

**PENGARUH PENGGUNAAN SIRIP LONGITUDINAL DAN AKSIAL  
PADA ALAT PENUKAR KALOR PIPA GANDA TERHADAP PROSES  
PELELEHAN DAN PEMBEKUAN PARAFIN SEBAGAI PENYIMPAN  
ENERGI THERMAL**

**(Tesis)**

**Oleh**

**ERIK TRI MAHYUDI  
NPM 2125021010**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### PENGARUH PENGGUNAAN SIRIP LONGITUDINAL DAN AKSIAL PADA ALAT PENUKAR KALOR PIPA GANDA TERHADAP PROSES PELELEHAN DAN PEMBEKUAN PARAFIN SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI TERMAL

Erik Tri Mahyudi<sup>1</sup>, Muhammad Irsyad<sup>2</sup>, Harmen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung

Optimalisasi potensi energi matahari untuk *solar water heater* dilakukan dengan penambahan *phase change material* sebagai *thermal energy storage*. Dalam penggunaan PCM ini perlu memperhatikan perpindahan panas pada sistem, baik pada saat *charging* maupun *discharging*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh geometri sirip terhadap penyimpanan energi termal pada PCM dari paraffin yang diisikan pada bagian annulus alat penukar kalor *double pipe horizontal* yang dilengkapi sirip longitudinal dan aksial pada pipa dalam, dengan variasi jumlah dan tinggi sirip. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan jumlah sirip longitudinal sebesar 21% dan 42% dari total luas mengurangi waktu leleh sebesar 21,5% dan 19,4% serta 4,9% dan 6,8% pada proses pembekuan. Penambahan tinggi sirip sebesar 18,6% dan 37,27% dari total luas mengurangi waktu leleh sebesar 8,5% dan 11,46% serta 1,7% dan 4,5% pada proses pembekuan. Peningkatan laju perpindahan panas tertinggi diperoleh pada penambahan jumlah sirip dengan variasi B32 yakni 34,27 % untuk proses *charging* dan 9,4% untuk proses *discharging*. Sedangkan pada variasi sirip aksial menunjukkan hasil bahwa penambahan jumlah sirip aksial sebesar 4,6% dan 13,7% dari total luas mengurangi waktu leleh sebesar 6,9 % dan 16,1 %, serta 1,3 % dan 1,8 % pada proses pembekuan. Penambahan tinggi sirip aksial sebesar 11,13% dari total luas sirip aksial mengurangi waktu leleh sebesar 2,7 % sedangkan penambahan sebesar 24,29% justru akan menambah waktu pelelehan sebesar 2,7 % sedangkan dalam proses pembekuan dapat mengurangi sebesar 0,9 % dan 3 %. Peningkatan laju perpindahan panas tertinggi diperoleh pada penambahan jumlah sirip dengan variasi C32 yakni 17,28 % untuk proses *charging* dan 7,27% untuk proses *discharging*.

Kata kunci; geometri sirip; panas laten; paraffin, solar water heater

## ABSTRACT

### THE EFFECT OF USING LONGITUDINAL AND AXIAL FINS IN DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER ON THE PARAFFIN MELTING AND FREEZING PROCESSES AS THERMAL ENERGY STORAGE

Erik Tri Mahyudi<sup>1</sup>, Muhammad Irsyad<sup>2</sup>, Harmen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Master student in Mechanical Engineering Department, Lampung University

<sup>2</sup>Lecture in Mechanical Engineering Department, Lampung University

The optimization of solar energy potential for water heater systems is achieved by incorporating phase change material (PCM) as thermal energy storage. Heat transfer in the system needs to be considered during both the charging and discharging processes. Therefore, this research aims to analyze the effect of fins geometry on thermal energy storage in PCM made of the paraffin, which is filled in the annulus of double-pipe horizontal heat exchanger. The inner pipe of the exchanger has longitudinal fins with variations in the number and height of fins. The results showed that the addition of the number of longitudinal fins by 21% and 42% of the total area reduced the melting time by 21.5% and 19.4% and 4.9% and 6.8% in the freezing process. The addition of fin height of 18.6% and 37.27% of the total area reduced the melting time by 8.5% and 11.46% and 1.7% and 4.5% in the freezing process. The highest increase in heat transfer rate was obtained by increasing the number of fins with the B32 variation, namely 34.27% for the charging process and 9.4% for the discharging process. While the axial fin variation shows the result that the addition of the number of axial fins by 4.6% and 13.7% of the total area reduces the melting time by 6.9% and 16.1%, and 1.3% and 1.8% in freezing process. The addition of the axial fin height of 11.13% of the total axial fin area reduces the melting time by 2.7% while the addition of 24.29% will actually increase the melting time by 2.7% while in the freezing process it can reduce it by 0.9% and 3%. The highest increase in heat transfer rate was obtained by increasing the number of fins with the C32 variation, namely 17.28% for the charging process and 7.27% for the discharging process.

Keywords: Fins Geometry, Latent Heat, Paraffin, Solar Water Heater.

**PENGARUH PENGGUNAAN SIRIP LONGITUDINAL DAN AKSIAL  
PADA ALAT PENUKAR KALOR PIPA GANDA TERHADAP PROSES  
PELELEHAN DAN PEMBEKUAN PARAFIN SEBAGAI PENYIMPAN  
ENERGI THERMAL**

Oleh

**ERIK TRI MAHYUDI**

(Tesis)

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Tesis : PENGARUH PENGGUNAAN SIRIP  
LONGITUDINAL DAN AKSIAL PADA  
ALAT PENUKAR KALOR PIPA GANDA  
TERHADAP PROSES PELELEHAN DAN  
PEMBEKUAN PARAFIN SEBAGAI  
PENYIMPAN ENERGI THERMAL

Nama Mahasiswa : Erik Tri Mahyudi

Nomor Pokok Mahasiswa : 2125021010

Program Studi : Teknik Mesin

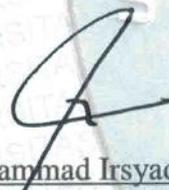
Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**

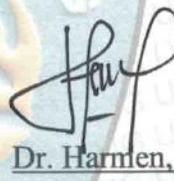
Komisi Pembimbing

Anggota

Ketua



Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.  
NIP. 19711214 200012 1 001



Dr. Harmen, S.T., M.T.  
NIP. 196906202000031001

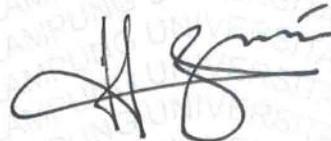
**MENGETAHUI**

Ketua Jurusan  
Teknik Mesin



Dr. Amrul, S.T., M.T.  
NIP. 19710331 199903 1 003

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



Gusri A. Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19710817 199802 1 003

**MENGESAHKAN**

**I. Tim Penguji**

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

**Anggota Penguji : Dr. Harmen, S.T., M.T.**

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

**Penguji Utama II : Dr. Amrul, S.T., M.T.**

**2. Dekan Fakultas Teknik**

**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., J**  
NIP 19750928 200112 1 002

**3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung**

**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**  
NIP 19640326 198902 1 001

**Tanggal Lulus Ujian Tesis: 21 Juli 2023**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Bandar Lampung, 15 Juli 2023

