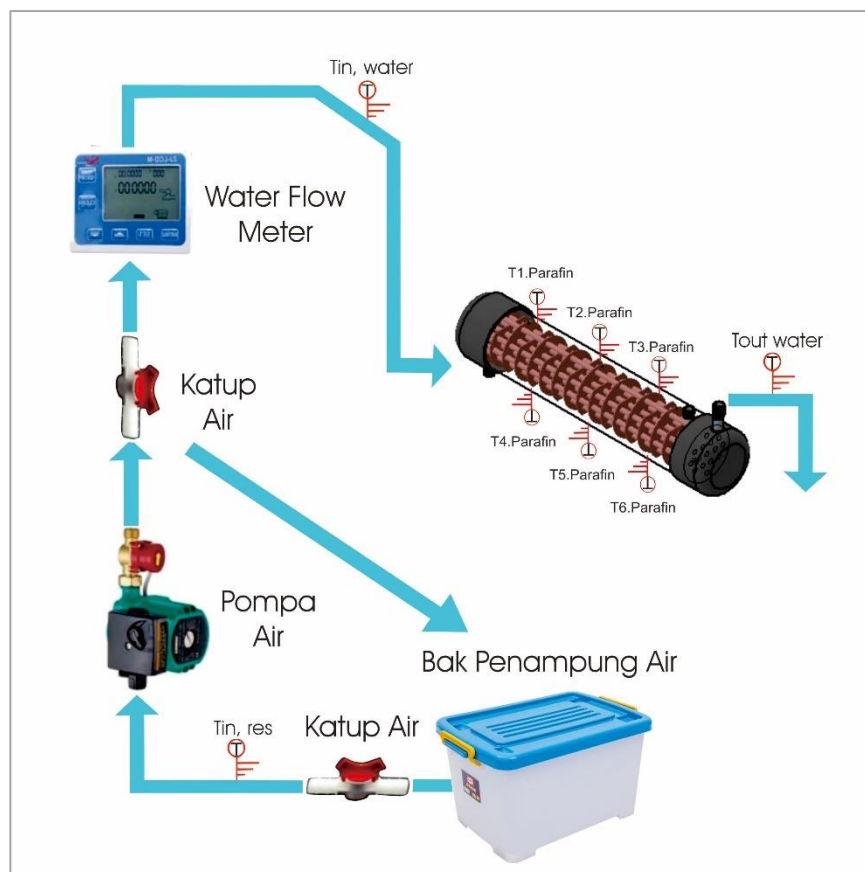
Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan *shell and tube*



