

KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG BERISI PCM PARAFIN DALAM PROSES PELELEHAN

(Skripsi)

OLEH:

MUHAMAD ADITYA RADINTA



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

2023

KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG BERISI PCM PARAFIN DALAM PROSES PELELEHAN

Oleh:

MUHAMAD ADITYA RADINTA

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**

2023

ABSTRAK

KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG BERISI PCM PARAFIN DALAM PROSES PELELEHAN

Oleh:

Muhamad Aditya Radinta

Air panas merupakan kebutuhan dalam kehidupan sehari-hari. Namun sumber utama dari mendapatkan air panas masih terbelang tidak ekonomis dan tidak ramah lingkungan. Energi matahari dapat dijadikan sumber alternatifnya dan digunakan PCM Parafin sebagai bahan untuk menyimpan energi kalor dari ketidak konsistensinya intensitas cahaya matahari. Energi kalor ini diserap dan dilepaskan dengan menggunakan alat penukar kalor berjenis pipa ganda (*double pipe heat exchanger*). Pada alat penukar kalor pipa ganda ini ditambahkan sirip melintang disisi luar pipa bagian dalam untuk memperluas permukaan perpindahan panas. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan jarak antar sirip dan juga debit aliran airnya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi jarak antar sirip dan debit aliran air pada proses pelelehan PCM parafin. Parameter yang diukur adalah temperatur masuk dan keluar alat penukar kalor, temperatur sirip, temperatur parafin, dan waktu pelelehan parafin. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pada variasi jarak antar sirip yang lebih dekat dapat meningkatkan laju perpindahan panas serta mengurangi waktu pelelehan PCM parafin. Debit aliran air yang lebih besar juga dapat meningkatkan nilai laju perpindahan panas yang terjadi dan volume PCM parafin yang mencair juga semakin banyak. Penelitian ini dapat membantu dalam pengembangan alat penukar kalor yang lebih efisien dalam memanaskan air pada skala kecil hingga besar.

Kata kunci: pemanas air, perpindahan panas, alat penukar kalor, parafin

ABSTRACT

STUDY OF HEAT TRANSFER IN DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER WITH CIRCULAR FINNED CONTAINING PARAFFIN PCM IN THE MELTING PROCESS.

By:

Muhamad Aditya Radinta

Hot water is a daily necessity, but the main source of obtaining it is still considered uneconomical and unfriendly to the environment. Solar energy can serve as an alternative source, and PCM paraffin can be used as a material for storing heat energy due to the inconsistent intensity of sunlight. A double pipe heat exchanger is used to absorb and release this heat energy. Circular finned are added to the outer side of the inner pipe to expand the surface area of heat transfer. This research varies the distance between the fins and water flow rate to study their effects on the process of melting paraffin PCM. The parameters measured include the inlet and outlet temperatures of the heat exchanger, fin temperature, paraffin temperature, and melting time. The results show that a shorter distance between fins can increase the rate of heat transfer and reduce the melting time of PCM paraffin. A higher water flow rate can also increase the value of heat transfer rate and the volume of melted PCM paraffin. This research can help in the development of more efficient heat exchangers for heating water on a small to large scale.

Keywords: water heater, heat transfer, heat exchanger, paraffin

Judul Skripsi : **KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA
DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER DENGAN
PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG BERISI
PCM PARAFIN DALAM PROSES
PELELEHAN**

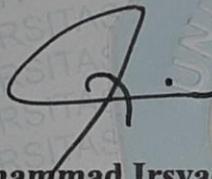
Mahasiswa : Muhamad Aditya Radinta

Nomor Pokok Mahasiswa : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

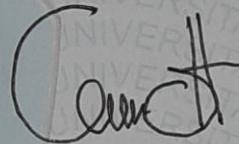
MENYETUJUI

Komisi Pembimbing



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

NIP. 197112142000121001



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

NIP. 199301102019031008

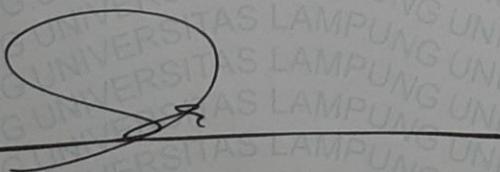
MENGETAHUI

Ketua Jurusan

Teknik Mesin

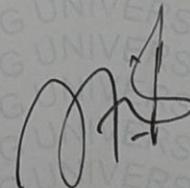
Ketua Program Studi

S1 Teknik Mesin



Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP. 197103311999031003



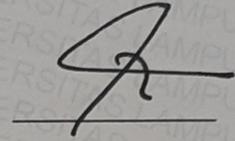
Novri Tanti, S.T., M.T.

NIP. 197011041997032001

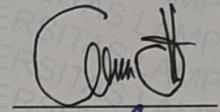
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

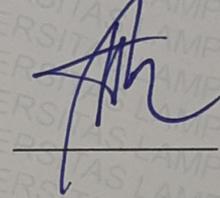
Ketua : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



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: **16 Februari 2023**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul “KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG BERISI PCM PARAFIN DALAM PROSES PELELEHAN” merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 1 April 2023

Pembuat Pernyataan



Muhamad Aditya Radinta
NPM 1815021018

MOTO

"Jangan takut mencoba hal baru, petualanganmu belum selesai. Dengan kreativitasmu, jadikan dunia sebagai kanvasmu."

ChatGPT

"Di setiap tetes hujan terdapat keindahan, di setiap batang pohon terdapat harapan, di setiap hela napas terdapat kekuatan. Kita hanya perlu membuka hati untuk merasakan keajaiban yang tersembunyi di sekeliling kita."

ChatGPT

"Dan janganlah kamu berjalan di muka bumi dengan sombong, sesungguhnya kamu sekali-kali tidak akan dapat menembus bumi dan tidak akan sampai setinggi langit."

(QS. Al-Isra: 37)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam tak lupa penulis haturkan kepada nabi akhir zaman Rasulullah Muhammad SAW yang telah membimbing manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh hidayah. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan dalam ilmu di bidang alat penukar kalor. 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, Ayahanda Ahmad dan Ibunda Nurmala yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis untuk dapat tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi di Teknik Mesin.
2. Kakak dan adik penulis, Mas Yoga dan Adik Khayla yang memberikan semangat materil dan moril bagi penulis selama menjalankan kuliah.
3. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Novri Tanti, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

6. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
7. Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
8. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
10. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
11. Keluarga besar Lapas, terdiri dari Zikautsar, Diyon, Arif, Gama, Waliyyan, Kristo dan Nouval yang telah membantu, menyemangati, dan menemani hari-hari penulis.
12. Teman-teman Angkatan 2018 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 14 Agustus 2018 menjalin kekeluargaan.
13. Tim *pusher double pipe*, terdiri dari Gama, Ahmad, Rizky, dan Mas Erik yang telah membantu dalam mengerjakan penelitian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari 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 13 Januari 2000 sebagai anak kedua, dari pasangan Bapak Ahmad dan Ibu Nurmalia. Penulis menempuh Pendidikan dasar di SD Al-Kautsar hingga tahun 2012, lalu dilanjutkan di MTS NEGERI 2 BANDAR LAMPUNG yang diselesaikan tahun 2015 dan SMA NEGERI 10 BANDAR LAMPUNG yang diselesaikan tahun 2018, hingga pada tahun 2018 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