Yang Membuat



Erik Tri Mahyudi  
NPM 2125021010

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bantul, Yogyakarta pada 21 Mei 1989, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dengan orang tua Bapak Sumardi dan Ibu Budiwati. Penulis dibesarkan di daerah Pati, karena sejak umur tiga bulan orang tua bertugas di kabupaten Pati, Jawa Tengah. Jenjang pendidikan pertama yang dijalani penulis adalah Pendidikan Sekolah Dasar Negeri Pati Kidul 01 pada tahun 1995 hingga tamat tahun 2001. Selanjutnya penulis duduk di Sekolah Menengah Pertama Negeri 3 Pati, akhirnya pada tahun 2004 penulis lulus dari salah satu SMP negeri di kabupaten Pati. Kemudian pada tahun 2004 penulis melanjutkan pendidikan di SMA N 1 Pati yang merupakan salah satu SMA favorit di Kabupaten Pati, akhirnya pada tahun 2007 penulis lulus dari jenjang pendidikan SMA.

Pada tahun 2007, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin di Politeknik Negeri Semarang (POLINES) dan lulus pada tahun 2010. Setelah lulus dari Polines, penulis bekerja selama dua tahun di PT. Bukit Makmur Mandiri Utama (BUMA) salah satu perusahaan pertambangan batu bara di Kalimantan sebagai *Plant Foreman* hingga tahun 2012. Penulis memutuskan pindah bekerja di PT. Sugar Group Companies sebagai instruktur di sekolah vokasi Sugar Group. Pada tahun 2015 penulis mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan pendidikan S1 program ekstensi di Universitas Muhammadiyah Metro dengan biaya dari perusahaan. Setelah lulus pada tahun 2017, penulis kembali bekerja dan berkarya di sekolah vokasi Sugar Group.

Tahun 2021 perusahaan kembali memberikan kesempatan kepada penulis untuk melanjutkan pendidikan Pascasarjana (S2) di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (UNILA). Selama belajar di UNILA, penulis melakukan penelitian Tesis dengan judul tugas akhir “Pengaruh Penggunaan Sirip Longitudinal Dan Aksial Pada *Double Pipe* Terhadap Proses Pelelehan Dan Pembekuan Parafin Sebagai Penyimpan Energi Thermal” dibawah bimbingan Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. dan Dr. Harmen, S.T., M.T.

Bandar Lampung, 15 Juli 2023

Penulis,

Erik Tri Mahyudi

## **Ucapan Terima kasih**

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji syukur ke hadirat Allah SWT karena berkat limpahan rahmat, hidayah, dan Inayah-Nya maka TESIS ini dapat diselesaikan dengan baik. Salam dan solawat semoga selalu tercurah pada baginda Rasulullah Muhammad SAW.

Tesis yang berjudul “Pengaruh Penggunaan Sirip Longitudinal Dan Aksial Pada Alat Penukar Kalor Pipa Ganda Terhadap Proses Pelelehan Dan Pembekuan Parafin Sebagai Penyimpan Energi Thermal” ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan kurikulum sarjana strata-2 (S-2) pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Limpahan rasa hormat, cinta, kasih sayang dan terima kasih kepada bapak Sumardi dan ibu Budiyati yang mendidik dan membesarkan dengan penuh cinta kasih sayang yang begitu tulus kepada Penulis yang selalu memberikan doa di setiap detik kehidupannya untuk keberhasilan Penulis. Limpahan kasih sayang dan cinta untuk Istri penulis Faridatun Niswati yang telah mendampingi, memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan studi Magister. Kepada anak-anak penulis Muhammad Fattan Ghiyatsa dan Devana Haura Mecca yang telah hadir di kehidupan dan menjadi semangat selama melaksanakan studi. Serta saudara Wahyu Mardiyanto serta keluarga besar yang selama ini telah banyak memberikan doa, perhatian, kasih sayang, semangat dan dukungannya kepada Penulis, semoga Allah SWT senantiasa mengumpulkan kita semua dalam kebaikan dan ketaatan kepada-Nya.

Penyelesaian Tesis ini tentu tidaklah lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Gusri A. Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia menyempatkan waktunya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
5. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua, yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
6. Dr. Amrizal, S.T., M.T., selaku dosen penguji I yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
7. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku dosen penguji II yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
8. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Magister Teknik Mesin yang banyak memberikan ilmu selama penulis melaksanakan studi, baik berupa materi perkuliahan maupun teladan dan motivasi.
9. Teman-teman Pasca Sarjana Teknik Mesin (angkatan 2021), semoga kebersamaan dan persaudaraan kita tidak berakhir hanya di kampus ini.

10. Adik-adik Mahasiswa Strata 1 yang telah membantu penyelesaian Tesis ini.
11. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini belum sempurna masih banyak kekurangan, baik dari segi isi maupun cara penyampaiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

*Wassalamu 'alaikum Wr. Wb.*

Bandar Lampung, Juli 2023

Penulis,

Erik Tri Mahyudi

## **KATA PENGANTAR**

Dengan memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayah Nya penulis dapat menyajikan tulisan Tesis yang berjudul: “Pengaruh Penggunaan Sirip Longitudinal Dan Aksial Pada Alat Penukar Kalor Pipa Ganda Terhadap Proses Pelelehan Dan Pembekuan Parafin Sebagai Penyimpan Energi Thermal”.

Sangat disadari bahwa dengan kekurangan dan keterbatasan yang dimiliki penulis, walaupun telah dikerahkan segala kemampuan untuk lebih teliti, tetapi masih dirasakan banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan saran yang membangun agar tulisan ini bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Bandar Lampung, 15 Juli 2023

Penulis,

Erik Tri Mahyudi

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xix
<b>DAFTAR ISTILAH</b> .....	xxii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6
1.3 Tujuan Penelitian .....	7
1.4 Manfaat Penelitian .....	7
1.5 Batasan Masalah .....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	9
2.1 Dasar Dasar Perpindahan Panas .....	9
2.1.1. Perpindahan Panas Konduksi .....	9
2.1.2. Perpindahan Panas Konveksi .....	10
2.1.3. Perpindahan Panas Radiasi .....	12
2.1.4. Konduktivitas Thermal .....	13
2.2 Alat Penukar Panas ( <i>Heat Exchangers</i> ) .....	13
2.2.1. Jenis-jenis Alat Penukar Panas .....	14
2.2.2. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh .....	17
2.2.3. Efisiensi Sirip .....	20
2.2.4. Aliran Laminar dan Turbulen .....	22
2.2.5. <i>Reynold Number</i> .....	23
2.3 Penyimpanan Energi Panas .....	24
2.3.1. Penyimpanan Panas Sensibel .....	26
2.3.2. Penyimpanan Panas Laten .....	27
2.4 <i>Phase Change Material</i> (PCM) .....	29
2.4.1. PCM Organik .....	30

