

**KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA PROSES PEMBEKUAN PCM
PARAFIN MELALUI MEDIA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER*
DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG**

(Skripsi)

Oleh

AHMAD HANDICA AFREDO



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

2023

**KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA PROSES PEMBEKUAN PCM
PARAFIN MELALUI MEDIA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER*
DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG**

Oleh

AHMAD HANDICA AFREDO

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 PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN MELALUI MEDIA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG

Oleh:

Ahmad Handica Afredo

Energi surya adalah bentuk energi terbarukan yang bersih, berlimpah serta sumber energi yang ramah lingkungan. Energi matahari menjadi fokus penting untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil yang terbatas dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam pemanfaatan energi matahari diperlukan suatu alat seperti kolektor surya yang dapat menangkap dan mengkonversi energi matahari menjadi energi yang dapat diaplikasikan ke pemanasan air dan lainnya. Kolektor surya tidak dapat menyimpan energi ketika sinar matahari tidak tersedia, sehingga dibutuhkan suatu bahan yang dapat menyimpan panas seperti bahan perubahan fasa. *Phase change material (PCM)* merupakan suatu bahan yang dapat menyerap panas sensibel dan panas laten. PCM yang digunakan berupa *paraffin wax* (lilin parafin). Penelitian tentang penggunaan *paraffin wax* (lilin parafin) dalam kolektor surya menggunakan bantuan sistem *double pipe*. Dalam sistem *double pipe* ini menggunakan pipa luar (pvc) dan pipa bagian dalam (tembaga) dengan penambahan sirip melintang serta variasi jarak antar sirip (3 cm, 4 cm, dan 5 cm). Dari ketiga hasil pengujian dengan variasi jarak antar sirip maka besar selisih nilai temperatur air masuk dan keluar alat penukar kalor serta waktu yang dibutuhkan parafin mencapai temperatur 32°C hampir sama, sedangkan dengan variasi debit aliran air didapatkan ketika debit aliran 4 l/min laju perpindahan panas lebih besar dan waktu yang dibutuhkan parafin mencapai temperatur 32 °C lebih cepat dibandingkan debit aliran 12 l/min laju perpindahan panas yang terjadi lebih kecil dan waktu yang dibutuhkan parafin mencapai temperatur 32°C lebih lama.

Kata Kunci : Energi matahari, PCM, parafin, Laju Perpindahan Panas.

ABSTRACT

STUDY OF HEAT TRANSFER IN THE FREEZING PROCESS OF PARAFIN PCM THROUGH DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER MEDIA WITH THE ADDITION OF TRANSVERSE FINS

By:

Ahmad Handica Afredo

Solar energy is a form of renewable energy that is clean, abundant and an environmentally friendly energy source. Solar energy is an important focus to reduce dependence on limited fossil resources and reduce negative impacts on the environment. Utilizing solar energy requires a device such as a solar collector that can capture and convert solar energy into energy that can be applied to water heating and other things. Solar collectors cannot store energy when sunlight is not available, so a material is needed that can store heat such as a phase change material. Phase change material (PCM) is a material that can absorb sensible heat and latent heat. The PCM used is paraffin wax. Research on the use of paraffin wax in solar collectors using a double pipe system. This double pipe system uses an outer pipe (PVC) and an inner pipe (copper) with the addition of transverse fins and variations in the distance between the fins (3 cm, 4 cm and 5 cm). From the three test results with variations in the distance between the fins, the difference in the temperature value of the water entering and leaving the heat exchanger and the time required for the paraffin to reach a temperature of 32°C is almost the same, whereas with variations in the water flow rate it is obtained when the flow rate is 4 l/min the transfer rate The heat is greater and the time required for paraffin to reach a temperature of 32 °C is faster than the flow rate of 12 l/min. The rate of heat transfer that occurs is smaller and the time required for paraffin to reach a temperature of 32 °C is longer.

Keywords : Solar energy, PCM, paraffin, Heat Transfer Rate.

Judul Skripsi : KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA
PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN
MELALUI MEDIA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER*
DENGAN PENAMBAHAN
SIRIP MELINTANG

Mahasiswa : Ahmad Handica Afredo
Nomor Pokok Mahasiswa : 1815021007
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1



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

NIP. 19711214 200012 1 001

Komisi Pembimbing 2



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

NIP. 19930110 201903 1 008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



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

NIP. 19710331 199903 1 003

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



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

NIP. 19701104 199703 2 001

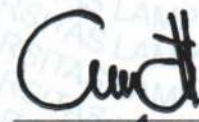
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

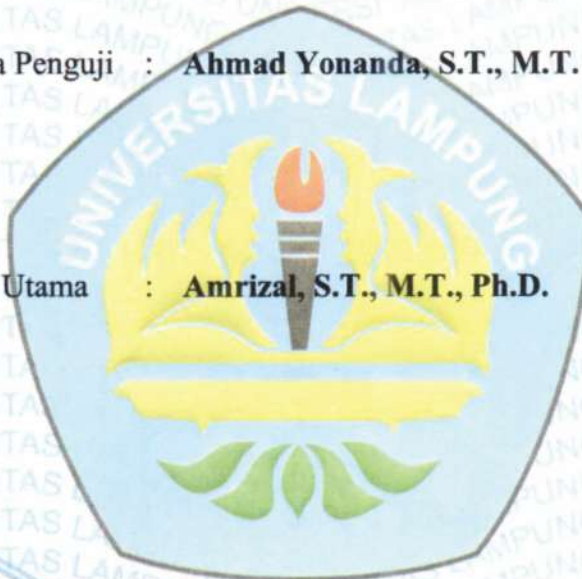
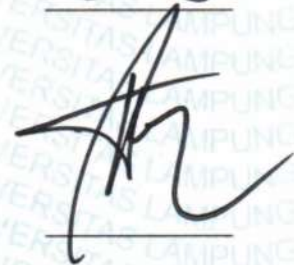
Ketua Penguji : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



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



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

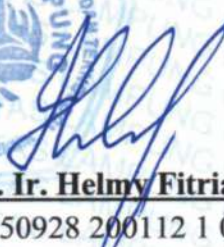


2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 29 November 2023

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

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

Bandar Lampung, 06 Desember 2023

Penulis,



AHMAD HANDICA AFREDO

NPM. 1815021007

MOTO

“Menyia-nyiakan waktu lebih buruk dari kematian. Karena kematian memisahkanmu dari dunia, sementara menyia-nyiakan waktu memisahkanmu dari Allah SWT”

(Imam bin Al Qayim)

“Lakukan yang terbaik dan lakukan dengan maksimal, karena itu akan menjadikanmu pribadi yang lebih baik”

(Ahmad Handica Afredo)

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 Rasulullah SAW yang memberikan tuntunan dan syafaatnya kepada umatnya agar berada pada jalan yang lurus. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan lebih lanjut. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Bapak Heryanto dan Ibu Sumasri 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. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Novri Tanti, 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 Penguji 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. Teman-teman penulis untuk Aditya, Gama, Waliyan, Rizky, Nisa, Steven, Yoga, Kautsar, dan Bagus K.Y yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
10. Teman-teman angkatan 2018 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 14 Agustus 2018 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.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, Lampung pada tanggal 24 Juni 2000 sebagai anak pertama dari 3 bersaudara, dari pasangan Bapak Heryanto dan Ibu Sumasri. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 1 Sukarame hingga tahun 2012, lalu dilanjutkan di SMP Kartika II-2 Bandar Lampung yang diselesaikan tahun 2015 dan SMA Negeri 10 Bandar Lampung yang diselesaikan tahun 2018, hingga pada tahun 2018 melanjutkan kuliah dan penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Organisasi Koperasi Konsumen Mahasiswa Universitas Lampung (Kopma Unila) dari tahun 2018 hingga tahun 2021, penulis pernah menjadi Kepala Divisi Kegiatan Organisasi Kopma Unila pada tahun 2020 dan menjadi Ketua Umum Organisasi Kopma Unila pada tahun 2021. Penulis juga aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PT. Kereta Api Indonesia (Persero) Divre IV UPT Depo Lokomotif Besar A Tanjung Karang, Bandar Lampung tahun 2021 dengan judul laporan “**ANALISIS LAJU PEMBUNAGAN PANAS PADA SISTEM PENDINGIN AIR DI RADIATOR LOKOMOTIF CC 205 DI PT. KERETA API INDONESIA (PERSERO) DIVRE IV UPT DEPO LOKOMOTIF BESAR A TANJUNG KARANG**”.