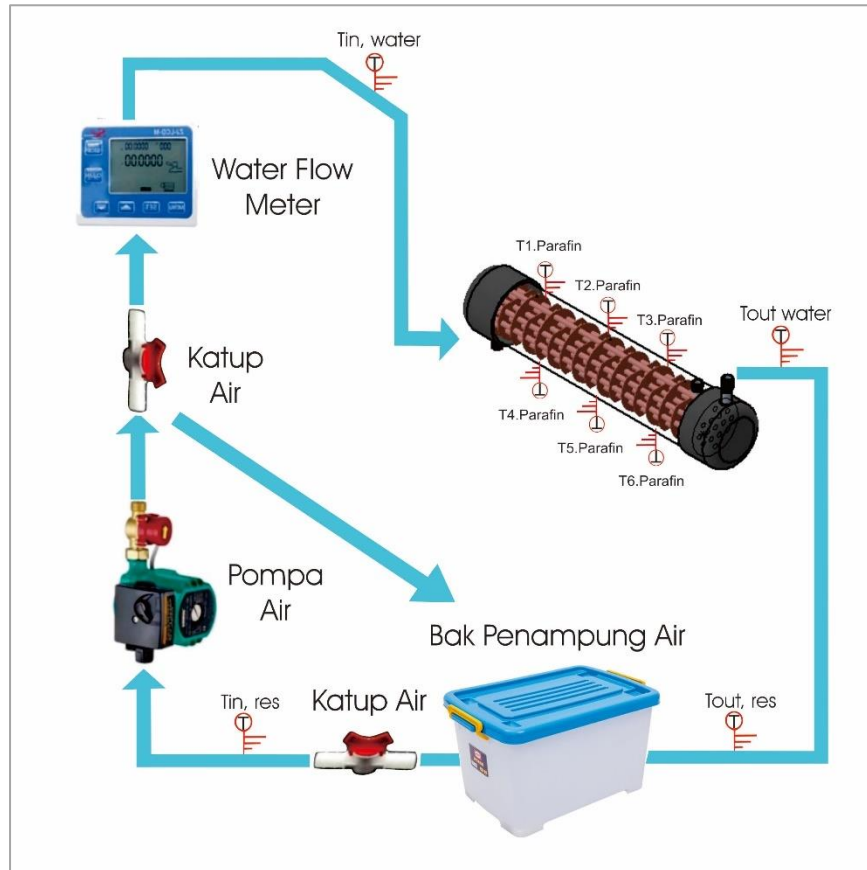
Gambar 3.10 Diagram alir pengujian

3.5 Skema Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian pada variasi sistem aliran air terbuka dan tertutup, dimana bermula dari parafin masih dalam bentuk cair, kemudian fluida air dialirkan ke *shell and tube* dengan menggunakan pompa hingga parafin membeku. 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 tempat penampung air dapat diketahui dengan *thermocouple* dan *data logger*. Skema pengujian sistem aliran terbuka dan tertutup pada pengujian ini yaitu dapat dilihat pada Gambar 3.9 dan Gambar 3.10 berikut:



Gambar 3.11 Skema pengujian sistem aliran terbuka

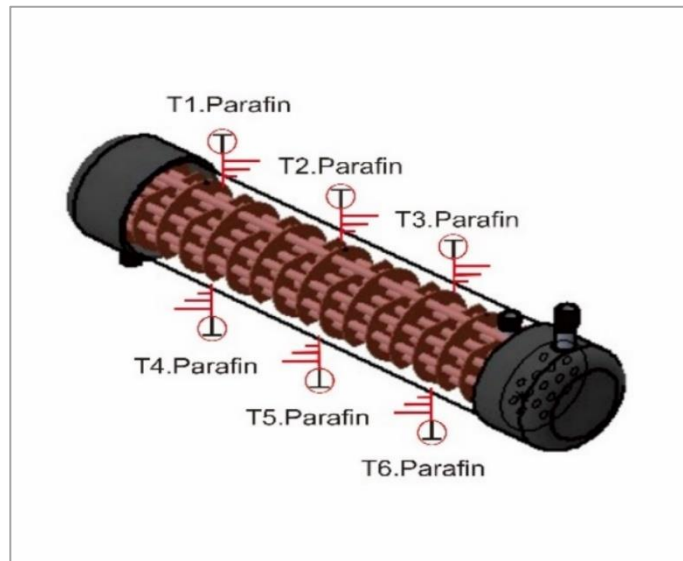


Gambar 3.12 Skema pengujian sistem aliran tertutup

Pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan *thermocouple* dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Digunakan 9 buah *thermocouple* untuk melakukan pengukuran temperatur pada sistem aliran terbuka, sedangkan pada sistem aliran tertutup digunakan 10 buah *thermocouple* untuk melakukan pengukuran temperatur.

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 6 kali dimana terdiri dari 3 variasi debit air (2 l/min, 4 l/min, dan 6 l/min).

3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3.13 Titik pengukuran pada *shell and tube*

Penempatan titik pengukuran pada *shell and tube* bertujuan untuk mengetahui temperatur pada parafin yang berada di dalam *shell and tube* saat parafin dalam keadaan cair maupun dalam keadaan beku. Penempatan titik pengukuran pada *shell and tube* ini dilakukan dengan menggunakan *thermocouple* sebanyak 6 buah. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.13 diatas, dimana 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 beku parafin bagian dangkal atau bawah pipa.

3.7 Metode Pengambilan Data

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

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pompa air, *thermocouple* dan *data logger*, *water flow meter sensor*, 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. Menyalakan keran air.
5. Menghidupkan pompa air.
6. Memanaskan parafin menggunakan kompor hingga mencapai 60°C.
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. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam Ms. Excel.
11. Mengulangi langkah 9-11 dengan variasi kecepatan aliran yang telah ditentukan.
12. Membuat kesimpulan hasil penelitian
13. 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*).