2.4.2. Parafin .....	31
2.4.3. Non-Parafin .....	33
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>34</b>
3.1. Tempat Penelitian .....	34
3.2. Waktu Penelitian .....	34
3.3. Alat dan Bahan .....	36
3.4. Diagram alir .....	46
3.5. Skema Pengujian .....	48
3.6. Penempatan titik Pengukuran .....	49
3.7. Metode Pengambilan Data .....	51
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>54</b>
4.1 Aliran Air .....	54
4.2 Pengaruh Penggunaan Sirip Pada Proses Pelelehan Parafin .....	55
4.2.1. Pengaruh Penggunaan Sirip Longitudinal Pada Proses Pelelehan Parafin .....	55
4.2.2 Pengaruh Penggunaan Sirip Aksial Pada Proses Pelelehan Parafin .....	61
4.3 Pengaruh Penggunaan Sirip Pada Proses Pembekuan Parafin .....	65
4.3.1 Pengaruh Penggunaan Sirip Longitudinal Pada Proses Pembekuan Parafin .....	65
4.3.2 Pengaruh Penggunaan Sirip Aksial Pada Proses Pembekuan Parafin .....	69
4.4 Pengaruh Penggunaan Sirip Terhadap Laju Perpindahan Panas dan Kinerja Saat Proses Pelelehan Paraffin .....	74
4.4.1 Laju Perpindahan Panas Proses Pelelehan Parafin .....	74
4.4.2 Perhitungan Kinerja Proses Pelelehan Parafin .....	78
4.5 Pengaruh Penggunaan Sirip Terhadap Laju Perpindahan Panas dan Kinerja Saat Proses Pembekuan Parafin .....	88
4.5.1 Laju Perpindahan Panas Proses Pembekuan Parafin .....	88
4.5.2 Perhitungan Kinerja Proses Pembekuan Parafin .....	91
4.6 Luas Sirip Optimal .....	98

<b>BAB V PENUTUP</b> .....	101
5.1 Kesimpulan .....	101
5.2 Saran .....	103
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	104
<b>LAMPIRAN</b> .....	107

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Konduktivitas termal berbagai bahan pada 25 °C .....	13
Tabel 2.2 Sifat termo-fisik RT58 menurut pabrikan .....	32
Tabel 3.1 Rencana Pelaksanaan Penelitian .....	35
Tabel 3.2 Spesifikasi variasi sirip longitudinal dan tanpa sirip .....	43
Tabel 3.3 Spesifikasi variasi sirip aksial .....	45
Tabel 4.1 Bilangan Reynold pada proses pelelehan.....	54
Tabel 4.2 Bilangan Reynold pada proses pembekuan .....	55
Tabel 4.3 Data laju perpindahan panas sirip longitudinal pada proses pelelehan ..	75
Tabel 4.4 Data laju perpindahan panas sirip aksial pada proses pelelehan .....	76
Tabel 4.5 Energi yang dilepaskan air selama proses pelelehan sirip longitudinal.	78
Tabel 4.6 Sifat-sifat <i>Scale Paraffin Wax</i> .....	80
Tabel 4.7 Energi tersimpan di dalam pipa tembaga variasi sirip longitudinal.....	81
Tabel 4.8 Total energi yang diterima oleh parafin saat proses pelelehan variasi sirip longitudinal.....	82
Tabel 4.9 Energi yang dilepaskan air selama proses pelelehan variasi sirip aksial .....	84
Tabel 4.10 Energi tersimpan di dalam pipa tembaga variasi sirip aksial .....	86
Tabel 4.11 Total energi yang diterima oleh parafin saat proses pelelehan variasi sirip aksial.....	86
Tabel 4.12 Data laju perpindahan panas sirip longitudinal pada proses	

pembekuan parafin .....	88
Tabel 4.13 Data laju perpindahan panas sirip aksial pada proses pembekuan.....	90
Tabel 4.14 Total energi yang dilepaskan oleh parafin saat proses pembekuan variasi sirip longitudinal.....	93
Tabel 4.15 Energi yang diterima air selama proses pembekuan variasi sirip longitudinal .....	94
Tabel 4.16 Total energi yang dilepaskan parafin saat proses pembekuan variasi sirip aksial.....	96
Tabel 4.17 Energi yang diterima air selama proses pembekuan variasi sirip aksial .....	97

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sketsa arah aliran panas pada tembaga .....	10
Gambar 2.2 Perpindahan kalor secara konveksi .....	11
Gambar 2.3 Hubungan antara perbedaan arah aliran fluida dengan suhu dalam <i>double pipe</i> .....	15
Gambar 2.4 Alat penukar panas gas ke cair jenis <i>compact</i> pada sistem pendingin udara .....	16
Gambar 2.5 Skema penukar panas <i>shell and tube</i> .....	16
Gambar 2.6 Skema penukar panas <i>plate and frame</i> .....	17
Gambar 2.7 Resistansi termal pada penukar panas pipa ganda .....	18
Gambar 2.8 Dua luas permukaan pada penukar panas pipa ganda .....	19
Gambar 2.9 Efektivitas sirip .....	21
Gambar 2.10 Berbagai luas permukaan yang terkait dengan permukaan persegi panjang dengan tiga sirip .....	22
Gambar 2.11 Perilaku cairan berwarna yang disuntikkan ke dalam aliran dalam laminar dan aliran turbulen dalam pipa .....	23
Gambar 2.12 Grafik distribusi penyinaran dalam penyimpanan energi termal ..	25
Gambar 2.13 Metode penyimpanan energi panas .....	26
Gambar 2.14 Peningkatan suhu selama penyimpanan panas sensibel.....	26
Gambar 2.15 Penyimpanan panas laten pada perubahan fase padat-cair.....	28
Gambar 2.16 Klasifikasi PCM .....	30
Gambar 2.17 Parafin .....	31
Gambar 3.1 Pemanas air listrik .....	36
Gambar 3.2 <i>Thermocouple</i> dan <i>data logger</i> .....	37
Gambar 3.3 Kontroler temperatur dan SSR .....	38
Gambar 3.4 Pompa air.....	38

Gambar 3.5 <i>Water flow meter</i> .....	39
Gambar 3.6 Selang PEX .....	39
Gambar 3.7 Katup air .....	40
Gambar 3.8 Pipa dan plat tembaga .....	40
Gambar 3.9 Pipa Akrilik .....	41
Gambar 3.10 Alat penukar panas tanpa sirip dan variasi sirip longitudinal .....	43
Gambar 3.11 Alat Penukar Panas dengan variasi sirip aksial .....	44
Gambar 3.12 Diagram alir penelitian.....	46
Gambar 3.13 Skema Proses Pelelehan PCM .....	48
Gambar 3.14 Skema Proses Pembekuan PCM .....	49
Gambar 3.15 Penempatan Titik Pengukuran Pada Sirip Longitudinal .....	49
Gambar 3.16 Penempatan Titik Pengukuran Pada Sirip Aksial .....	50
Gambar 3.17 Posisi termokopel pada alat penukar panas .....	51
Gambar 4.1 Distribusi temperatur sirip longitudinal pada proses pelelehan .....	56
Gambar 4.2 Proses pelelehan parafin pada sistem LHTES sirip longitudinal...	57
Gambar 4.3 Grafik perbandingan jumlah sirip longitudinal terhadap waktu pada proses pelelehan parafin .....	59
Gambar 4.4 Grafik perbandingan tinggi sirip longitudinal terhadap waktu pada proses pelelehan parafin .....	60
Gambar 4.5 Distribusi temperatur sirip aksial pada proses pelelehan .....	62
Gambar 4.6 Grafik perbandingan jumlah sirip aksial terhadap waktu pada proses pelelehan parafin .....	63
Gambar 4.7 Grafik perbandingan tinggi sirip aksial terhadap waktu pada proses pelelehan parafin .....	64
Gambar 4.8 Distribusi temperatur sirip longitudinal pada proses pembekuan parafin .....	66
Gambar 4.9 Grafik perbandingan jumlah sirip longitudinal terhadap waktu pada proses pembekuan parafin .....	67
Gambar 4.10 Grafik perbandingan tinggi sirip longitudinal terhadap waktu pada proses pembekuan parafin .....	68
Gambar 4.11 Distribusi temperatur sirip aksial pada proses pembekuan	