Tahun 2022 penulis melakukan penelitian dengan judul “**KAJIAN PERPINDAHAN KALOR PADA PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN MELALUI MEDIA *DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER* DENGAN PENAMBAHAN SIRIP MELINTANG**” dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	iv
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.....	5
2.1 Perpindahan Panas.....	5
2.1.1 Perpindahan Panas secara Konduksi.....	5
2.1.2 Perpindahan Panas secara Konveksi.....	7
2.1.3 Perpindahan Panas secara Radiasi	7
2.2 Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchanger</i>)	8
2.3 Jenis-Jenis Alat Penukar Kalor.....	10
2.4 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	12
2.5 Material Berubah Fasa.....	15
2.6 Klasifikasi PCM	16
2.6.1 PCM Organik.....	17
2.6.2 PCM Anorganik.....	17
2.6.3 PCM <i>Eutectic</i>	18
2.7 Parafin	18
2.8 Karakteristik Parafin.....	22
2.9 Kelebihan dan Kekurangan Parafin.....	24
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Tempat Pelaksanaan	25
3.2 Waktu Pelaksanaan.....	25
3.3 Alat dan Bahan	26
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	34

3.5 Skema Pengujian	35
3.6 Penempatan Titik Pengukuran.....	36
3.7 Metode Pengambilan Data	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
4.1 Hasil Pengambilan Data	41
4.1.1 Temperatur Air Masuk dan Keluar Alat Penukar Kalor.....	41
4.1.2 Temperatur Parafin	42
4.1.3 Temperatur Sirip	45
4.1.4 Waktu yang Dibutuhkan untuk Mencapai 32°C	47
4.2 Hasil Perhitungan	49
4.2.1 Laju Perpindahan Panas Air	49
4.2.2 Aliran Air.....	51
4.2.3 Perhitungan Kinerja	53
BAB 5 PENUTUP.....	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perpindahan Panas Konduksi	6
Gambar 2. 2 Perpindahan Panas Konveksi	7
Gambar 2. 3 Temperatur Aliran Searah (<i>Co-current</i>).....	9
Gambar 2. 4 Temperatur Aliran Berlawanan (<i>Counter-current</i>)	10
Gambar 2. 5 Aliran <i>Double Pipe Heat Exchanger</i>	11
Gambar 2. 6 <i>Plate-Frame Heat Exchanger</i>	11
Gambar 2. 7 <i>Shell and Tube Heat Exchanger</i>	12
Gambar 2. 8 Klasifikasi PCM	17
Gambar 2. 9 Parafin (a) Padat dan (b) Cair.....	19
Gambar 3. 1 Tangki Air	26
Gambar 3. 2 Data <i>Logger</i> dan <i>Thermocouple</i>	27
Gambar 3. 3 Pompa Air	28
Gambar 3. 4 <i>Water Flow Meter</i>	29
Gambar 3. 5 Selang Pipa Air Panas	30
Gambar 3. 6 <i>Stop Kran 5/8 inch</i>	30
Gambar 3. 7 Alat Penukar Kalor Dengan Sirip Melintang	32
Gambar 3. 8 Variasi Sirip Jarak 3 cm atau 17 sirip	32
Gambar 3. 9 Variasi Sirip Jarak 4 cm atau 13 sirip	32
Gambar 3. 10 Variasi Sirip Jarak 5 cm atau 11 sirip	33
Gambar 3. 14 Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 3. 15 Instalasi Alat Pengujian.....	35
Gambar 3. 16 Rangkaian Alat Uji.....	36
Gambar 3. 17 Penempatan Titik Pengukuran	36
Gambar 4. 1 Selisih Perbandingan Nilai Rata-rata Temperatur Air Masuk dan Keluar Alat Penukar Kalor.....	41
Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-rata Parafin di Debit Aliran Air 4 l/min	43
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-rata Parafin di Debit Aliran Air 8 l/min	43
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Temperatur Rata-rata Parafin di Debit Aliran Air 12 l/min	44
Gambar 4. 5 Perbandingan Temperatur Parafin.....	45
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Temperatur Sirip Bawah dan Sirip Atas	46
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Waktu Parafin Mencapai Temperatur 32°C ..	48
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Panas Air	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Sifat-sifat <i>Scale Paraffin Wax</i>	21
Tabel 3. 2 Spesifikasi Data <i>Logger</i> dan <i>Thermocouple</i>	27
Tabel 3. 3 Spesifikasi pompa air	28
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>water flow meter</i>	29
Tabel 3. 5 Ukuran alat penukar kalor	33
Tabel 3. 6 Keterangan <i>Channel Thermocouple</i> pada <i>Data Logger</i>	37
Tabel 4. 1 Data Laju Perpindahan Panas	50
Tabel 4. 2 Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	52
Tabel 4. 3 Energi yang diserap Air	53

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi surya adalah bentuk energi terbarukan yang bersih, berlimpah, mudah diperoleh, ramah lingkungan serta sumber energi yang ekonomis. Di daerah beriklim tropis seperti Indonesia, energi surya tentu sangat mudah didapatkan setiap harinya. Energi matahari adalah salah satu sumber Energi yang kaya dan berkelanjutan yang terus mengalir ke Bumi. Pemanfaatan Energi matahari telah menjadi fokus penting dalam upaya untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang terbatas dan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Salah Satu teknologi yang berkembang pesat dalam pemanfaatan energi matahari adalah kolektor surya. Kolektor surya adalah perangkat yang dirancang untuk menangkap dan mengkonversi energi matahari menjadi energi yang dapat digunakan. Kolektor surya memiliki aplikasi yang beragam, termasuk pemanasan air, pemanasan ruangan, dan pembangkitan listrik. Dalam konteks pemanfaatan energi matahari, kolektor surya memiliki tantangan utama dalam penyimpanan energi panas untuk digunakan ketika sinar matahari tidak tersedia. Jadi, diperlukan suatu solusi efisien untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi panas dan kemudian menyimpannya dengan baik. Dalam hal ini, digunakan sebuah bahan perubahan fasa (PCM) yang dapat digunakan untuk menyerap panas sensibel dan panas laten selama mode pengisian dan membebaskan yang sama selama mode pemakaian (Anita dkk, 2021).

Paraffin wax (lilin parafin) adalah salah satu *phase change material* (PCM), yang dapat digunakan sebagai 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). *Paraffin wax* memiliki kemampuan untuk menyerap dan melepaskan energi panas saat mengalami perubahan fasa dari padat ke cair, dan sebaliknya.

Dalam konteks penyimpanan energi panas dengan PCM, desain perangkat pengaliran panas memainkan peran penting dalam memaksimalkan efisiensi dan efektivitas proses. Dalam penelitian ini, menggunakan salah satu sistem perangkat pengaliran perpindahan panas dengan sistem *double pipe* (pipa ganda), di mana cairan panas dan PCM berada didalam suatu sistem yang saling berhubungan melalui dua pipa yang diletakkan bersama. Pada penelitian ini, transfer panas yang efisien antara cairan panas dan PCM memungkinkan PCM menyerap dan melepaskan energi panas dengan baik. Penelitian tentang penggunaan *paraffin wax* dalam kolektor surya dengan sistem *double pipe* adalah penting karena dapat memberikan solusi untuk penyimpanan energi panas yang efisien dalam mengkonversi energi matahari menjadi energi panas yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi.