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Pada pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pada laju perpindahan panas terkecil didapatkan pada variasi aliran tertutup dengan laju aliran 2 l/min yaitu 240.35 Watt, sedangkan yang terbesar di dapatkan pada variasi aliran terbuka dengan laju aliran 6 l/min yaitu 483.14 Watt. Energi terbesar yang diserap oleh air terjadi pada variasi aliran tertutup dengan laju aliran 6 l/min, dengan nilai 554.71 kJ. Hal ini menunjukkan bahwa pada variasi aliran dan laju aliran air yang masuk sangat mempengaruhi laju perpindahan panas yang terjadi. Dimana semakin besar laju aliran yang masuk maka akan semakin besar pula laju perpindahan panas yang terjadi, yang mana meningkatkan proses pembekuan parafin.
2. Pada proses perpindahan panas ke fluida air pada aliran terbuka dan tertutup terdapat perbedaan waktu pada setiap variasi aliran dan laju aliran air. Dimana proses pembekuan pada sistem aliran terbuka terjadi dari suhu 60°C sampai pada suhu 40°C dan pada sistem aliran tertutup kapasitas air yang digunakan sebanyak 10 liter. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa waktu tercepat terjadi pada sistem aliran terbuka dengan laju aliran 6 l/min yaitu 11 menit 40 detik dan waktu terlama terjadi pada sistem aliran terbuka dengan laju aliran 2 l/min yaitu 32 menit 30 detik. Oleh karena itu variasi aliran dan laju aliran air yang masuk sangat berpengaruh terhadap waktu yang dibutuhkan untuk proses pembekuan parafin. Sehingga variasi dalam parameter-

parameter ini dapat menghasilkan perubahan waktu yang signifikan dalam proses pembekuan.

5.2 Saran

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

1. Perlu ditambahkannya variasi pada kapasitas air agar dapat mengetahui pengaruhnya terhadap nilai ΔT .
2. Untuk kebutuhan dalam penelitian selanjutnya, jika ingin mengetahui seberapa besar kalor yang dilepaskan ke suhu lingkungan sekitar, bisa dengan menambahkannya titik pengukuran temperatur pada bagian pipa *tube*, sirip, dan bagian luar pipa akrilik.

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), 113-119.
- Adib, J. F., Mufarida, A., & Ahmad, E. N. (T.T.). Analisis Laju Perpindahan Panas Radiasi Pada Inkubator Penetastelur Ayam Berkapasitas 30 Butir. Dalam *Jurnal Kajian Ilmiah Dan Teknologi Teknik Mesin*.
- Amin, M., & Nandi, P. (2016). Karakterisasi *Phase Change Material* (PCM) Lokal Indonesia. Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Depok.
- Buchori, Luqman. (2004). Buku Ajar Perpindahan Panas Bagian I. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Semarang.
- Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition*. www.Technicalbookspdf.Com
- Fischer, U. R. (2006). *Thermal Conductivity and Melting Point Measurements on Paraffin Zeolite Mixtures*. Brandenburg University of Technology Cottbus, PF 101344, 03013 Cottbus. Germany.
- Ganang, D. (2018). Permodelan Dan Simulasi Pemanas Air Energi Surya Menggunakan Kolektor Pipa Paralel. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sanata Dharma. Yogyakarta.
- Incropera, F. P., Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, & David P. De Witt. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition*.

- Inouye, K. (1934). *The Relation Between Tensile Strength and Density of Paraffin Wax at Various Temperatures. The University of British Columbia. Columbia.*
- Irsyad, M., Natal, A. H. L. T., Susila, M. D. (2020). Pemanfaatan Material Fasa Berubah Untuk Mempertahankan Kesegaran Sayuran. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- Meng, Q., & Hu, J. (2008). *A Poly (Ethylene Glycol)-Based Smart Phase Change Material. Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(10), 1260-1268.
- Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., ... & Rahman, S. A. (2019). *Phase Change Materials (PCM) For Solar Energy Usages and Storage : An overview. Energies*, 12(16), 31-67.
- Nadjib, M. (2016). Penggunaan Parafin Wax Sebagai Penyimpanan Kalor Pada Pemanas Air Tenaga Matahari *Thermosyphon*. *Rotasi*, 18(3), 76-85.
- Sarier, N., & 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. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(2), 318-345.
- Sharma, S. D., & Sagara, K. (2005). *Laten Heat Storage Material and System : A Riview. International Journal Green Energy*, 2, 1-56.
- Yuliani, I., Tina, M. G., Nurlita, Y. (2016). Alat Penyimpan Energi Panas Menggunakan Parafin Sebagai PCM (*Phase Change Material*) Pada Sistem Pemanas Air Surya. Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung. Bandung.
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2011). *Riview On Thermal Energy Storage With Phase Change Materials (PCM) In Building Applications. Applied Energy*, 92, 593-605. *Elsevier Ltd.*