parafin .....	70
Gambar 4.12 Proses pembekuan parafin pada sistem LHTES sirip aksial .....	71
Gambar 4.13 Grafik perbandingan jumlah sirip aksial terhadap waktu pada proses pembekuan parafin .....	72
Gambar 4.14 Grafik perbandingan tinggi sirip aksial terhadap waktu pada proses pembekuan parafin .....	73
Gambar 4.15 Grafik perbandingan laju perpindahan panas air ke parafin pada variasi sirip longitudinal .....	75
Gambar 4.16 Grafik perbandingan laju perpindahan panas air ke parafin pada variasi sirip aksial .....	77
Gambar 4.17 Grafik perbandingan energi yang dilepas oleh air panas ke parafin pada variasi sirip longitudinal .....	79
Gambar 4.18 Grafik perbandingan energi total yang diterima oleh parafin saat proses pelelehan pada variasi sirip longitudinal .....	82
Gambar 4.19 Grafik perbandingan energi yang dilepas oleh air panas ke paraffin pada variasi sirip aksial .....	84
Gambar 4.20 Grafik perbandingan energi total yang diterima oleh parafin pada variasi sirip aksial .....	87
Gambar 4.21 Grafik perbandingan laju perpindahan panas dari parafin ke air pada proses pembekuan variasi sirip longitudinal .....	89
Gambar 4.22 Grafik perbandingan laju perpindahan panas dari parafin ke air pada variasi sirip aksial .....	90
Gambar 4.23 Grafik perbandingan energi total yang dilepaskan oleh paraffin pada variasi sirip longitudinal .....	93
Gambar 4.24 Grafik perbandingan energi yang diterima oleh air pada variasi sirip longitudinal .....	94
Gambar 4.25 Grafik perbandingan energi total yang dilepaskan oleh parafin pada variasi sirip aksial .....	96
Gambar 4.26 Grafik perbandingan energi yang diterima oleh air pada variasi sirip aksial .....	97
Gambar 4.27 Grafik perbandingan peningkatan ratio semua variasi sirip .....	99

## DAFTAR ISTILAH

### ***Annulus***

Pipa yang terdiri dari dua silinder tetap yang sepusat dengan panjang.

### ***DPHE (Double Pipe Heat Exchanger)***

Salah satu jenis alat penukar panas yang banyak dipakai untuk aplikasi berkapasitas kecil yang biasanya terdiri dari dua pipa *concentric* dengan pipa bagian dalam polos atau bersirip.

### ***HE (Heat Exchanger)***

Peralatan yang digunakan untuk melakukan proses pertukaran kalor antara dua fluida, baik cair (panas atau dingin) maupun gas, dimana fluida ini mempunyai temperatur yang berbeda.

### ***HTF (Heat Transfer Fluid)***

Gas atau cairan yang berperan dalam perpindahan panas dengan berperan sebagai perantara dalam pendinginan di satu sisi proses, mengangkut dan menyimpan energi panas.

### ***LHS (Latent Heat Storage)***

Menyimpan panas dalam bahan pengubah fasa yang memanfaatkan panas laten perubahan fasa yang besar selama pencairan zat padat menjadi cair.

### ***PCM (Phase Change Material)***

Zat yang melepaskan/menyerap energi yang cukup pada transisi fasa untuk menyediakan panas atau pendinginan yang berguna.

### **SHS (*Sensible Heat Storage*)**

Energi yang tersimpan didalam sistem ditandai dengan adanya perubahan temperatur pada material penyimpan energi.

### **SLF (*Split the Longitudinal Fins*)**

Tabung dengan sirip memanjang konvensional yang dipotong dan diimbangi pada interval tertentu untuk meningkatkan kinerja termo-fluida DPHE

### **Solidifikasi**

Proses perubahan fasa zat cair menjadi padat

### **SSR (*Solid State Relay*)**

Perangkat pengalih elektronik yang hidup atau mati ketika tegangan eksternal diterapkan di terminal kontrolnya. Mereka melayani fungsi yang sama dengan relai elektromekanis, tetapi elektronik solid-state tidak mengandung bagian yang bergerak dan memiliki masa operasional yang lebih lama.

### ***Thermocouple***

Sensor suhu yang banyak digunakan untuk mengubah perbedaan suhu dalam benda menjadi perubahan tegangan listrik.

### **TES (*thermal energy storage*)**

Penyimpan energi termal dengan metode penyimpanan yang memungkinkan energi panas berlebih untuk disimpan dan digunakan berjam-jam, sehari-hari atau berbulan-bulan kemudian, pada skala mulai dari proses individu, bangunan, kabupaten, kota, atau wilayah yang lebih luas.

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Energi terbarukan, khususnya energi matahari, sangat penting dalam mengurangi ketergantungan pada sumber energi tradisional (Zaphar et al., 2023). Energi matahari adalah salah satu jenis energi bersih yang paling populer dan tersebar luas karena dianggap sebagai salah satu sumber yang paling aman. Bumi setiap tahun menerima energi matahari yang melebihi jumlah total energi yang dikonsumsi manusia setiap tahun. Pemanfaatan energi matahari dalam jumlah besar ini akan membantu melindungi lingkungan dan memperkuat ekonomi global serta mengurangi emisi berbahaya. Untuk memanfaatkan radiasi matahari yang masuk, ia diubah menjadi jenis energi lain untuk memfasilitasi penyimpanan, transportasi, dan penggunaan untuk berbagai kebutuhan (Shallal et al., 2023). Penyimpanan energi termal merupakan teknologi efektif yang memungkinkan untuk mengurangi ketidaksesuaian antara pasokan dan permintaan energi dalam setiap aspek ruang dan waktu (Koželj et al., 2021). Ada tiga jenis sistem penyimpanan termal berdasarkan cara energi panas tersebut disimpan; laten, sensibel dan termokimia. Penggunaan bahan pengubah fase dalam sistem penyimpanan panas laten (LHTES) berbasis PCM menjadi solusi praktis dan efisien, hal ini dikarenakan kepadatan penyimpanan energi yang tinggi selama perubahan fase dengan rentang temperatur yang relatif sempit (Gil et al., 2010). Perbandingan menunjukkan bahwa penyimpanan panas laten (LHS) 5 sampai 10

kali lebih tinggi dengan setengah kali volume yang dibutuhkan penyimpanan panas sensibel (SHS) (Seddegh et al., 2015).