Hal ini yang melatar belakangi kegiatan penelitian yang berjudul Kajian Perpindahan Kalor pada Proses Pembekuan PCM Parafin melalui Media *Double Pipe Heat Exchanger* dengan Penambahan Sirip Melintang. Dalam penelitian ini digunakan PCM jenis *paraffin wax* sebagai penyimpan energi termal dimana memiliki sifat-sifat yang baik dan sangat memungkinkan jika dikembangkan lebih lanjut. Pada penelitian ini juga menggunakan sistem *double pipe* (pipa ganda) sebagai media perpindahan panas, serta penambahan pemasangan posisi sirip melintang tegak lurus terhadap pipa tembaga untuk mengetahui pengaruh perpindahan kalornya. Penelitian ini dilakukan untuk mencari solusi yang lebih efisien dalam pemanfaatan energi matahari melalui kolektor surya dengan PCM dan sistem *double pipe* dengan penambahan sirip melintang pada pipa bagian dalam.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran air dan jarak sirip pada pipa terhadap waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur titik beku parafin.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran air dan jarak sirip pada pipa terhadap laju perpindahan panas yang terjadi pada parafin selama proses pembekuan 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 *paraffin wax* atau lilin parafin
2. Jenis material pipa luar alat penukar kalor yang digunakan adalah pipa PVC dengan ukuran diameter 2 inch.
3. Jenis material pipa dalam alat penukar kalor yang digunakan adalah pelat tembaga dengan ukuran 5/8 inch.
4. Bentuk sirip yang akan dirancang adalah melintang dengan ukuran diameter 32 mm dan ketebalan 1 mm.
5. Jenis material sirip yang digunakan adalah pelat tembaga dengan variasi jarak sirip 3 cm, 4 cm, dan 5 cm.
6. Variasi kecepatan aliran air sebesar 4 l/min, 8 l/min, dan 12 l/min.

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

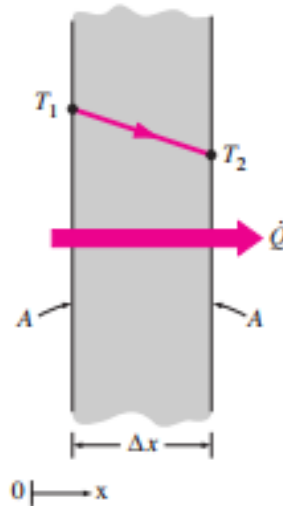
Perpindahan panas adalah ilmu yang menjelaskan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur di antara benda atau material. Bila dua sistem yang temperaturnya berbeda disinggungkan maka akan terjadi perpindahan energi. Proses di mana perpindahan energi itu berlangsung disebut perpindahan 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).

Fenomena perpindahan panas berperan penting dalam beberapa persoalan industri dan lingkungan. Sebagaimana tempat penting pada produksi dan konversi energi. Tidak hanya satu penggunaan dalam tempat ini yang tidak melibatkan efek perpindahan panas dalam berbagai proses. Di dalam pembangkit listrik, baik menggunakan bahan bakar nuklir, minyak atau menggunakan sumber bumi ada begitu banyak persoalan perpindahan panas yang harus dipecahkan. Fenomena fisik perpindahan panas dapat terjadi secara konduksi, konveksi dan radiasi (Cahyaningdias, 2019).

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 & A, 2003).



Gambar 2. 1 Perpindahan Panas Konduksi

(Sumber : Cengel & A, 2003)

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

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

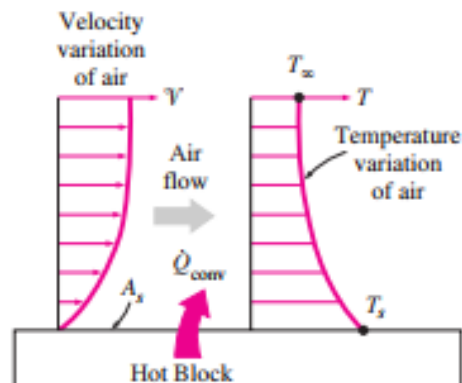
Dimana:

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

2.1.2 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 3 cara, yaitu :

1. Konveksi bebas (*free convection*) atau *natural convection*, yaitu konveksi dimana aliran fluida terjadi bukan karena dipaksa oleh suatu alat, tetapi disebabkan karena gaya apung (*buoyancy force*).
2. Konveksi paksa (*force convection*), yaitu konveksi yang terjadi dimana aliran fluida disebabkan oleh peralatan bantu seperti *fan*, *blower* dan lain-lain.
3. Konveksi dengan perubahan fase, yaitu sama seperti pendidihan (*boiling*) dan pengembunan (kondensasi) (Ricki, 2008).



Gambar 2. 2 Perpindahan Panas Konveksi

(Sumber : Cengel & A, 2003)

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

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A \Delta T \quad (2. 2)$$

Dimana:

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

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

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 bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda itu terpisah di dalam ruang. Radiasi termal merupakan energi yang dipancarkan oleh materi yang berada pada suhu 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. Persamaan laju kalor radiasi, seperti diperlihatkan pada persamaan berikut :

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

Dimana:

\dot{Q}_{rad} : Perpindahan panas radiasi (W)
 e : Emisivitas permukaan
 σ : Konstanta Stefan-boltzmann $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$

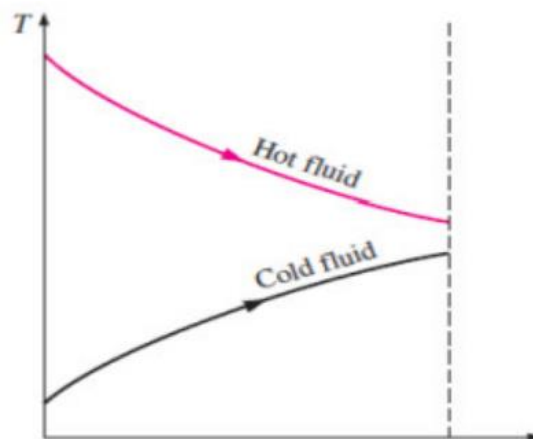
2.2 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

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. *Heat xchanger* merupakan suatu perangkat atau sistem yang dirancang khusus untuk memfasilitasi pertukaran energi panas antara dua fluida dengan suhu berbeda tanpa mencampurkan keduanya. Terdapat tiga aliran penukar panas yaitu penukar panas dengan aliran searah (*co-current*) dan

penukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter-current*), dan penukaran panas dengan silang (*cross*) (Cengel & A, 2003).

2.2.1 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.

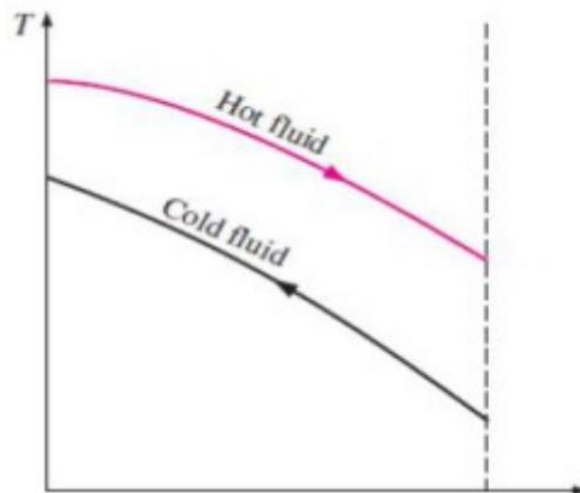


Gambar 2. 3 Temperatur Aliran Searah (*Co-current*)

(Sumber : Cengel & A, 2003).

2.2.2 Berlawanan Arah

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



Gambar 2. 4 Temperatur Aliran Berlawanan (*Counter-current*)

(Sumber: Cengel & A, 2003)

2.2. 3 Aliran Silang

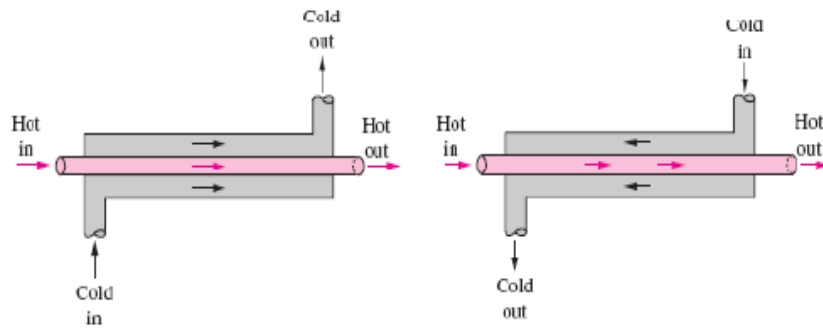
Cross-flow atau sering disebut dengan aliran silang adalah apabila fluida-fluida yang mengalir sepanjang permukaan bergerak dalam arah saling tegah lurus.