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, dan Organisasi diluar kampus.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di **LIPI UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung** Tanjung Bintang, Lampung Selatan tahun 2021 dengan judul laporan “**KARAKTERISASI KANDUNGAN Ti, Fe, Mg, Al, dan V PADA PASIR BESI DENGAN MENGGUNAKAN *INDUCTIVELY COUPLED PLASMA (ICP)***”

Tahun 2022 penulis melakukan penelitian dengan judul “**KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG BERISI PCM PARAFIN DALAM PROSES PELELEHAN**” dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Perpindahan Panas	6
2.1.1 Perpindahan Panas secara Konduksi.....	6
2.1.2 Perpindahan Panas secara Konveksi	7
2.1.3 Perpindahan Panas secara Radiasi	8
2.2 Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchangers</i>)	9
2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor.....	11
2.4 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	12
2.4.1 Panas yang Diserap	12
2.4.2 Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritmik (<i>Logaritmik Mean Temperature Diference</i>).....	13
2.4.3 Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh	13

2.4.4 Efisiensi Termal	14
2.5 Material Berubah Fasa	14
2.6 Klasifikasi PCM	15
2.6.1 PCM Organik	16
2.6.2 PCM Anorganik	16
2.6.3 PCM <i>Eutectic</i>	16
2.7 Parafin	17
2.8 Sifat-sifat Parafin	19
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Tempat Pelaksanaan	23
3.2 Waktu Pelaksanaan	24
3.3 Alat dan Bahan	24
3.4 Diagram Alir Penelitian	31
3.5 Skema Pengujian	32
3.6 Penempatan Titik Pengukuran	33
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 Temperatur Sirip	42
4.1.4 Waktu yang Dibutuhkan Untuk Mencapai 63°C	43
4.2 Hasil Perhitungan	46
4.2.1 Laju Perpindahan Panas Air	46
4.2.2 Aliran Air	49
4.2.3 Perhitungan Kinerja	51

BAB 5 PENUTUP.....	58
5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	60

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi	7
Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi	8
Gambar 2.3 Profil temperatur aliran co-current	10
Gambar 2.4 Profil temperatur aliran counter-current.....	10
Gambar 2.5 Aliran <i>double pipe heat exchanger</i>	11
Gambar 2.6 <i>Shell and tube heat exchanger</i>	12
Gambar 2.7 Klasifikasi PCM	15
Gambar 2.8 Parafin padat.....	18
Gambar 2.9 Parafin cair	18
Gambar 3.1 Pemanas air listrik	24
Gambar 3.2 Kontroler suhu dan SSR.....	25
Gambar 3.3 <i>Data logger</i> dan termokopel	26
Gambar 3.4 Pompa air.....	26
Gambar 3.5 <i>Water flow meter</i>	27
Gambar 3.6 Selang pipa air panas	27
Gambar 3.7 Alat penukar panas dengan sirip melintang	29
Gambar 3.8 Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 3.9 Instalasi alat pengujian	32
Gambar 3.10 Rangkaian alat uji.....	33
Gambar 3.11 Penempatan titik pengukuran	33
Gambar 4.1 Grafik selisih perbandingan nilai rata-rata temperatur air masuk dan keluar alat penukar kalor	37
Gambar 4.2 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin di debit aliran air 4 l/min	39

Gambar 4.3 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin di debit aliran air 8 l/min	39
Gambar 4.4 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin di debit aliran air 12 l/min	40
Gambar 4.5 Grafik perbandingan temperatur parafin	41
Gambar 4.6 Grafik perbandingan temperatur sirip bawah dan sirip atas.....	42
Gambar 4.7 Grafik perbandingan waktu parafin mencapai temperatur 63°C	44
Gambar 4.8 Grafik perbandingan laju perpindahan panas air.....	47
Gambar 4.9 Perbandingan nilai atas dan bawah energi yang dilepas oleh air	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Titik leleh dan panas peleburan laten parafin	21
Tabel 3.1 Ukuran alat penukar panas	29
Tabel 4.1 Data Laju Perpindahan Panas.....	46
Tabel 4.2 Perhitungan Bilangan Reynols.....	50
Tabel 4.3 Energi yang Dilepas Air.....	51
Tabel 4.4 Sifat-sifat <i>Scale Paraffin Wax</i>	52
Tabel 4.5 Energi Air yang Mendekati Energi Parafin.....	56

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada kehidupan di zaman modern ini, air panas sudah menjadi kebutuhan dalam kehidupan sehari-hari, mulai dari keperluan rumah tangga seperti mencuci alat dapur hingga untuk mandi. Kebutuhan air panas ini tidak hanya dibutuhkan dalam keperluan rumah tangga saja melainkan juga dibutuhkan dalam dunia industri seperti untuk mensterilkan alat rumah sakit, penyediaan air panas pada kolam renang atau hotel, dan untuk kegiatan proses produksi lainnya. Air panas dapat diperoleh dengan cara dimasak ataupun dengan menggunakan pemanas air (*water heater*). Namun pada umumnya penggunaan alat *water heater* tersebut masih menggunakan sumber utama berupa listrik ataupun LPG. Dibutuhkan suatu alat untuk mendapatkan air panas tersebut dengan cara yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan (Ganang, 2018).

Salah satu cara untuk mendapatkan sumber energi yang ekonomis dan ramah lingkungan adalah dengan menggunakan energi alternatif terbarukan. Energi matahari adalah salah satu energi alternatif yang bersifat terbarukan. Letak geografi Indonesia terletak pada lintasan garis katulistiwa, dimana kondisi demikian sangat menguntungkan dalam hal ketersediaan energi matahari. Dengan potensi yang besar, jumlah yang melimpah, dan sifat yang kontinu serta non polutif dari energi matahari menjadikan energi ini sebagai alternatif unggulan di bidang energi. Melalui pancaran tenaga surya/ sinar matahari langsung ini, kita dapat memperoleh pemanasan air tanpa harus menggunakan energi listrik.

Untuk memanfaatkan energi matahari sebagai pemanas air maka dibutuhkan sebuah perangkat bernama kolektor surya untuk dapat mengumpulkan panas dari energi matahari yang kemudian diubah menjadi energi kalor. Namun energi matahari ini memiliki waktu tertentu untuk dapat dimanfaatkan sedangkan penggunaan dari pemanas air ini harus mempunyai fleksibilitas terhadap waktu. Maka diperlukan sebuah media yang dapat menyimpan energi termal pada sistem pemanas air tenaga surya tersebut.

Phase change material atau biasa disingkat dengan PCM adalah salah satu media penyimpan energi termal yang merupakan salah satu solusi tidak konsistennya intensitas energi matahari yang diterima oleh bumi. PCM dapat mengalami proses reversibel dari proses pelelehan (*melting*) maupun pembekuan (solidifikasi) yang dapat dimanfaatkan untuk mempertahankan suhu konstan selama periode waktu tertentu, sehingga dapat dimanfaatkan pada aplikasi penyimpanan panas laten. PCM akan menyimpan kalor disertai perubahan fasa ketika siang hari dan pada saat radiasi matahari menurun PCM akan melepaskan kembali panas ke air yang membuat suhu berada pada temperatur konstan (Yuliani, 2016).