Perubahan fase dapat terjadi dalam bermacam bentuk dengan melibatkan wujud benda padat-padat, padat-cair, padat-gas, dan cair-gas. Dari berbagai wujud perubahan fase tersebut, perubahan fase padat-cair memiliki kapasitas penyimpanan panas laten yang lebih tinggi dengan perubahan volume dan temperatur kecil selama transisi dibandingkan dengan perubahan fase bentuk padat-padat. Saat PCM terkena panas, mereka akan mengalami peleburan, begitu juga sebaliknya, ketika PCM mengalami proses pelepasan panas maka akan berubah fase dari cair menjadi padat (solidifikasi). Penyimpanan energi termal PCM sistem panas matahari dapat digunakan oleh usaha kecil dan rumah untuk produksi air panas dan untuk sistem pemanas. Sistem ini memiliki kolektor surya pelat datar, biasanya dipasang di atap, yang dilengkapi dengan fluida perpindahan panas yang melewati tabung penerima. Tabung penerima diisolasi di dalam selungkup dengan kaca pelat penutup. Selungkup dapat dievakuasi untuk mencegah kehilangan konveksi. Sistem panas matahari dapat dirancang untuk menyimpan panas ekstra menggunakan PCM di tangki penyimpanan selama berjam-jam, sangat mengurangi ketergantungan pada tambahan gas alam atau pemanas listrik (Fleischer, 2015).

Banyak hasil penelitian yang mengarah pada penggunaan PCM dalam penukar panas pipa ganda selama proses peleburan dan pembekuan dalam sistem penyimpanan energi termal. Akumulasi ini disebabkan karena luasnya penggunaan sistem ini pada aplikasi teknik disebabkan kontribusinya terhadap efisiensi panasnya. Penggunaan sistem penyimpanan panas laten menggunakan

bahan perubahan fase (PCMs) adalah cara yang efektif untuk menyimpan energi panas dan memiliki keuntungan dari kepadatan penyimpanan energi tinggi dan sifat isothermal dari proses penyimpanan. PCM telah banyak digunakan dalam sistem penyimpanan panas laten untuk pompa panas, rekayasa surya, dan aplikasi kontrol termal pesawat ruang angkasa. Penggunaan PCM untuk aplikasi pemanasan dan pendinginan untuk bangunan telah diselidiki dalam dekade terakhir. Ada sejumlah besar PCM yang meleleh dan mengeras pada berbagai suhu, membuatnya menarik di sejumlah aplikasi (Sharma et al., 2009).

Vyshak dan Jilani (2007) menganalisis secara rinci menggunakan metode numerik untuk membandingkan waktu leleh total bahan berubah fasa (PCM) berupa klorida heksahidrat pada penyimpanan panas laten yang memiliki volume dan luas perpindahan panas yang sama. Mereka menggunakan tiga wadah dengan konfigurasi geometris yang berbeda yaitu persegi panjang, silinder dan cangkang silinder. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wadah cangkang silinder membutuhkan waktu paling sedikit untuk meleleh sempurna dan menjadi lebih signifikan dengan meningkatnya massa PCM dengan jumlah penyimpanan energi yang sama.

Kibria dkk (2014) melakukan studi eksperimental dan numerik untuk menganalisis efek aliran dan dimensi sistem penyimpanan energi termal dengan melibatkan susunan *shell and tube*. Air sebagai fluida perpindahan panas dan *parafin wax* sebagai PCM. Hasilnya menunjukkan bahwa temperatur masuk HTF lebih berpengaruh dibandingkan laju aliran massa dalam hal waktu penyimpanan dan temperatur keluar HTF, sedangkan jari-jari tabung menjadi parameter yang

lebih penting dibanding ketebalan untuk perpindahan panas yang lebih baik antara PCM dan HTF.

Seddegh dkk (2016) telah melakukan penelitian dengan membandingkan menggunakan model perpindahan panas gabungan antara konduksi dan konveksi dalam sistem penyimpanan panas *shell and tube* aksial dan horisontal menggunakan bahan perubahan fasa. Hasilnya menunjukkan bahwa tipe horisontal memiliki kinerja thermal yang unggul dalam pengisian dan peningkatan temperatur masuk fluida perpindahan panas secara substansial mengurangi total waktu pengisian.

Modi dkk (2021) juga melakukan penelitian serupa dengan menganalisis pengaruh geometri sirip terhadap kinerja termal sistem penyimpanan energi panas laten (LHTES) tabung longitudinal bersirip horisontal. Sirip longitudinal dengan tinggi, ketebalan, dan jumlah sirip yang berbeda diterapkan dalam sistem LHTES shell-and-tube horisontal dan parafin dikemas dalam annulus. Bagian depan leleh, temperatur rata-rata, dan profil kecepatan dari Phase Change Material (PCM) diilustrasikan secara grafis dan dibandingkan untuk proses pengisian. Ditemukan bahwa penggabungan sirip longitudinal dalam jumlah kecil (2,85% dari total volume) dapat mengurangi waktu leleh total sebesar 34% dibandingkan dengan konfigurasi tabung kosong.

Dari beberapa penelitian tersebut menunjukkan bahwa tipe horisontal memiliki kinerja thermal yang unggul dalam pengisian dan peningkatan temperatur masuk fluida serta efektif dalam proses pelelehan PCM. Namun menurut Eslami dkk (2021), PCM konvensional memiliki kelemahan yaitu konduktivitas termal yang rendah sehingga butuh teknik lain untuk meningkatkan

perpindahan panas yaitu dengan menambah sirip pada tabung. Dalam hasil penelitiannya menunjukkan bahwa sirip memiliki pengaruh yang cukup besar pada perpindahan panas konveksi PCM cair di dalam ruang terbatas. Disimpulkan juga bahwa kinerja sistem lebih dipengaruhi oleh panjang sirip dan jumlah sirip dari pada ketebalan sirip.

Penelitian serupa juga pernah dilakukan oleh El dkk (2020) dengan menyelidiki karakteristik termo-fluida dari penukar panas pipa ganda (DPHE) dengan sirip terbelah memanjang. Penelitian ini dilakukan menggunakan bilangan Prandtl yang tinggi dengan sifat termofisik yang bervariasi. Simulasi dinamika fluida komputasi tiga dimensi dilakukan di bawah kondisi aliran laminar untuk konfigurasi dengan interval pemisahan sirip antara 0,333 dan 0,166 m. Hasilnya menunjukkan bahwa laju perpindahan panas dalam anulus yang dilengkapi dengan SLF lebih tinggi dibandingkan dengan LF konvensional sebesar 31% – 48% untuk daya pemompaan dan berat unit yang sama.