2.3 Jenis-Jenis Alat Penukar Kalor

Jenis-jenis heat exchanger dapat dibedakan atas:

2.3. 1 Tipe pipa rangkap (*double pipe heat exchanger*)

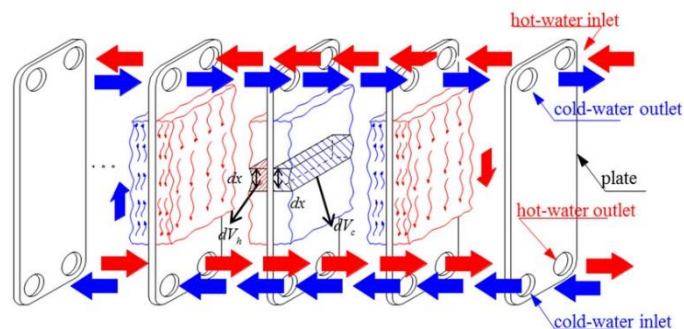
Double pipe heat exchanger adalah alat penukar kalor dimana suatu aliran fluida dalam pipa mengalir dari titik sisi satu ke sisi lain. Cairan yang mengalir dapat berupa aliran searah atau berlawanan. Alat penukar kalor ini dapat dibuat dari pipa yang panjang dan dihubungkan satu sama lain. *Double pipe 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 & A, 2003).

2.3. 2 Plate-Frame

Plate-frame merupakan jenis *heat exchanger* dimana fluida panas dan dingin dialirkan secara tidak langsung (*indirect contact*). Dalam *plate heat exchanger*, pelat disusun dengan susunan tertentu, sehingga terdapat dua jalur yakni *hot side* and *cold side*. *Hot side* dialiri fluida yang relatif lebih tinggi suhunya, sedangkan *cold side* dialiri fluida yang relatif lebih rendah suhunya. Zat cair yang digunakan sebagai pendingin bisa dari jenis yang sama maupun berbeda. Pertukaran panas terjadi dari cairan yang lebih panas ke cairan yang lebih dingin melalui pelat-pelat yang memisahkan kedua jalur. Pada *intercooler* fluida yang digunakan sama, yaitu berupa air, dimana air pendingin *primary* dialirkan untuk mendinginkan pendingin *secondary* (Atikayanti, 2019).

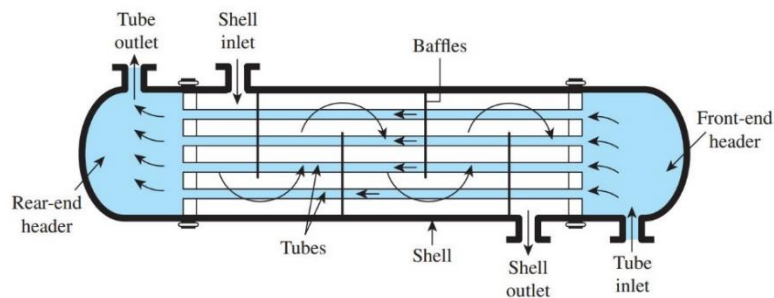


Gambar 2. 6 *Plate-Frame Heat Exchanger*

(Sumber : Syaichurrozi, 2014).

2.3.3 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. 7 *Shell and Tube Heat Exchanger*

(Sumber : Francesca dkk, 2020).

2.4 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.4.1 Panas yang Diserap

Dalam penelitian ini yang menjadi sasaran dalam analisis penelitian ini adalah laju perpindahan panas. Pada penukar panas, transfer panas ini mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah antara 2 temperatur benda yang berbeda. Dalam penelitian ini perpindahan panas adalah fungsi dari tingkat cairan massa aliran, perubahan suhu dan kapasitas panas spesifik dari cairan (Perbandingan suhu rata-rata), dalam hal ini menggunakan persamaan dasar perpindahan panas:

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

Dimana:

- \dot{Q} : Laju Perpindahan Panas (J/s)
 \dot{m} : Laju Aliran Massa (kg/s)
 C_p : Panas Spesifik (J/kg. °C)
 ΔT : Beda temperatur (°C)

Dalam hal ini kita dapat mengetahui kinerja perpindahan panas yang terjadi dengan cara menghitung panas masuk dan kapasitas penyimpanan panas dari air. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan kinerja perpindahan panas, sebagai berikut:

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

Dimana:

- E_{air} : Energi pada Air (Joule)
 T : Lama Waktu Perpindahan Panas (s)

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

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

Dimana:

- ρ : Massa Jenis (kg/m³)
 m : Massa Benda (kg)
 v : Volume Benda (m³)

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 :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = m_H \cdot C_{pH} \cdot \Delta T_H = m_c \cdot C_{pc} \cdot \Delta T_c \quad (2.7)$$

2.4.2 Perbedaan Temperatur Rata-Rata Logaritmik (*Logaritmik Mean Temperature Difference*)

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

$$LMTD = \frac{(T_{H2} - T_{C2}) - (T_{H1} - T_{C1})}{\ln\left(\frac{T_{H2} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}}\right)} \quad (2.8)$$

Dimana:

LMTD : *Logaritmik Mean Temperature Difference* (K)

T_H : Temperatur Fluida Panas (K)

T_c : Temperatur Fluida Dingin (K)

2.4.3 Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

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

$$U = \frac{\dot{Q}_e}{A \times LMTD} \quad (2.9)$$

Dimana:

U : Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh (W/K.m²)

A : Luas Penampang (m²)

2.4.4 Bilangan *Reynolds*

Bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia (v_{sp}) terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya aliran laminar dan aliran turbulen. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (2.10)$$

Dimana untuk mencari bilangan Reynold ini kita harus mengetahui nilai kecepatan air yang mengalir (V), diameter dalam pada pipa tembaga (D), massa jenis air (ρ), dan viskositas dinamik air (μ). Umumnya, bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan bahwa suatu aliran fluida termasuk ke dalam aliran turbulen atau aliran laminar. Penggunaan bilangan Reynold merupakan akibat dari adanya kemiripan dinamis antara aliran turbulen dan aliran laminar. Kesulitan yang ditemukan ialah pada pola geometri yang mirip meski pada jenis fluida dan laju alir yang berbeda. Keberadaan bilangan Reynold mempermudah penentuan aliran fluida dalam dinamika fluida yang mengalami kemiripan dinamis.

2.5 Material Berubah Fasa

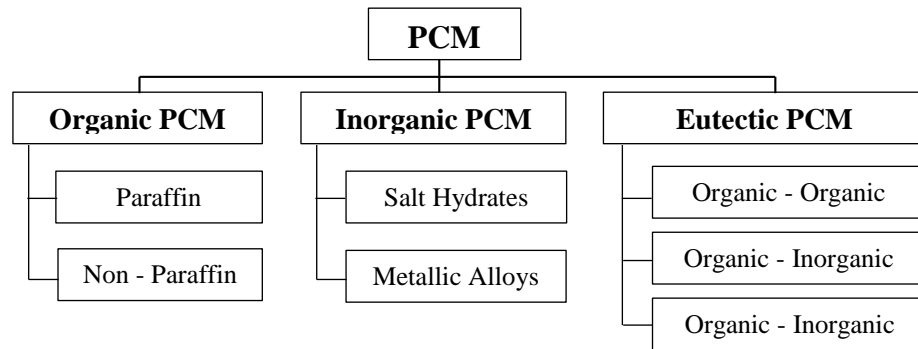
Material berubah fasa atau selanjutnya dikenal sebagai *Phase Change Materials* (PCM) yang juga seringkali disebut sebagai bahan-bahan penyimpan panas laten adalah bahan yang mempunyai kemampuan untuk melepaskan energi panas yang sangat tinggi dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa perubahan temperatur (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 dibanding-kan 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 energi 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 2.8 berikut ini:



Gambar 2. 8 Klasifikasi PCM

(Sumber : Yang, 2019).

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*.

1. *Salt Hydrates* memiliki beberapa sifat yang dapat dikategorikan menjadi *Phase Change Material* yaitu memiliki kalor laten yang tinggi per satuan volume, konduktivitas termal tinggi, dan tidak korosif.
2. Logam yang dapat dijadikan PCM adalah logam dengan titik leleh yang rendah dan logam *eutectics*.