Salah satu jenis PCM yang dapat digunakan sebagai penyimpan energi termal adalah parafin. Parafin memiliki sifat antara lain konduktivitas termalnya rendah ($\sim 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$), sifat termalnya stabil di bawah 500°C (Sharma dkk, 2009), tidak berbahaya dan tidak reaktif, titik leleh 42 °C sampai 62°C , serta kalor laten 178kJ/kg (Yuliani, Gantina dkk., 2016). Disamping itu parafin juga ketersediaannya melimpah dan mudah didapatkan, parafin juga memiliki nilai ekonomis yang rendah sehingga lebih terjangkau oleh semua kalangan. Nilai perpindahan kalor yang terjadi pada parafin dapat diketahui dengan cara memanaskan parafin hingga meleleh atau dapat disebut dengan proses pelelehan.

Hal inilah yang melatar belakangi kegiatan penelitian ini yang berjudul Kajian Perpindahan Kalor pada *Double Pipe Heat Exchanger* dengan Penambahan Sirip Melintang Berisi PCM Parafin dalam Proses Pelelehan. Dalam penelitian ini digunakan PCM jenis parafin sebagai penyimpan energi termal dimana

memiliki sifat-sifat yang baik dan sangat memungkinkan jika dikembangkan lebih lanjut. Pada penelitian ini juga dilakukan pemasangan sirip melintang pada pipa bagian dalam *double pipe* untuk mengetahui pengaruh perpindahan kalornya.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran air dan jarak sirip pada pipa terhadap temperatur dan waktu yang dibutuhkan parafin untuk mencapai temperatur 63°C.
2. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran air dan jarak sirip pada pipa terhadap laju perpindahan panas yang terjadi pada parafin selama proses pemanasan parafin.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Jenis PCM yang akan diuji adalah parafin padat atau lilin parafin
2. Bentuk sirip yang dirancang adalah melintang dengan ukuran diameter 32 mm
3. Jenis material sirip yang digunakan adalah pelat tembaga dengan variasi jarak sirip 3 cm, 4 cm, dan 5 cm.
4. Variasi kecepatan aliran air sebesar 4 l/min, 8 l/min, dan 12 l/min.

5. Jenis material pipa luar alat penukar kalor yang digunakan adalah pipa PVC dengan ukuran diameter 2 inch.
6. Jenis material pipa dalam alat penukar kalor yang digunakan adalah pelat tembaga dengan ukuran 5/8 inch.
7. Alat ukur temperatur berupa termokopel yang digunakan memiliki ketelitian sebesar 0.1°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 (tempat dan waktu pelaksanaan), bahan penelitian, peralatan dan prosedur pengujian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

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

5. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB 2

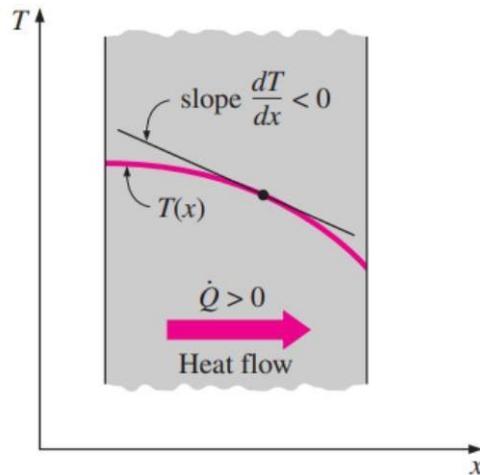
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah ilmu yang menjelaskan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur di antara benda atau material. Bila dua sistem yang temperaturnya berbeda disinggungkan maka akan terjadi perpindahan energi. Proses di mana perpindahan energi itu berlangsung disebut perpindahan panas. Perpindahan panas akan terjadi apabila ada perbedaan temperatur antara dua bagian benda. Panas akan berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah (Sharma dkk, 2009). Terdapat tiga jenis perpindahan panas yang terjadi, antara lain perpindahan panas secara konduksi, konveksi dan radiasi.

2.1.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Suatu material bahan yang mempunyai gradien temperatur antara kedua permukaan benda, maka kalor akan mengalir tanpa disertai oleh suatu gerakan zat. Aliran kalor seperti ini disebut konduksi atau hantaran. Laju perpindahan kalor secara konduksi sebanding dengan gradien temperatur dan dengan konstanta kesetimbangan (konduksi), maka menjadi persamaan Fourier (Cengel, 2003)



Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi
(Sumber: Cengel, 2003)

Persamaan perpindahan konduksi pada sebuah benda, seperti diperlihatkan pada persamaan berikut:

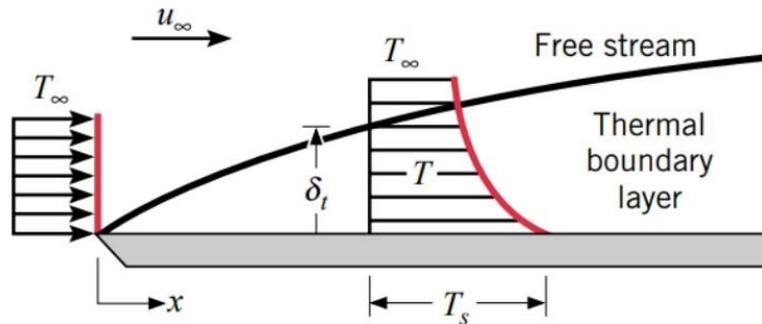
$$\bar{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

- 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)

2.1.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya dengan menggunakan media pengantar berupa fluida (cairan atau gas). Perpindahan panas konveksi secara umum dibagi menjadi 2 cara, yaitu konveksi bebas yang disebabkan oleh beda kerapatan dan beda temperatur serta tidak ada tenaga dari luar yang mendorong. konveksi paksa yaitu perpindahan

panas yang alirannya dipengaruhi oleh gaya dari luar atau gaya tambahan (Buchori, 2004).



Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi
(Sumber: Incopera, 2007)

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

$$\bar{Q}_{\text{conv}} = -h A \Delta T \quad (2.2)$$

- Dimana:
- \bar{Q}_{conv} : Perpindahan panas konveksi (W)
 - h : Koefisien konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 - A : Luas penampang (m^2)
 - ΔT : Beda temperatur (K)

2.1.3 Perpindahan Panas secara Radiasi

Perpindahan panas 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.

Contoh perpindahan panas radiasi terjadi pada panas matahari yang sampai permukaan bumi. Dengan rumus perpindahan panas secara radiasi adalah sebagai berikut:

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

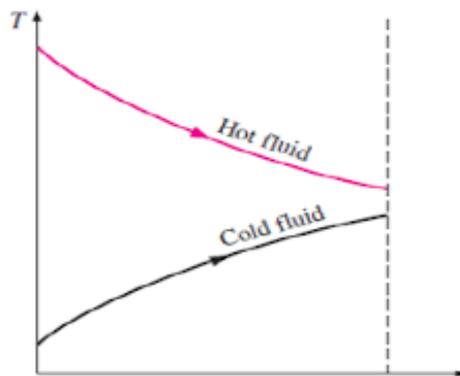
Dimana: \bar{Q}_{rad} : Perpindahan panas radiasi (W)
e : Emisivitas
 σ : Konstanta Stefan-boltzmann $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴)

2.2 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchangers*)

Secara umum pengertian alat penukar panas atau heat exchanger (HE), adalah suatu alat yang digunakan sebagai media memindahkan panas dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Tujuan dari alat penukar kalor tersebut adalah untuk mengontrol suatu sistem (temperatur) dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya. Terdapat dua aliran penukaran panas yaitu penukaran panas dengan aliran searah (*co-current*) dan penukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter-current*). (Cengel, 2003)

1. Aliran Searah

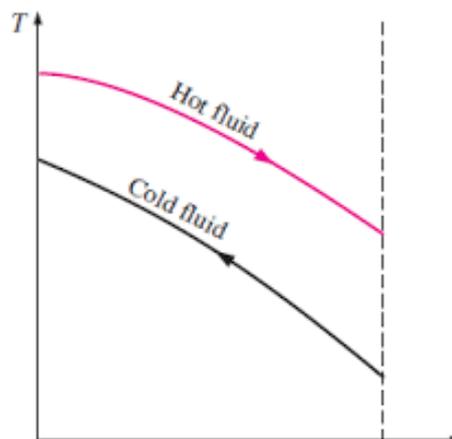
Penukaran panas jenis ini, kedua fluida (dingin dan panas) masuk pada sisi penukar yang sama, mengalir dengan arah yang sama dan keluar pada sisi yang sama pula. Karakter penukar panas jenis ini, temperatur fluida dingin yang keluar dari alat penukar panas tidak dapat melebihi temperatur fluida panas yang keluar dari alat penukar panas, sehingga diperlukan media pendingin/pemanas yang banyak.