Mishra dkk (2023) menyajikan studi perbandingan jumlah perpindahan panas konveksi alami pada sirip muka padat dan berlubang. Pengaruh jumlah perforasi dan ukurannya terhadap karakteristik konveksi alami juga diselidiki. Eksperimen sedang dilakukan untuk sirip padat dan sirip berlubang yang memiliki jumlah lubang yang berbeda pada permukaannya. Jarak sirip pada permukaan yang dipasang juga merupakan parameter yang mempengaruhi untuk mengontrol perpindahan panas alami. Jarak antar sirip masing-masing 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm. Setelah analisis rinci disimpulkan bahwa sirip berlubang harus digunakan di atas sirip padat untuk meningkatkan laju perpindahan panas dan penurunan temperatur permukaan sirip. Hasil analisis yang disajikan dalam makalah ini

menunjukkan bahwa sirip berlubang dengan 5 baris lubang pola zig-zag dengan diameter lubang 10 mm dan jarak sirip 10 mm dapat memberikan hasil yang optimal.

Rostami dkk (2020), secara numerik mengevaluasi pengaruh susunan sirip pada pipa ganda bersirip aksial pada penyimpanan panas laten berdasarkan lokasi, ketebalan dan diameter sirip di mekanisme pencairan dan pembekuan. PCM ditempatkan di tabung luar sementara air melewati ban dalam. Sirip ditempatkan secara melingkar di sekitar pipa bagian dalam di zona PCM dengan mempertimbangkan jumlah sirip yang konstan. Hasilnya menunjukkan hasil yang signifikan dari penambahan sirip dalam mengurangi waktu leleh yang lebih cepat dibandingkan waktu pada saat pembekuan.

Tinjauan literatur telah menjelaskan banyak studi eksperimental dan numerik untuk membandingkan kinerja sistem penyimpanan panas pada pipa ganda. Namun penelitian secara eksperimental untuk membandingkan dengan konfigurasi sirip longitudinal masih sangat sedikit dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini secara eksperimental akan mengkaji pengaruh variasi jarak dan tinggi sirip terhadap perpindahan panas menyeluruh pada *double pipe heat exchanger* dalam meningkatkan kinerja sistem penyimpanan energi panas laten. Pengaturan temperatur dan laju aliran massa air sebagai *heat transfer fluid* (HTF) juga akan menjadi parameter di dalam penelitian ini.

## 1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimanakah pengaruh penggunaan sirip terhadap waktu pelelehan parafin pada sistem LHTES?
2. Bagaimanakah pengaruh penggunaan sirip terhadap waktu pembekuan parafin pada sitem LHTES?
3. Bagaimanakah pengaruh penggunaan sirip terhadap laju perpindahan panas saat proses pelelehan parafin pada sistem LHTES?
4. Bagaimanakah pengaruh penggunaan sirip terhadap laju perpindahan panas saat proses pembekuan parafin pada sistem LHTES?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini untuk mengetahui tentang :

1. Pengaruh penggunaan sirip terhadap waktu pelelehan parafin pada sistem LHTES.
2. Pengaruh penggunaan sirip terhadap waktu pembekuan parafin pada sitem LHTES.
3. Pengaruh penggunaan sirip terhadap laju perpindahan panas saat proses pelelehan parafin pada sistem LHTES.
4. Pengaruh penggunaan sirip terhadap laju perpindahan panas saat proses pembekuan parafin pada sistem LHTES.

### 1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menyajikan data hasil eksperimen secara konkrit guna mendapatkan konfigurasi geometri sirip yang paling efisien sebagai media penyimpanan panas laten dengan membandingkan beberapa variasi konfigurasi, tinggi sirip, variasi laju aliran fluida dan temperatur masuk yang

diberikan pada HTF. Dari berbagai variasi tersebut diharapkan dapat menghasilkan alat penukar panas yang memiliki unjuk kerja yang baik yaitu alat penukar panas yang memiliki koefisien perpindahan panas menyeluruh yang tinggi. Sehingga bisa menjadi literatur dalam pembuatan sistem penyimpanan panas dalam sistem *double pipe heat exchanger* yang paling efisien.

#### 1.5. Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada jenis material yang akan digunakan dalam eksperimen yang akan dikaji,

1. Jenis PCM yang akan digunakan berupa lilin parafin.
2. Menggunakan variasi konfigurasi sirip pipa dalam bentuk longitudinal dan aksial.
3. Menggunakan variasi tinggi sirip pipa dalam longitudinal dan aksial dengan ukuran tinggi sirip 7 mm, 10 mm dan 13 mm.
4. Temperatur masuk HTF 80 °C.
5. Variasi debit aliran air sebesar 4 l/min, 8 l/min, dan 12 l/min
6. Jenis material pipa luar alat penukar kalor yang digunakan adalah kaca akrilik
7. Jenis material pipa dalam alat penukar kalor yang digunakan adalah pipa tembaga.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Dasar Dasar Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah proses perpindahan energi karena adanya perbedaan temperatur. Perpindahan energi panas selalu terjadi dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah akan berhenti ketika kedua mencapai temperatur yang sama. Perpindahan panas dapat dilakukan melalui tiga metode yaitu konduksi, konveksi atau radiasi (Cengel & Ghajar, 2014).

#### 2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi adalah transfer energi dari partikel yang lebih energik dari suatu zat ke zat yang berdekatan yang kurang energik sebagai akibat dari interaksi antar partikel (Cengel & Ghajar, 2014). Gradien temperatur dalam suatu zat menyebabkan aliran energi dari daerah yang lebih panas ke daerah yang lebih dingin. Gradien ini bisa terjadi dalam padatan, cairan ataupun gas selama tidak ada gerakan dalam fase fluida. Seiring waktu perbedaan temperatur akan berkurang dan mendekati kesetimbangan termal (temperatur yang sama). Persamaan untuk menyatakan perpindahan kalor secara konduksi telah dijelaskan dengan hukum Fourier seperti pada persamaan 2.1.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W}) \quad (2.1)$$

Dimana :

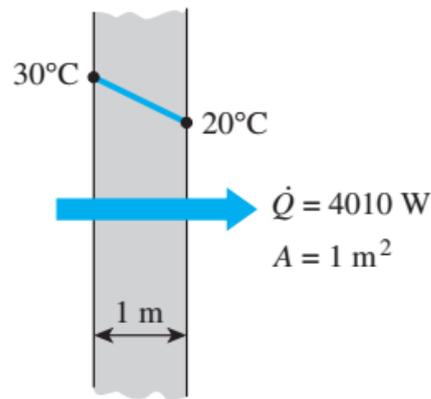
$\dot{Q}$  : laju perpindahan panas ( W )

k : konduktivitas termal ( W/m·K )

$dT/dx$  : gradien temperatur ( K )

A : luas bidang perpindahan panas (  $m^2$  )

Kemiringan kurva temperatur pada sebuah diagram  $T-x$ . Panas dikonduksikan searah dengan penurunan temperatur, dan gradien temperatur menjadi negatif ketika temperatur turun terhadap peningkatan  $x$ . Tanda negatif didalam persamaan untuk menjamin bahwa perpindahan panas dalam arah  $x$  positif adalah sebuah nilai positif seperti yang ditunjukkan dalam skema Gambar 2.1 (Cengel & Ghajar, 2014).