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 penyimpanan 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 2.9 berikut ini:



Gambar 2. 9 Parafin (a) Padat dan (b) Cair

Pada umumnya parafin padat mempunyai temperatur leleh antara $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 parafin merupakan masalah yang harus diatasi ketika digunakan sebagai penyimpan energi termal. Oleh sebab itu,

pemilihan material PCM sebagai penyimpanan energi termal perlu dipertimbangkan. Panas atau energi yang disimpan oleh parafin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{\text{par}} = m_{\text{liquid}} \cdot C_{p \text{ liquid}} \cdot (T_f - T_m) + m_{\text{par.solid}} \cdot L + m_{\text{solid}} \cdot C_{p \text{ solid}} \cdot (T_m - T_i) \quad (2.11)$$

Dimana:

- T_f : Temperatur Akhir Parafin ($^{\circ}\text{C}$)
- T_m : Temperatur Tengah Parafin ($^{\circ}\text{C}$)
- T_i : Temperatur Awal Parafin ($^{\circ}\text{C}$)
- L : Kalor Peleburan (kJ/Kg)

2.7.1 Paraffin Wax

Paraffin wax merupakan suatu jenis lilin yang terbuat dari campuran hidrokarbon alifatik, yang biasanya ditemukan dalam bentuk padat, berwarna putih hingga kuning kecoklatan. Parafin ini adalah produk turunan dari pemrosesan minyak bumi selama proses permurnian minyak. Hal ini, masuk kedalam hidrokarbon jenuh yang mengandung lebih dari 16 rantai C dan berada dalam keadaan padat pada temperatur ruangan (Schmidt, 2010).

Keadaan fisik paraffin wax sangat ditentukan oleh panjang pendeknya rantai alkane. Parafin wax memiliki titik leleh antara 500 C hingga 700C (Schmidt, 2010). Titik didih paraffin wax dipengaruhi oleh gaya Van der Wall dan panjang alkane. Gaya Van der Wall meningkatkan titik didih apabila semakin besar gayanya, sedangkan titik didih semakin rendah apabila alkane bercabang semakin meningkat. Untuk titik leleh paraffin dipengaruhi oleh panjang pendeknya alkane, semakin panjang alkane maka semakin tinggi titik lelehnya.

Tabel 2. 1 Sifat-sifat *Scale Paraffin Wax*

Property	Nilai
Temperatur Cair	51-57, main peak : 55 °C
Kalor Peleburan (Kombinasi dari panas laten dan sensible di rentang temperatur 48°C to 63 °C)	170 (kJ/kg)
Kalor Spesifik	2 (kJ/kg.k)
Massa Jenis (Padat)	876.62 (kg/m ³)
Massa Jenis (Cair)	760 (kg/m ³)
Suhu Awal Pengujian	32°C
Suhu Akhir Pengujian	63°C
Total Massa Parafin Variasi Sirip Jarak 3 cm	
Total Massa Paraffin (Cair)	1,783 kg
Total Massa Paraffin (Padat)	1,783 kg
Total Massa Parafin Variasi Sirip Jarak 4 cm	
Total Massa Paraffin (Cair)	1,759 kg
Total Massa Paraffin (Padat)	1,759 kg
Total Massa Parafin Variasi Sirip Jarak 5 cm	
Total Massa Paraffin (Cair)	1,727 kg
Total Massa Paraffin (Padat)	1,727 kg

Pada Tabel 2.1 merupakan sifat-sifat dari *paraffin wax*, dimana terdapat beberapa nilai seperti kalor spesifik, kalor peleburan, dan juga massa jenis pada saat padat dan juga cair. Kepadatan *paraffin wax* umumnya meningkat dengan meningkatkan massa molekul tetapi masih dibawah 1 g/m³ yang merupakan massa jenis air. Parafin wax juga bersifat non polar, sehingga *paraffin wax* tidak larut dalam air tetapi larut dalam pelarut minyak non polar contoh seperti benzene, eter dan ester tertentu.

2.7.2 White Oil (Parafin Cair)

Parafin cair adalah minyak mineral yang terdiri dari campuran hidrokarbon cair yang dihasilkan dari minyak bumi. Minyak ini merupakan cairan bening, tidak berwarna, tidak larut dalam alkohol

atau air, tidak berbau dan tidak berasa namun jika dipanaskan sedikit berbau minyak tanah. Minyak mineral berfungsi sebagai pelarut dan penambah viskositas dalam fase minyak. Parafin cair memiliki titik lebur sekitar 500C sampai 610C. Parafin cair ini juga tidak menyebabkan toksin atau racun (Enno NH, 2014).

2.8 Karakteristik Parafin

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

2.8.1 Massa jenis

Parafin memiliki masa jenis 880 kg/m³ 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 energi storage perlu diwaspadai terutama mengenai volume parafin pada saat mengalami pemuaian. Volume yang digunakan untuk menyimpan parafin harus dibuat lebih besar sehingga pada saat parafin mengalami kenaikan temperatur, proses pemuaian dapat diantisipasi dengan besarnya volume yang telah disiapkan sehingga tidak mengalami kebocoran.

2.8. 2 Panas Spesifik

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

2.8. 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.

2.8. 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 energi 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

2.8. 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.

2.9 Kelebihan dan Kekurangan Parafin

Parafin sebagai penyimpan energi termal juga mempunyai kelebihan dan kekurangan dalam proses penggunaannya. Berikut adalah kelebihan dan kelemahan parafin sebagai penyimpan energi termal:

2.9.1 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).

2.9.2 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).

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 menyimpan dan memberikan kalor. Bahan baku PCM yang digunakan pada penelitian ini adalah parafin. Hal ini disebabkan karena parafin memiliki harga yang ekonomis dan ketersediaannya yang melimpah di Indonesia serta memiliki karakteristik yang baik sebagai *thermal energi storage*. Alat utama yang digunakan pada penelitian ini yaitu alat penukar kalor dengan tipe *double pipe heat exchanger* dimana pada penelitian ini dipasangkan sirip melintang di sisi luar pipa tembaga dalam alat pengujian perpindahan kalor. 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 September 2022 sampai dengan bulan November 2023.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu :

1. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

a. Tangki Air

Tangki air merupakan wadah untuk menampung kebutuhan air dari keran sebelum air disalurkan melalui pipa-pipa dalam proses pembekuan parafin. Tangki air ini dapat menampung air sebanyak 85 liter air, yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3. 1 Tangki Air

b. *Data Logger dan Thermocouple*

Data Logger dan *Thermocouple* digunakan untuk mengukur: temperatur parafin, temperatur fluida masuk dan keluar alat penukar kalor, temperatur sirip atas dan temperatur sirip bawah. Perubahan temperatur direkam dalam data logger dan dapat disimpan dalam *SD Card*. *Data Logger* dan *Thermocouple* dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.2 berikut ini:

Tabel 3. 1 Spesifikasi Data *Logger* dan *Thermocouple*

Spesifikasi Data <i>Logger</i>	
Merk	LU BTM-4208 SD
Suhu <i>min/max</i>	-50 °C s/d 1300 °C
<i>Record external</i>	0,1 °C
Ketelitian	SD Card
Maks. input	12 saluran
Spesifikasi <i>Thermocouple</i>	
Diameter Kabel	2*0,5 mm
Panjang Kabel	meter
Layer	<i>Blue Teflon Temperatur (ptfe)</i>
Temperatur Ukur	-200 °C s/d 600 °C
Ketelitian	0.1 °C

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

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 Tabel 3.2 dan Gambar 3.3 berikut:

Tabel 3. 2 Spesifikasi pompa air

Spesifikasi Pompa Air	
Daya	60/85/120 Watt
<i>Voltase</i>	220 V
Temperatur air (maks)	90 °C
Tekanan sistem (maks)	10 bar
Daya dorong (maks)	9 meter
Kapasitas (maks)	27 l/menit
Ukuran pipa	¾ inch



Gambar 3. 3 Pompa Air

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 Tabel 3.3 dan Gambar 3.4 berikut ini:

Tabel 3. 3 Spesifikasi *water flow meter*

Spesifikasi <i>Water Flow Meter</i>	
Model	ZJ-LCD-M
Merk	Sea (Zhongjiang)
Satuan	LPM (Liter per menit)
Rentang tegangan operasi	DC 24V 8V/1A
Rentang kuantitatif	0.1 - 9999 LPM
Ukuran Instrumen Kontrol	100 x 78 x 35 mm

Gambar 3. 4 *Water Flow Meter*

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 3.5 berikut:



Gambar 3. 5 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, seperti pada Gambar 3.6 berikut ini:



Gambar 3. 6 *Stop Kran 5/8 inch*

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 tembaga dan didalam bagian pipa pvc sedangkan air mengalir di bagian dalam pipa tembaga. Pada alat penukar kalor tipe *double pipe* terdapat pipa bagian dalam 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 alat penukar kalor juga menggunakan pipa berbahan kaca akrilik untuk melihat fenomena yang terjadi pada parafin selama proses pengujian. Panjang keseluruhan dari alat penukar kalor ini adalah 50 cm.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian perpindahan panas pada model *double pipe* dengan variasi kecepatan aliran air dan juga variasi jarak antar sirip pada pipa tembaga atau pada pipa bagian dalam alat penukar kalor. Pada bagian luar pipa tembaga digunakan tambahan sirip dengan pemasangan posisi sirip melintang atau tegak lurus terhadap pipa tembaga dan dilakukan variasi jarak sirip seperti yang telah di rinci sebagai berikut:

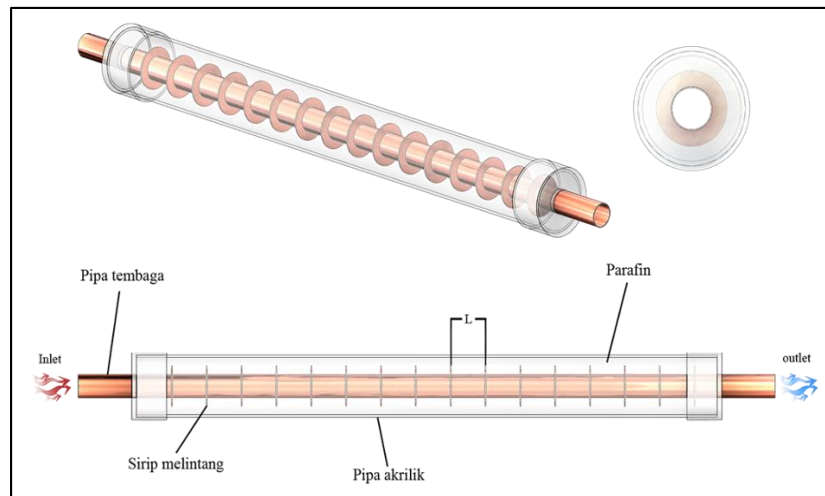
1) Variasi kecepatan aliran air

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

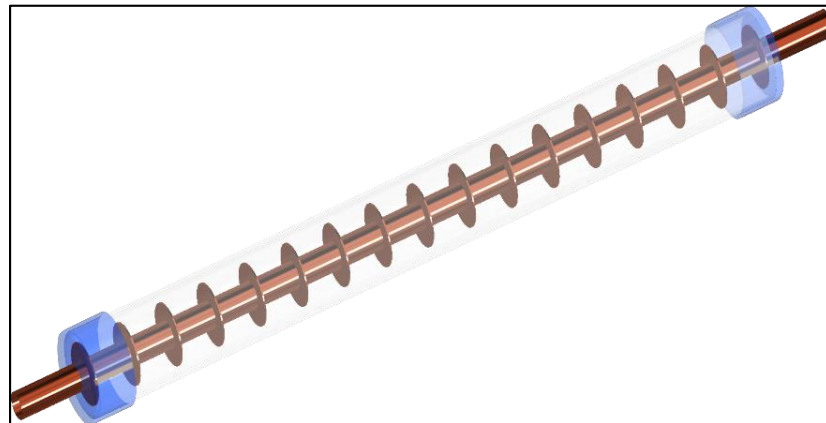
2) Variasi jarak sirip

Jarak antar sirip dapat divariasikan dari 3 cm, 4 cm, dan 5 cm untuk mengetahui pengaruh kerapatan sirip terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh, dapat dilihat pada Gambar 3.8 , Gambar 3.9 , dan Gambar 3.10.

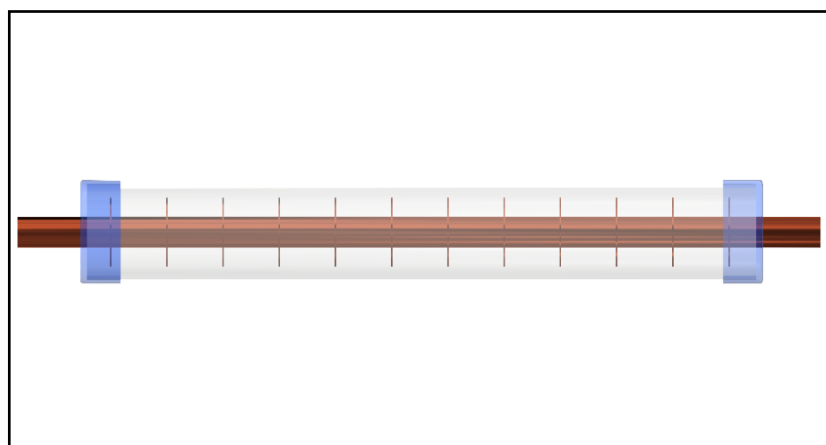
Pada penelitian melakukan percobaan perpindahan kalor melalui media *double pipe heat exchanger* yang dapat dilihat melalui desain alat penukar kalor pada Gambar 3.7 berikut ini:



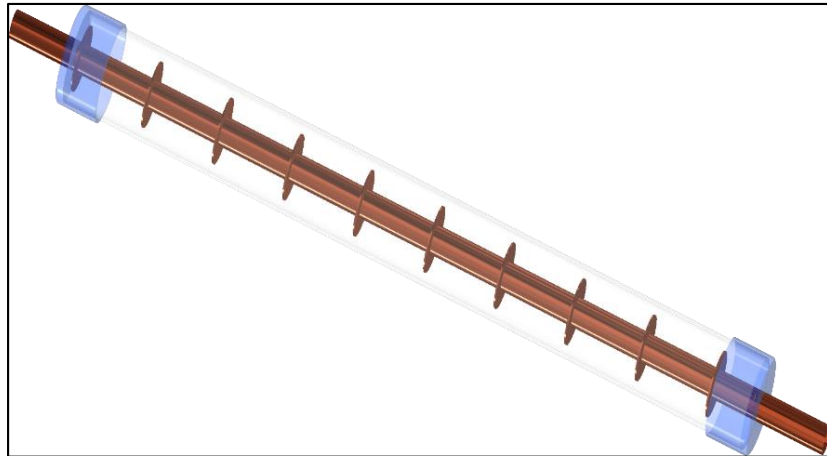
Gambar 3. 7 Alat Penukar Kalor Dengan Sirip Melintang



Gambar 3. 8 Variasi Sirip Jarak 3 cm atau 17 sirip



Gambar 3. 9 Variasi Sirip Jarak 4 cm atau 13 sirip



Gambar 3. 10 Variasi Sirip Jarak 5 cm atau 11 sirip

Rincian dari desain alat penukar kalor *double pipe* meliputi ukuran, panjang, lebar dari alat pengujian dan dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut ini:

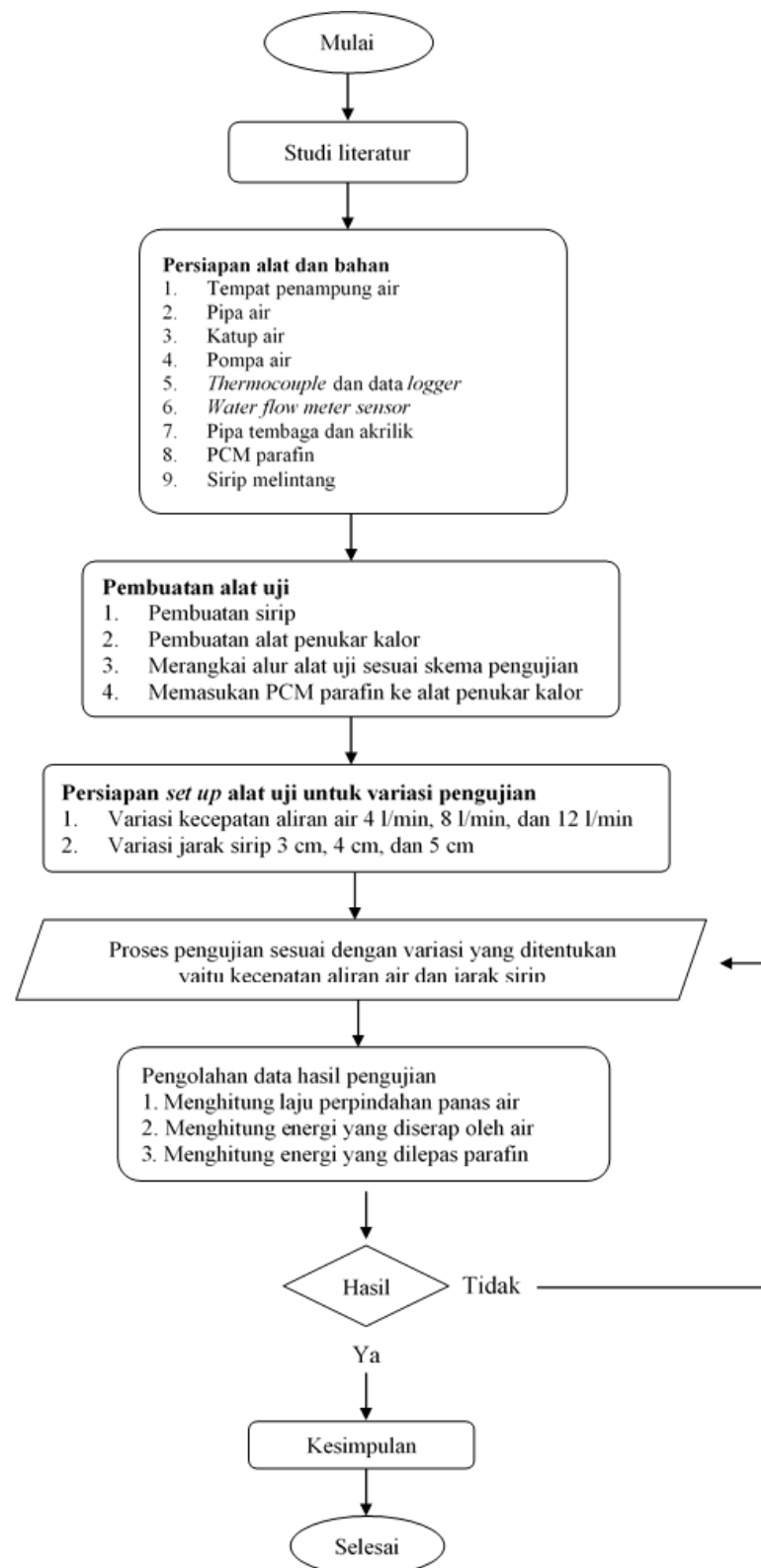
Tabel 3. 4 Ukuran alat penukar kalor

Nama	Ukuran Pipa	Diameter dalam	Diameter luar	Tebal	Panjang
	(inch)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)
Pipa Tembaga	5/8	15	16	1	60
Pipa akrilik / PVC	2	46	50	4	50
Sirip L (jarak sirip) : 3, 4, dan 5 cm	-	16	36	1	-

2. Bahan

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah air dan parafin. Air disirkulasikan oleh pompa dari penampungan air menuju alat penukar kalor kemudian keluar ketempat pembuangan air. Parafin sebagai material berubah fasa yang digunakan berjenis padat atau lilin parafin yang kemudian diletakkan diantara pipa tembaga dan pipa PVC.

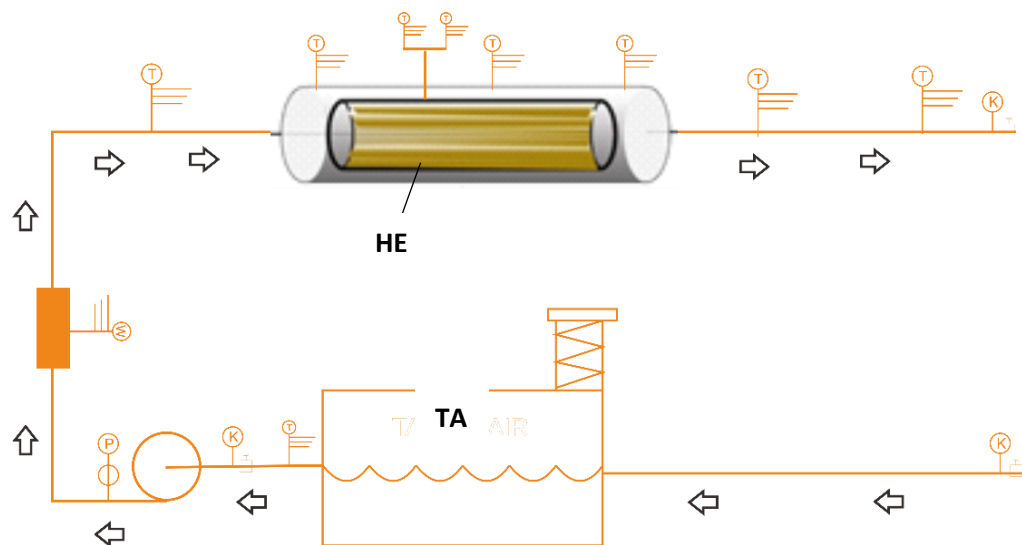
3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 11 Diagram Alir Penelitian

3.5 Skema Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian yang mana bermula dari parafin dengan suhu sebesar 65°C atau masih dalam bentuk cair dimasukkan kedalam pipa PVC, kemudian fluida berupa air yang berasal dari keran air dengan suhu 32°C yang kemudian dialirkan ke alat penukar kalor (*double pipe*) dengan menggunakan bantuan pompa hingga parafin membeku. 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 kalor, serta temperatur sirip atas dan sirip bawah pada pipa tembaga dapat diketahui dengan *thermocouple* dan dapat dilihat melalui data *logger*. Instalasi alat pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.12, Gambar 3.14 dan rincian pemasangan *thermocouple* pada Tabel 3.5 berikut ini:



Gambar 3. 12 Instalasi Alat Pengujian

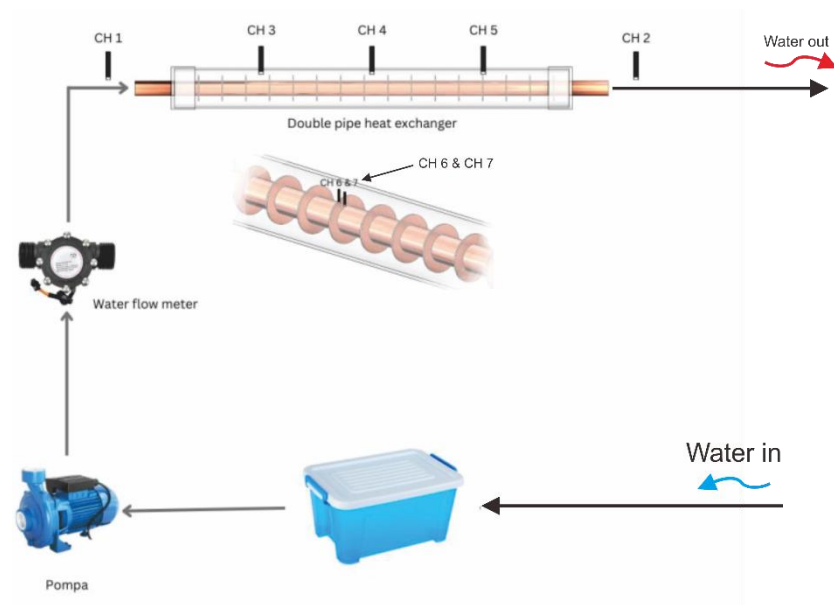
Keterangan :

- TA : Tempat Penampung Air
- P : Pompa Air
- W : *Water Flow Meter Sensor*
- HE : Alat Penukar Kalor
- K : Katup Air
- T : *Probe Suhu*

3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3. 13 Rangkaian Alat Uji



Gambar 3. 14 Penempatan Titik Pengukuran

Tabel 3. 5 Keterangan *Channel Thermocouple* pada *Data Logger*

Nama Channel	Keterangan
Channel 1 (CH 1)	Air Masuk (T_{in})
Channel 2 (CH 2)	Air Keluar (T_{out})
Channel 3 (CH 3)	Suhu Parafin ke-1 ($T_{par,1}$)
Channel 4 (CH 4)	Suhu Parafin ke-2 ($T_{par,2}$)
Channel 5 (CH 5)	Suhu Parafin ke-3 ($T_{par,3}$)
Channel 6 (CH 6)	Sirip bawah (T_{bottom})
Channel 7 (CH 7)	Sirip Atas (T_{upper})

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan dilihat melalui *data logger* serta pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Untuk pengukuran temperatur, menggunakan 7 buah termokopel dari CH 1 sampai dengan CH 7.