Gambar 2.3 Profil temperatur aliran co-current
(Sumber: Cengel, 2003).

2. Berlawanan Arah

Penyukat panas jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk dan keluar pada sisi yang berlawanan. Temperatur fluida dingin yang keluar dari penyukat panas lebih tinggi dibandingkan temperatur fluida panas yang keluar dari penyukat kalor, sehingga dianggap lebih baik dari aliran searah.



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

Penyukat kalor juga diklasifikasikan berdasarkan proses transfer. Terdapat 2 klasifikasi alat penyukat kalor berdasarkan proses transfer, yaitu alat

penukar kalor langsung dan tidak langsung. Alat penukar kalor yang langsung adalah dimana fluida yang panas akan bercampur secara langsung (*direct contact*) dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau ruangan tertentu.

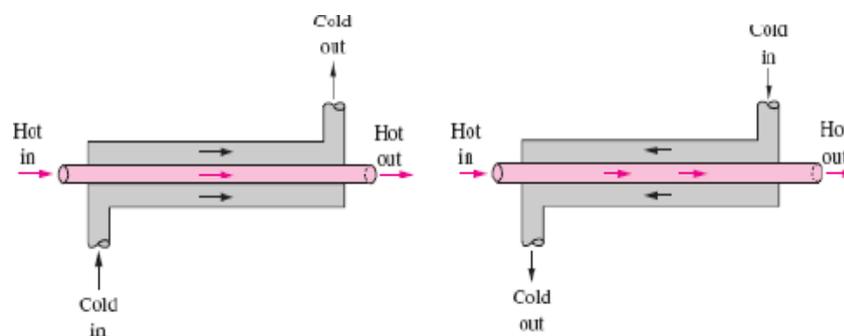
Sedangkan alat penukar kalor yang tidak langsung adalah dimana fluida panas tidak berhubungan langsung (*indirect contact*) dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panasnya itu mempunyai media perantara seperti pipa, plat atau peralatan jenis lainnya.

2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor

Jenis-jenis heat exchanger dapat dibedakan atas:

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

Double pipe heat exchanger adalah alat penukar kalor dimana suatu aliran fluida dalam pipa mengalir dari titik sisi satu ke sisi lain. Cairan yang mengalir dapat berupa aliran searah atau berlawanan. Alat penukar kalor 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. Aliran dalam alat penukar kalor ini dapat dilihat seperti pada Gambar 2.5 berikut:



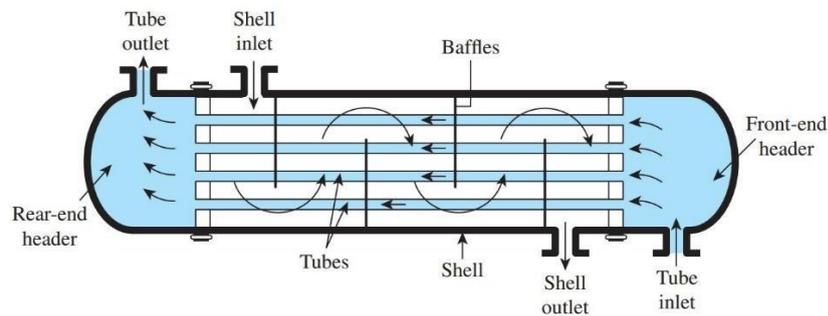
Gambar 2.5 Aliran *double pipe heat exchanger*
(Sumber: Cengel, 2003)

2. Tipe spiral (*spiral heat exchanger*)

Jenis ini mempunyai bidang perpindahan panas yang melingkar. Karena alirannya yang melingkar maka sistem ini dapat melakukan *self cleaning* dan mempunyai efisiensi perpindahan panas yang baik, akan tetapi konstruksi seperti ini tidak dapat dioperasikan pada tekanan tinggi.

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

Shell and tube heat exchanger biasanya digunakan dalam kondisi tekanan relatif tinggi, yang terdiri dari sebuah selongsong yang di dalamnya disusun suatu *annulus* dengan rangkaian tertentu (untuk mendapatkan luas permukaan yang optimal), seperti diperlihatkan pada Gambar 2.6. Fluida mengalir di selongsong maupun di *annulus* sehingga terjadi perpindahan panas antara fluida dengan dinding *annulus* misalnya triangular pitch (pola segitiga) dan square pitch (pola segiempat).



Gambar 2.6 *Shell and tube heat exchanger*
(Sumber: Francesca dkk, 2020)

2.4 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.4.1 Panas yang Diserap

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

transfer panas atau mengalir dari air panas sirkuit ke sirkuit air dingin. tingkat perpindahan panas adalah fungsi dari tingkat cairan massa aliran, perubahan suhu dan kapasitas panas spesifik dari cairan (pada suhu rata-rata).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

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

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = \dot{m}_H \cdot c_{pH} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_C \cdot c_{pC} \cdot \Delta T_C \quad (2.2)$$

2.4.2 Perbedaan Temperatur Rata-rata Logaritmik (*Logaritmik Mean Temperature Diference*)

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

$$LMTD = \frac{(T_{H2} - T_{H1}) - (T_{C1} - T_{C2})}{\ln \left(\frac{T_{H1} - T_{C2}}{T_{H2} - T_{C1}} \right)} \quad (2.3)$$

2.4.3 Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

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

$$U = \frac{Q_e}{A \times LMTD} \quad (2.4)$$

2.4.4 Efisiensi Termal

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

$$\eta_H = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{H1} - T_{C2}} \times 100 \quad (2.5)$$

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

$$\eta_C = \frac{T_{C1} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100 \quad (2.6)$$

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

$$\eta = \frac{\eta_H + \eta_C}{2} \quad (2.7)$$

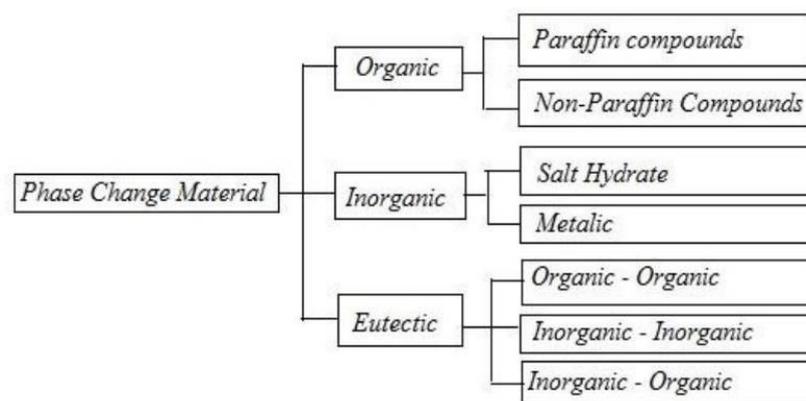
2.5 Material Berubah Fasa

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

PCM merupakan satu cara penyimpanan energi panas yang paling efisien. PCM dapat digunakan untuk penyimpanan energi dan kontrol temperatur. PCM menjadi menarik karena mempunyai kelebihan yaitu perbandingan yang cukup tinggi antara panas yang dilepaskan dengan variasi temperatur. PCM dapat melepaskan panas lebih 4-5 kali setiap satuan volume dibandingkan bahan penyimpan energi konvensional seperti air atau batu (Sharma dkk, 2009). Kelebihan lainnya dari PCM adalah harga yang ekonomis, mudah ditemukan, dan dapat digunakan secara terus menerus selama struktur materialnya tidak berubah (Amin, Nandi, 2016).