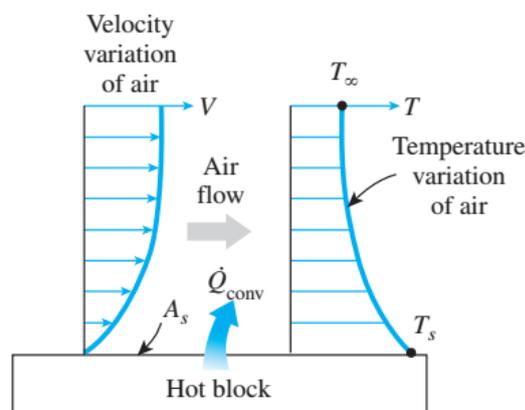
Gambar 2.1. Sketsa arah aliran panas pada tembaga ( $k = 401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )

### 2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang disebabkan oleh adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Menurut cara bergerak alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan temperatur, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan

fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*) (Holman, 2010).

Konveksi melibatkan efek gabungan induksi dan gerak fluida (Cengel & Ghajar, 2014). Dengan demikian konveksi hanya berlaku untuk perpindahan panas di dalam fluida atau antara padatan dengan fluida tetapi tidak pada perpindahan panas di dalam padatan. Perpindahan panas ini dicapai dengan pergerakan molekul di dalam cairan. Hubungan mekanisme perpindahan panas konveksi dan konduksi dapat digambarkan dengan pelat yang dipanaskan. Temperatur pelat adalah  $T_w$ , dan temperatur fluida adalah  $T_\infty$ . Kecepatan aliran akan muncul pada fluida yang kemudian akan direduksi menjadi nol pada pelat sebagai akibat dari aksi viskos pada fluida. Karena kecepatan lapisan fluida di dinding nol, maka perpindahan panas yang terjadi pada titik tersebut hanya konduksi. Perhatikan analogi pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perpindahan kalor secara konveksi

Pendinginan balok panas dengan meniupkan udara dingin ke permukaan atasnya (Gambar 2.2). Panas pertama kali ditransfer ke lapisan udara yang berdekatan dengan blok secara konduksi. Panas ini kemudian dibawa pergi dari permukaan secara konveksi, oleh efek gabungan dari konduksi di udara yang

disebabkan oleh gerakan acak molekul udara dan gerakan massal atau makroskopik udara yang menghilangkan udara panas di dekat permukaan dan menggantikannya dengan udara yang lebih dingin. Pengaruh konveksi secara menyeluruh, dapat dinyatakan menggunakan hukum pendinginan Newton pada persamaan 2.2

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

Dimana :

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

$A_s$  : luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$T_s$  : Temperatur absolut permukaan (K)

$T_{\infty}$  : temperatur sekitar (K)

### 2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh materi dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau foton) sebagai akibat dari perubahan konfigurasi elektronik dari atom atau molekul. Berbeda dengan konduksi maupun konveksi, perpindahan panas radiasi tidak memerlukan kehadiran media perantara. Dan faktanya perpindahan panas melalui radiasi adalah yang tercepat dan tidak mengalami redaman dalam ruang hampa (Cengel & Ghajar, 2014). Pertukaran radiasi dapat dihitung dengan persamaan 2.3 berikut ini.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (2.3)$$

Dimana :

$\varepsilon$  : emisivitas ; sifat radiasi pada permukaan

$A_s$  : luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$\sigma$  : konstanta *Stefan – Boltzman* ( $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$T_s$  : Temperatur absolut permukaan ( $\text{K}^4$ )

$T_{\text{surr}}$  : temperatur sekitar ( $\text{K}^4$ )

#### 2.1.4 Konduktivitas Thermal

Konduktivitas termal adalah sifat bahan untuk menghantarkan panas. Bahan dengan kemampuan perpindahan panas yang baik, misalnya logam, memiliki nilai konduktivitas yang tinggi, sedangkan bahan dengan konduktivitas yang buruk (gas) memiliki nilai konduktivitas yang rendah (Harding, 2012). Pengukuran eksperimental dapat dilakukan untuk menentukan konduktivitas termal suatu material. Secara umum konduktivitas termal sangat tergantung pada temperatur (Holman, 2010). Pada tabel 2.1 menunjukkan nilai konduktivitas termal untuk beberapa bahan.

Tabel 2.1. Konduktivitas termal berbagai bahan pada 25 °C

Material	$k, \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}^*$
Diamond	2300
Silver	429
Copper	401
Gold	317
Aluminum	237
Iron	80.2
Mercury (l)	8.54
Glass	0.78
Brick	0.72
Water (l)	0.607

#### 2.2 Alat Penukar Panas ( *Heat Exchangers* )

Penukar panas adalah perangkat perpindahan panas yang digunakan untuk mentransfer energi panas internal antara dua atau lebih cairan yang tersedia pada suhu yang berbeda. Di sebagian besar penukar panas, fluida dipisahkan oleh

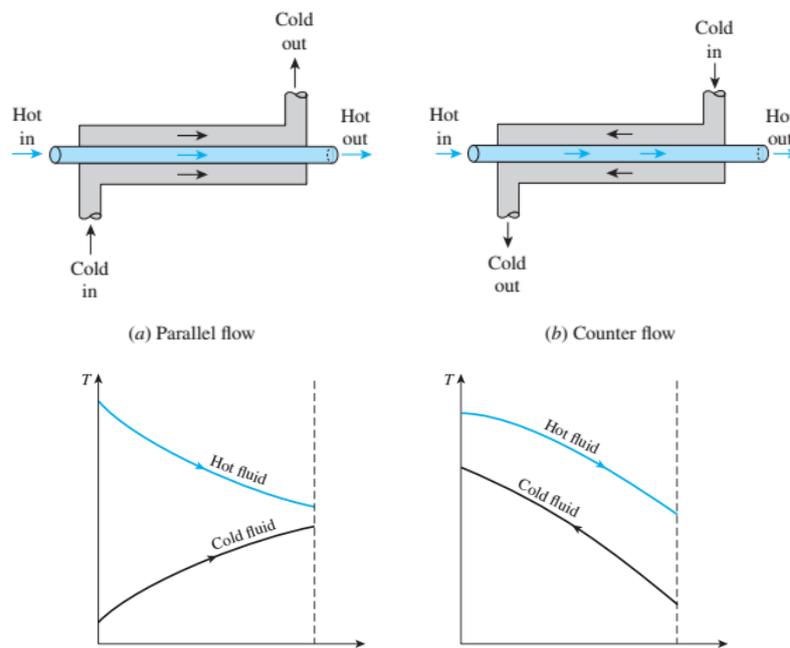
permukaan perpindahan panas, dan idealnya mereka tidak bercampur. Penukar panas digunakan di proses, listrik, minyak bumi, transportasi, AC, pendinginan, kriogenik, pemulihan panas, bahan bakar alternatif, dan industri lainnya. Contoh umum penukar panas yang kita kenal penggunaan sehari-hari adalah radiator mobil, kondensor, evaporator, pemanas awal udara, dan pendingin oli. Penukar panas dapat diklasifikasikan ke dalam berbagai cara (Thulukkanam, 2013).