CH 1 untuk mengetahui temperatur air sebelum masuk ke dalam alat penukar kalor, CH 2 untuk mengetahui temperatur air keluar setelah melewati alat penukar kalor, CH 3 untuk mengetahui temperatur parafin yang diletakkan 10 cm setelah pangkal pipa, CH 4 untuk mengetahui temperatur parafin yang diletakkan ditengah pipa, CH 5 untuk mengetahui temperatur parafin yang diletakkan 10 cm sebelum ujung pipa, CH 6 untuk mengetahui temperatur sirip bawah pada pipa tembaga dan CH 7 untuk mengetahui temperatur sirip atas pada pipa tembaga.

Untuk mengukur debit aliran air selama pengujian, *water flow meter* disambungkan dengan pipa penghubung diantara alat penukar kalor *double pipe* dan katup *bypass*. Pengambilan data temperatur selama pengujian pembekuan parafin dilakukan setiap 30 detik dengan menggunakan *data logger* sebagai alat bantu merekam percobaan pengujian. Percobaan dilakukan sebanyak 9 kali dimana terdiri dari 3 variasi debit aliran diantaranya 4 l/min, 8 l/min, dan 12 l/min serta 3 variasi percobaan dengan variasi jarak sirip yang berbeda antara lain 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 alat penukar kalor (*double pipe*), parafin, *water flow meter*, dan *data logger*.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Menghidupkan *data logger* dan memasang *thermocouple*, dengan susunan CH1, dan CH 2 adalah temperatur fluida masuk dan keluar menuju alat penukar kalor. CH 3, CH 4, dan CH 5 adalah temperatur parafin di dalam penukar kalor. CH 6 (*Bottom*) dan CH 7 (*Upper*) adalah temperatur pada salah satu sirip melintang.
4. Memasukan parafin cair yang telah dipanaskan menggunakan kompor kedalam pipa PVC atau alat penukar kalor (*double pipe*).
5. Menghidupkan air dari keran air menuju tempat penampung air untuk dialirkan menuju alat penukar kalor.
6. Menghidupkan pompa air, untuk menyedot air dari tempat penampungan menuju alat penukar kalor.
7. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat kecepatan aliran fluida.
8. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air.
9. Membekukan parafin di dalam alat penukar kalor dengan mengalirkan air dingin yang terdapat di tempat penampung air.
10. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 30 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, kita harus menentukan kecepatan aliran air dengan jumlah dan jarak sirip yang akan digunakan untuk penelitian. Setelah mengatur kecepatan aliran air dan jarak

sirip yang akan di uji, kemudian masukan parafin cair yang telah dipanaskan dengan kompor kedalam alat penukar kalor untuk di uji. Menunggu suhu parafin didalam alat penukar kalor mencapai suhu 80 °C, kemudian kita alirkan air dingin kedalam alat penukar kalor atau pipa tembaga bagian dalam secara terus menerus hingga suhu parafin membeku mencapai suhu ruangan. Untuk mengetahui suhu pada parafin dan juga air digunakan *thermocouple* dan *data logger*, serta untuk mengetahui kecepatan aliran air digunakan *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. Dari ketiga variasi percobaan variasi jarak antar sirip (3 cm, 4 cm, dan 5 cm) didapatkan bahwa dengan variasi jarak antar sirip (3cm, 4cm, dan 5 cm) tidak terlalu mempengaruhi waktu pembekuan parafin untuk mencapai suhu 32°C. Sedangkan, untuk variasi debit aliran didapatkan debit aliran 4 l/min dengan jarak antar sirip 3 cm membutuhkan waktu sebesar 1 jam 30 menit 30 detik lebih cepat dibandingkan debit aliran 12 l/min dengan jarak antar sirip 3 cm sebesar 1 jam 47 menit 30 detik.
2. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa jumlah sirip yang digunakan tidak terlalu mempengaruhi nilai laju perpindahan panas namun dari hasil pengujian dengan variasi debit aliran didapatkan bahwa ketika debit aliran 12 l/min laju perpindahan panas lebih besar dibandingkan debit aliran 8 l/min dan 4 l/min. Nilai laju perpindahan panas terbesar ada pada variasi pengujian debit aliran 12 l/min dengan jarak antar sirip 3 cm yaitu sebesar 70,38 Watt sedangkan nilai terkecil ada pada variasi debit aliran 4 l/min dengan jarak antar sirip 5 cm yaitu sebesar 29,79 Watt.

5.2 Saran

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

1. Diperlukan suatu *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) atau teknik analisis termal untuk parafin yang digunakan, agar dapat data aktual sifat termal berupa, panas laten dan range temperatur perubahan fasa.
2. Untuk pengukuran temperatur pada parafin dan juga pada air sebaiknya dilakukan dengan titik pengukuran yang banyak seperti pada bagian tengah.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, Muhamad. dan Nandi, Putra. 2016. Karakterisasi *Phase Change Material* (PCM) Lokal Indonesia. Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Depok.
- Anita, Nene A., Ramachandran. 2021. *Design Analysis of Heat Exchanger for The Solar Water Heating System Using Phase Change Materials*. Department of Mechanical Engineering, M.I.T. WPU, Pune. India
- Atikayanti, Muthia Sari, Sagita Firza Nur, Budi Santoso, and Arifia Ekayuliana. 2019. Analisis Perbandingan *Heat Exchanger Tipe Plateframe Dan Shell*. 335–45.
- Buchori, Luqman. 2004. Buku Ajar Perpindahan Panas Bagian I. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Semarang.
- Cengel & A, Y., 2003. *Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition*. Mc. Graw- Hill Book. Singapura.
- 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
- 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 Temperatures*. The University of British Columbia. Columbia.
- Kusumah, Tisna., Tatang Wahyudi., Mohamad Widodo. 2020. *Phase Change Material Dari Campuran Parafin Untuk Tekstil Swa-Termoregulasi*. Politeknik STTT. Bandung.

- Made Ricki Murti. (2008). Laju Pembuangan Panas Pada Radiator Dengan Fluida Campuran 80% Air Dan 20% RC Pada RPM Konstan. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakram. Universitas Udayana, Denpasar.
- Meng, Q. and Jinlian Hu. 2008. *A Poly (Ethylene Glycol)-Based Smart Phase Change Material. Solar Energi 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 energi storage with phase change material and applications. Renewable and sustainable energi reviews*, 13, 318-345.
- Sharma, S.D., and Sagara, K. 2005. *Laten heat storage material and system: a review. International journal green energi*. 2: 1-56,2005.
- Syaichurrozi, Iqbal, Afdwiyarny Metta, and Ahmad Imanuddin. 2014. “Kajian Performa Alat Penukar Panas Plate and Frame : Pengaruh Laju Alir Massa , Temperatur Umpan Dan Arah Aliran Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh” XI(02).
- Walujodjati, A. 2006. Perpindahan Panas Konveksi Paksa. Jurnal Ilmiah Momentum 2(2):21-24.
- Yang, Guijun, Yoon-ji Yim, Ji Won Lee, Young-jung Heo, and Soo-jin Park. 2019. *Carbon-Filled Organic Phase-Change Materials for Thermal Energi Storage : A Review*.
- 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 energi storage with phase change materials (pcms) in building applications. Applied Energi* 92 (2012) 593–605