2.6 Klasifikasi PCM

Berdasarkan kondisi perubahan fasanya, PCM terbagi menjadi 3 bagian yaitu solid-liquid, liquid-gas dan solid-gas. Diantara jenis-jenis tersebut PCM solid liquid merupakan PCM yang paling banyak digunakan sebagai thermal energy storage. Secara umum PCM solid-liquid diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu PCM senyawa organik, senyawa inorganik dan eutectic (Zhou, 2011). Adapun klasifikasi PCM organik, senyawa inorganik dan eutectic dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Klasifikasi PCM
(Sumber: Zhou, 2011).

2.6.1 PCM Organik

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

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

2.6.2 PCM Anorganik

Bahan anorganik lebih diklasifikasikan sebagai salt hydrate dan metallics. Stearid Acid ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) yang menjadi material berubah fasa yang akan di uji dalam penelitian ini termasuk kedalam golongan Inorganic.

2.6.3 PCM *Eutectic*

Eutectic adalah 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 menghasilkan material PCM baru. PCM *eutectic* dapat dibuat dengan menggabungkan antara material PCM *organic-organic*, *organic-inorganic*, dan *inorganic-inorganic*.

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

2.7 Parafin

Parafin merupakan bagian dari hidrokarbon alkana dengan formula C_nH_{2n+2} . Alkana adalah senyawa hidrokarbon dengan rumus umum C_nH_{2n+2} . Alkana disebut juga parafin karena senyawa-senyawa alkana tidak mudah bereaksi dengan senyawa lain. Kegunaan parafin ini sangat beragam mulai dari bidang pertanian, makanan, kosmetik, farmasi, hingga rumah tangga yang mana kegunaannya ini tergantung dari senyawa hidrokarbon dalam kelompok alkananya. Kegunaan parafin antara lain sebagai pelarut, bahan bakar, sintesis senyawa kimia, bahan pembuatan plastik, media penyimpan panas, dan lain sebagainya yang masih banyak lagi.

Parafin didapatkan dari proses destilasi minyak bumi yang mana hasil 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 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 seperti yang terlihat pada Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 Parafin padat
(Sumber: Rahfiqa, 2013)



Gambar 2.9 Parafin cair
(Sumber: Rahfiqa, 2013)

Pada umumnya parafin padat mempunyai temperatur leleh antara 42 °C sampai 62°C dan mempunyai panas laten yang cukup tinggi sehingga sering dimanfaatkan sebagai penyimpan energi termal. Hal tersebut disebabkan karena mudah menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi termal yang ditandai dengan perubahan fasa dari bentuk padat menjadi cair atau sebaliknya (Gasia et al, 2016).

Penggunaan parafin sebagai penyimpan energi termal memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan parafin merupakan keuntungan bagi pengguna, sedangkan kekurangan dari pada parafin merupakan masalah yang harus diatasi ketika digunakan sebagai penyimpan energi termal. Oleh sebab itu, pemilihan material PCM sebagai penyimpanan energi termal perlu dipertimbangkan. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan parafin sebagai penyimpan energi termal.

1. Kelebihan

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

2. Kekurangan

Kekurangan parafin sebagai penyimpan energi termal yaitu memiliki konduktivitas termal yang rendah pada saat fasa padat sehingga menjadi masalah jika digunakan sebagai penyimpan energi termal, akan tetapi masalah ini dapat diatasi dengan penambahan fin pada permukaan perpindahan kalor atau dengan menambahkan material logam pada parafin untuk meningkatkan konduktivitas termal. Selain itu parafin mempunyai sifat yang mudah terbakar sehingga perancangan kontainer sebagai penyimpan parafin harus lebih diperhatikan (Sharma dan Sagara, 2005).

2.8 Sifat-sifat Parafin

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

1. Massa jenis

Parafin memiliki masa jenis 880 kg/m^3 pada temperatur 20°C . Parafin dapat mengalami peningkatan masa jenis ketika pada temperatur rendah. Peningkatan masa jenis ini disebabkan karena parafin mengalami penyusutan atau peningkatan kerapatan masa sehingga volume parafin

menjadi berkurang. Namun sebaliknya, parafin juga dapat mengalami penurunan masa jenis ketika pada temperatur tinggi. Hal ini disebabkan karena parafin memuai pada temperatur tinggi sehingga volume parafin menjadi meningkat (Inouye, 1934).

Oleh sebab itu, penggunaan parafin sebagai thermal energy storage perlu diwaspadai terutama mengenai volume parafin pada saat mengalami pemuaiian. Volume yang digunakan untuk menyimpan parafin harus dibuat lebih besar sehingga pada saat parafin mengalami kenaikan temperatur, proses pemuaiian dapat diantisipasi dengan besarnya volume yang telah disiapkan sehingga tidak mengalami kebocoran.

2. Panas Spesifik

Panas spesifik Parafin pada fasa padat yaitu 2 kJ/kg K sedangkan pada fasa cair parafin memiliki panas spesifik sebesar 2 kJ/kg K (Data Sheet RT50, 2020). Parafin jika digunakan sebagai penyimpanan energi termal maka jumlah panas yang dapat diserap cukup besar sesuai dengan jumlah massa parafin yang digunakan. Namun waktu yang diperlukan untuk melepaskan panas menjadi lebih lama. Hal tersebut di karenakan panas spesifik pada saat fasa cair lebih besar dari pada saat fasa padat (Fischer, 2006).

3. Konduktifitas Termal

Konduktifitas termal parafin sangat rendah yaitu sebesar 0.232 W/m.K. Sehingga laju perpindahan panas pada saat penyerapan maupun pelepasan panas menjadi sangat lambat. Nilai konduktifitas termal parafin dapat ditingkatkan dengan mencampurkan parafin dan material yang memiliki nilai konduktifitas termal yang tinggi.

4. Panas Laten

Parafin merupakan PCM yang memiliki panas laten yang cukup tinggi. Nilai panas laten pada parafin berbeda-beda tergantung dari jumlah ikatan karbonnya. Tingginya panas laten pada parafin merupakan keuntungan sebagai *thermal energy storage* karena pada dasarnya material yang memiliki panas laten yang tinggi dapat menyerap dan menyimpan panas

yang lebih banyak tanpa mengalami perubahan temperatur. Beberapa panas laten parafin berdasarkan jumlah ikatan karbon yang berbeda

5. Temperatur Leleh

Parafin memiliki temperatur leleh yang berbeda-beda bergantung pada jumlah ikatan atom karbonnya. Semakin tinggi kandungan atom karbon pada parafin maka temperatur lelehnya akan semakin tinggi juga, begitu juga sebaliknya. Hal ini disebabkan karena jumlah ikatan atom karbon yang banyak memiliki rantai karbon yang semakin panjang dan membentuk molekul yang lurus dan beraturan. Akibatnya, persinggungan antara molekul-molekul semakin luas dan gaya tarik menarik antar molekul semakin kuat sehingga diperlukan energi yang besar yang dapat dicapai pada temperatur tinggi untuk mengalahkan gaya-gaya tersebut. Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa parafin dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2.1 Titik leleh dan panas peleburan laten parafin (Sharma dkk, 2009)

Nomor atom	Titik leleh (°C)	Panas laten (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170

33	73.9	268
34	75.9	269

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 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 *double pipe heat exchanger* dimana pada penelitian ini juga dipasangkan sirip melintang di sisi luar pipa dalam *double pipe*. Penelitian ini merupakan penelitian yang 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 Juni 2022 sampai dengan bulan November 2022.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

a. Pemanas air

Pemanas air yang digunakan berupa koil pemanas, yaitu perangkat yang digunakan untuk memanaskan air atau udara. Biasanya listrik, koil pemanas bertindak seperti resistor besar, dan saat arus listrik mengalir melaluinya, ia mulai memanaskan. Koil pemanas yang digunakan mempunyai daya sebesar 650 watt. Nantinya koil pemanas ini akan dihubungkan dengan listrik dan dicelupkan pada air untuk memanaskan air pada temperatur tertentu. Pemanas air yang digunakan dapat dilihat seperti pada Gambar 3.1 berikut:



Spesifikasi:

- Daya: 650 W
- Material: Stainless Steel
- Tegangan: 230 Volt
- Panjang: 205 mm

Gambar 3.1 Pemanas air listrik

b. Kontroler suhu dan SSR

Pengontrol suhu PID Digital ganda REX-C100 dengan termokopel tipe K sebagai input pembaca suhu. Pengontrol suhu REX-C100 berfungsi 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. Kontroler suhu dan SSR yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini:



Spesifikasi:

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

Gambar 3.2 Kontroler suhu dan SSR

b. *Data Logger* dan *Thermocouple*

Data Logger dan *Thermocouple* digunakan untuk mengukur: temperatur parafin, temperatur fluida masuk dan keluar alat penukar panas, temperatur fluida masuk dan keluar tabung penyimpanan air. Perubahan temperatur direkam dalam *data logger* dan dapat disimpan dalam SD Card. *Data logger* dan *thermocouple* dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini:



Gambar 3.3 *Data logger* dan termokopel

Spesifikasi:

- Suhu perekaman: -50 s/d 1300°C
- Ketelitian: 0.1°C
- Input: 12 saluran
- Panjang kabel: 1 meter
- Temperatur ukur: -200 s/d 600°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 Shimge ZPS 15-9-140, seperti yang terlihat pada Gambar 3.4 berikut:



Gambar 3.4 Pompa air

Spesifikasi:

- Daya: 60/85/120 Watt
- Voltase: 220 V
- Temperatur air (maks.): 90°C
- Tekanan sistem (maks.): 10 bar
- Daya hisap (maks.): 9 meter
- Kapasitas (maks.): 27 l/menit
- 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 3.5 berikut ini:



Gambar 3.5 *Water flow meter*

Spesifikasi:

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

e. Selang pipa air panas

Selang air yang digunakan dalam penelitian ini adalah selang pipa air panas dimana selang ini dikhususkan untuk mengalirkan fluida panas yang digunakan untuk menghubungkan aliran fluida seperti pada skema pengujian. Selang pipa air panas yang digunakan adalah Pipa Westpex R dengan ukuran diameter 16 mm atau 5/8 inch dan ketahanan suhu sampai dengan 110°C seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut:



Gambar 3.6 Selang pipa air panas

f. Stop kran

Dalam penelitian ini digunakan variasi kecepatan aliran fluida sehingga dibutuhkan alat yang dapat memperbesar dan memperkecil aliran fluida.

Stop kran berfungsi mengontrol jumlah fluida yang mengalir seperti memperbesar dan memperkecil serta memutus aliran fluida dengan cara memutar pegangannya.

g. Alat penukar kalor

Alat penukar kalor yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat penukar kalor tipe *double pipe* dimana parafin terletak di bagian luar pipa sedangkan air mengalir di bagian dalam pipa. Bagian dalam pipa menggunakan bahan tembaga dengan diameter 5/8 inch dan pada bagian luar menggunakan pipa PVC dengan diameter 2 inch. Selain itu pada penelitian ini di bagian luar pipa alat penukar kalor juga digunakan pipa PVC untuk melihat fenomena yang terjadi pada parafin selama proses pengujian. Panjang keseluruhan dari alat penukar kalor ini adalah 50 cm.

Pada penelitian ini dilakukan variasi kecepatan aliran air juga digunakan tambahan sirip pada sisi luar pipa dalam *double pipe* dan dilakukan variasi jarak sirip seperti yang telah di rinci sebagai berikut:

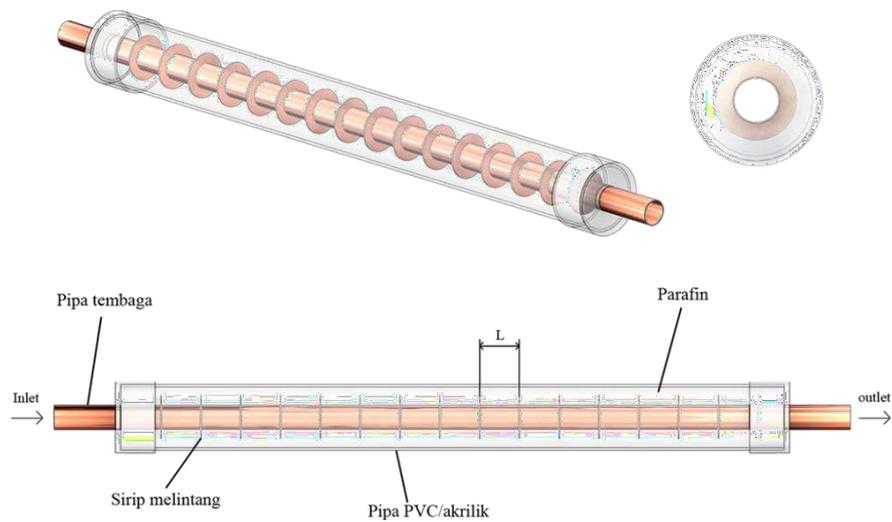
1. Variasi kecepatan aliran air

Kecepatan aliran air yang divariasikan pada penelitian ini adalah 4 l/min, 8 l/min, dan 12 l/min.

2. Variasi jarak sirip

Jarak antar sirip dapat divariasikan dari 3 cm, 4 cm, dan 5 cm untuk mengetahui pengaruh kerapatan sirip terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh.

Desain alat penukar panas dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut ini:



Gambar 3.7 Alat penukar panas dengan sirip melintang

Detail dari desain alat dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut ini:

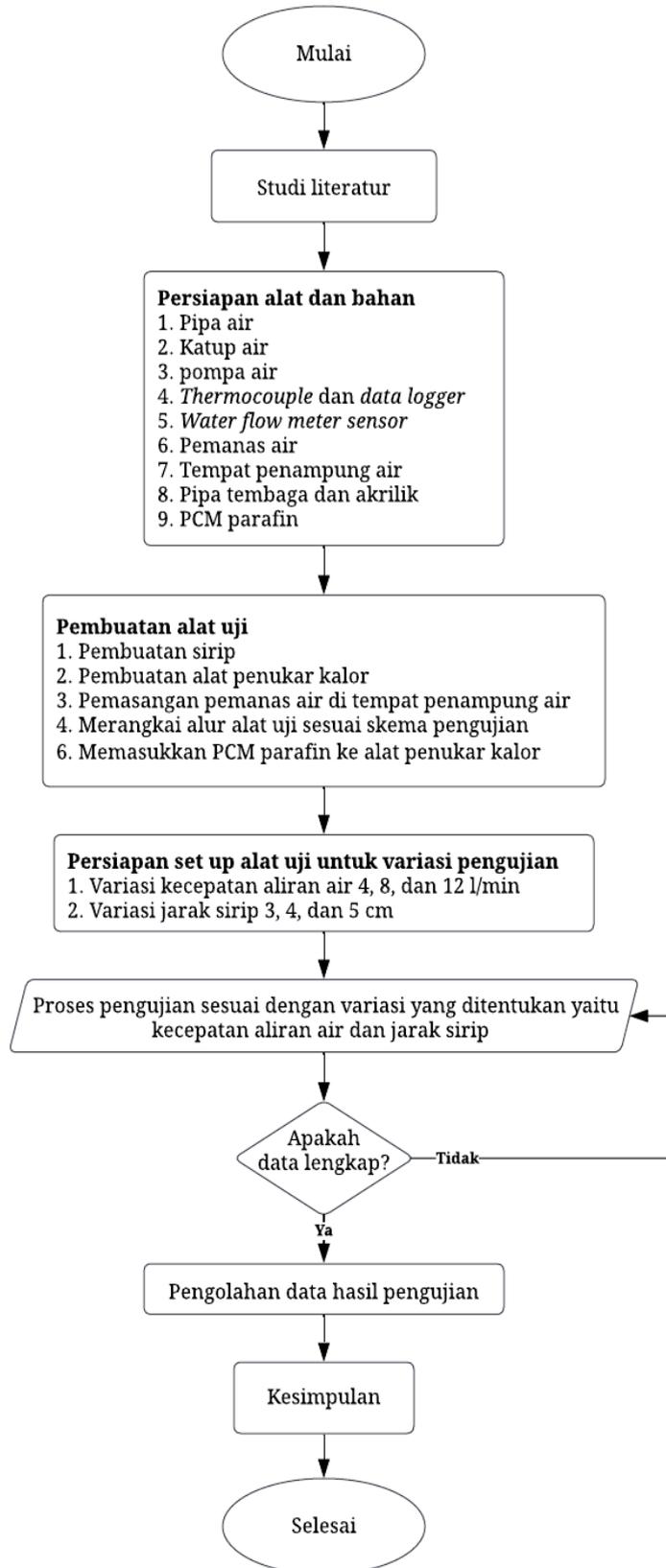
Tabel 3.1 Ukuran alat penukar panas

Nama	Keterangan
Pipa tembaga	Ukuran: 5/8" Panjang: 60 cm Diameter dalam: 13.42 mm Diameter luar: 15.8 mm
Pipa PVC	Ukuran: 2" Panjang: 50 cm Diameter dalam: 56.4 mm Diameter luar: 59 mm
Pipa akrilik	Ukuran: 2" Panjang: 50 cm Diameter dalam: 46 mm Diameter luar: 50 mm
Sirip	Diameter dalam: 15.8 mm Diameter luar: 32 mm Tebal: 1.07 mm L (jarak sirip): 3, 4, dan 5 cm

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 *double pipe*.

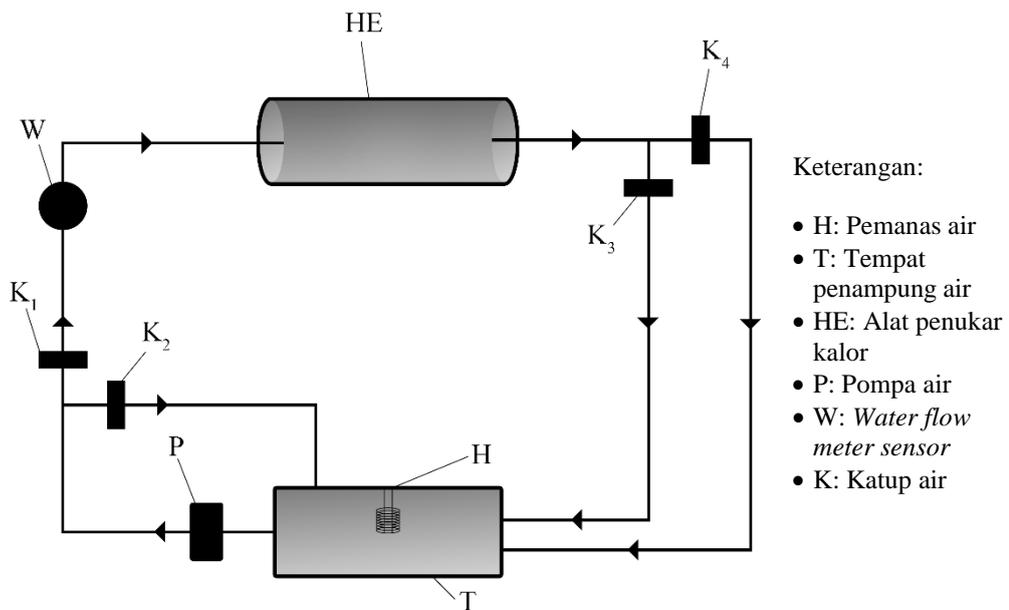
3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.8 Diagram alir penelitian

3.5 Skema Pengujian

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

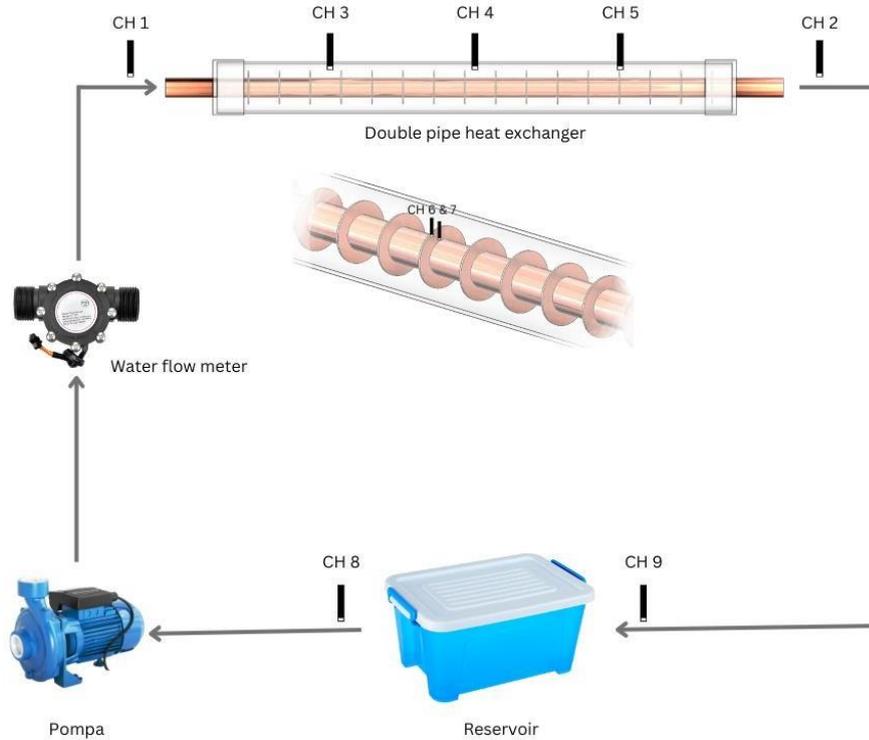


Gambar 3.9 Instalasi alat pengujian

3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3.10 Rangkaian alat uji



Gambar 3.11 Penempatan titik pengukuran

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Untuk pengukuran temperatur, digunakan 9 buah termokopel (CH 1 – CH 9).

CH 1 adalah temperatur air sebelum masuk *double pipe*, CH 2 adalah temperatur air sesudah keluar dari *double pipe*, CH 3 adalah temperatur parafin yang diletakkan 10 cm setelah pangkal pipa, CH 4 adalah temperatur parafin yang diletakkan ditengah pipa, CH 5 adalah temperatur parafin yang diletakkan 10 cm sebelum ujung pipa, CH 6 adalah temperatur sirip bawah *inner pipe*, CH 7 adalah temperatur sirip atas *inner pipe*, CH 8 adalah temperatur air sesudah keluar reservoir, dan CH 9 adalah temperatur air sebelum masuk ke reservoir kembali.

Untuk mengukur debit aliran air, *water flow meter* disambungkan dengan pipa penghubung diantara *double pipe* 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 (4 l/min, 8 l/min, dan 12 l/min) dan 3 variasi jarak sirip (3 cm, 4 cm, dan 5 cm).

3.7 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pengujian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti *double pipe*, *parafin*, dan *data logger*
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Menghidupkan data logger dan memasang thermocouple, dengan susunan CH1 adalah temperatur air sebelum masuk *double pipe*, CH 2 adalah temperatur air setelah keluar dari *double pipe*, CH 3, CH 4, dan CH 5 adalah temperatur paraffin (berurut dari pangkal ke ujung), CH 6 adalah

temperatur sirip bawah tembaga, CH 7 adalah temperatur sirip atas tembaga, CH 8 adalah temperatur air keluar reservoir, dan CH 9 adalah temperatur air masuk kembali ke reservoir.

4. Memanaskan air yang berada di reservoir sampai temperatur yang diinginkan dan temperatur dijaga agar tetap konstan.
5. Menghidupkan pompa air.
6. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat kecepatan aliran fluida.
7. Mengatur *stage panel* pompa (I, II, dan III) sesuai kecepatan yang akan diuji.
8. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air (K₂).
9. Memanaskan parafin di dalam alat penukar kalor dengan mengalirkan air panas yang terdapat di reservoir.
10. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 10 detik.
11. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam Ms. Excel.
12. Mengulangi langkah 1-11 dengan variasi kecepatan aliran air dan jarak sirip 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, terlebih dahulu menentukan kecepatan aliran air dengan jumlah dan jarak sirip yang akan digunakan untuk penelitian. Setelah air pada tempat penampung mencapai temperatur yang dikehendaki dan sudah konstan, kemudian air panas tersebut dialirkan ke dalam pipa bagian dalam (tube). Untuk mengetahui suhu pada parafin dan juga air maka digunakan *thermocouple*, serta untuk mengetahui kecepatan aliran air digunakan *water flow meter*, sehingga akan didapatkan data-data yang diperlukan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Semakin dekat variasi jarak antar sirip (3, 4, dan 5 cm) maka semakin besar selisih nilai temperatur air masuk dan keluar alat penukar kalor serta waktu yang dibutuhkan parafin untuk mencapai temperatur 63°C juga akan semakin cepat. Semakin besar variasi debit aliran air (4, 8, dan 12 l/min) maka semakin besar selisih nilai temperatur air masuk dan keluar alat penukar kalor namun waktu yang dibutuhkan parafin untuk mencapai temperatur 63°C justru semakin lama.
2. Semakin dekat variasi jarak antar sirip (3, 4, dan 5 cm) maka nilai laju perpindahan panas semakin besar dan semakin besar variasi debit aliran air (4, 8, dan 12 l/min) maka nilai laju perpindahan panas semakin besar pula. Nilai laju perpindahan panas terbesar ada pada variasi pengujian debit aliran air 12 l/min variasi jarak antar sirip 3 cm, yaitu senilai 542.60 watt sedangkan nilai terkecil ada pada variasi pengujian debit aliran air 4 l/min variasi jarak antar sirip 5 cm, yaitu senilai 32.78 watt.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk pengukuran temperatur pada parafin sebaiknya dilakukan dengan titik pengukuran yang banyak seperti pada bagian tengah dan juga bagian bawah pipa.
2. Agar energi kalor yang diserap parafin tidak keluar ke lingkungan, diperlukan bahan yang bersifat isolator untuk diletakkan pada bagian luar pipa.
3. Pada pengaplikasiannya sebaiknya gunakan alat penukar kalor dengan ukuran yang lebih besar sehingga perpindahan panas yang terjadi akan lebih besar.
4. Untuk kebutuhan penelitian selanjutnya mungkin dapat menggunakan variasi debit aliran air yang lebih besar dikarenakan pada penelitian ini belum didapat nilai optimumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, Muhamad. dan Nandi, Putra. 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, Yunus A. 2003. Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition. Mc. Graw- Hill Book. Singapura.
- Cengel, Yunus A dan M.A, Boles. 2005. Thermodynamics and Engineering Approach 5th Edition. McGraw-Hill Collage. Boston
- Fischer, U.R. 2006. Thermal Conductivity and Melting Point Measurements on Parafin 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
- Holman, J.P. 1995. Perpindahan Panas, Edisi keenam. Erlangga. Jakarta
- Incopera, Frank. P., Bergman, Theodore. L., Lavine, Andrienne. S., Dewitt, David. P. 2007. Fundamentals Of Heat And Mass Transfer Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc: River Street, Hoboken.
- Inouye, Kuramitsu. 1934. The relation between tensile strength and density of paraffin wax at various temperaturs. The University of British Columbia. Columbia.

- Irsyad, Muhammad., Natal A. H. L. Tobing., M. Dyan Susila. 2020. Pemanfaatan Material Fasa Berubah untuk Mempertahankan Kesegaran Sayuran. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- Kusumah, Tisna., Tatang Wahyudi., Mohamad Widodo. 2020. Phase Change Material Dari Campuran Parafin Untuk Tekstil Swa-Termoregulasi. Politeknik STTT. Bandung.
- Meng, Q. and Jinlian Hu. 2008. A poly(ethylene glycol)-based smart phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92: 1260-1268.
- 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. dan Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change material and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13, 318-345.
- Sharma, S.D., and Sagara, K. 2005. Latent heat storage material and system: a review. *International journal green energy*. 2: 1-56,2005.
- Young, Roger. A. & Freedman, T. R.. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh*. Alih Bahasa Endang Juliastuti. 2002. Erlangga. Jakarta
- Yuliani, Ika., Tina Mulya Gantina., Nurlita Yunikasari. 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. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCM) in Building Applications. *Applied Energy* 92 (2012) 593–605