### 2.2.1 Jenis-jenis Alat Penukar Panas

Secara umum, penukar panas industri telah diklasifikasikan menurut konstruksi, proses transfer, derajat kekompakan permukaan, susunan aliran, susunan lintasan, fase proses fluida, dan mekanisme perpindahan panas (Thulukkanam, 2013). Menurut detail konstruksi, penukar panas diklasifikasikan sebagai berikut.

#### a. *Double pipe heat exchanger*

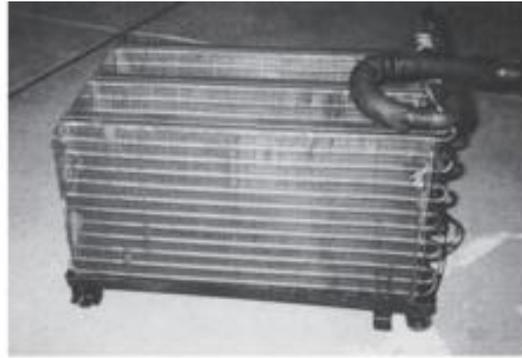
Penukar panas pipa ganda merupakan jenis *heat exchanger* paling sederhana yang terdiri dari dua pipa konsentris dengan diameter yang berbeda. Satu fluida dalam penukar panas pipa ganda mengalir melalui pipa yang lebih kecil sementara fluida lainnya mengalir melalui ruang annular antara kedua pipa. Pada penukar panas jenis ini arah aliran kedua fluida (fluida panas dan fluida dingin) dapat bergerak secara searah maupun berlawanan. Arah aliran fluida pada pipa berpengaruh pada perubahan temperatur yang terjadi pada fluida yang mengalir. Hubungan ini dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Cengel & Ghajar, 2014).



Gambar 2.3. Hubungan antara perbedaan arah aliran fluida dengan temperatur dalam *double pipe*

#### b. Compact Heat Exchangers

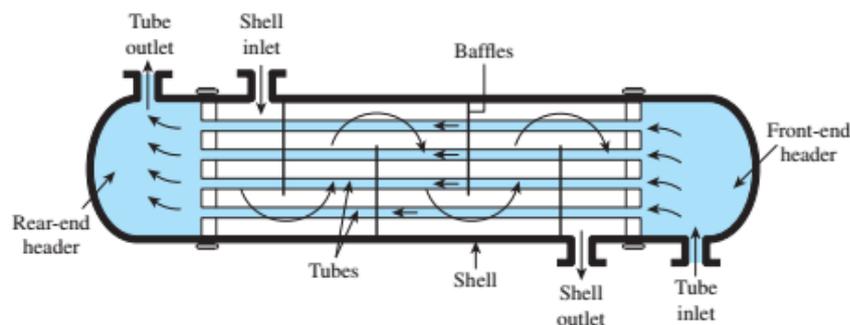
Penukar panas jenis ini memungkinkan untuk mencapai laju perpindahan panas yang tinggi antara dua cairan dalam volume yang kecil, dan mereka biasanya digunakan dalam aplikasi dengan batasan ketat pada berat dan volume penukar panas. Luas permukaan yang besar dalam penukar panas jenis ini diperoleh dengan menempelkan pelat tipis atau sirip bergelombang yang berjarak dekat ke dinding yang memisahkan antara dua cairan. Penukar panas jenis ini biasanya digunakan untuk fluida gas-ke-gas dan penukar panas gas-ke-cair (atau cair-ke-gas), untuk mengatasi koefisien perpindahan panas yang rendah dengan menambah luas permukaan. Contoh penukar panas jenis ini adalah radiator pada mobil dan sistem pendingin udara seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Alat penukar panas gas ke cair jenis *compact* pada sistem pendingin udara

c. *Shell and Tube Heat Exchangers*

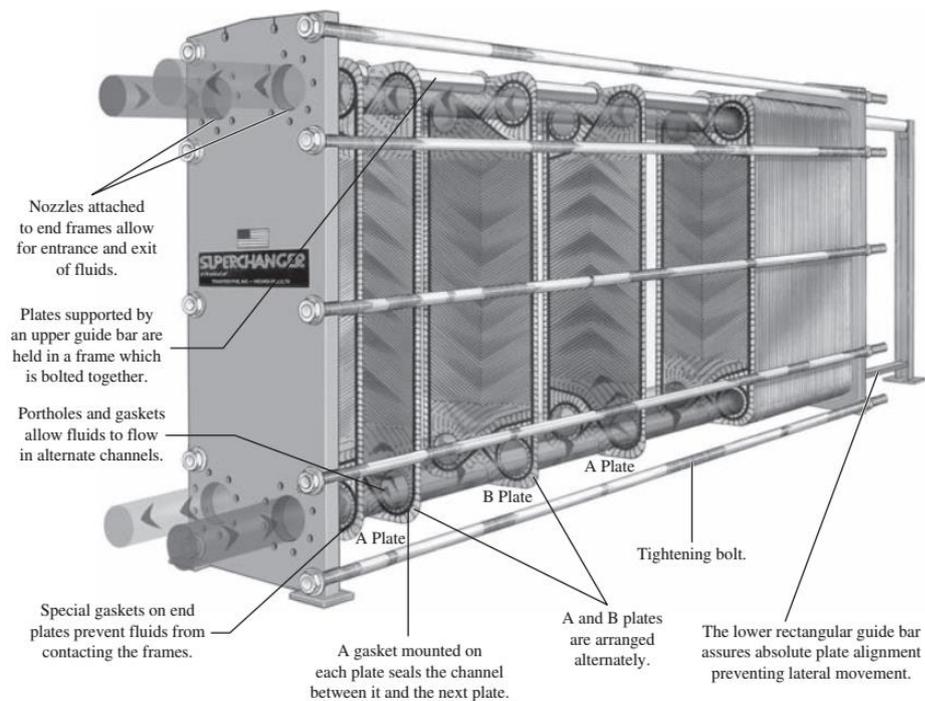
Penukar panas jenis ini yang paling umum dalam aplikasi industri. Penukar panas berisi sejumlah besar tabung dikemas dalam *shell* dengan sumbu sejajar dengan *shell*. Perpindahan panas terjadi ketika satu fluida mengalir di dalam tabung sementara fluida lainnya mengalir di luar tabung melalui *shell*. *Baffle* biasanya ditempatkan di dalam *shell* yang berfungsi mendorong cairan sisi *shell* mengalir melintasi *shell* untuk meningkatkan perpindahan panas dan untuk menjaga jarak yang sama antara tabung. Meskipun digunakan secara luas, namun penukar panas *shell-and-tube* tidak cocok digunakan dalam aplikasi otomotif dan pesawat karena ukuran dan beratnya yang relatif besar (Cengel & Ghajar, 2014). Cara kerja alat penukar panas jenis ini dapat dilihat dalam gambar 2.5.



Gambar 2.5. Skema penukar panas *shell and tube*

d. *Plate and Frame Heat Exchangers*

Jenis penukar panas ini terdiri dari serangkaian pelat dengan saluran aliran datar bergelombang. Cairan panas dan dingin mengalir di jalur alternatif yang menyebabkan setiap aliran fluida dingin diapit oleh dua aliran fluida panas sehingga menghasilkan perpindahan panas yang sangat efektif. Skema aliran fluida yang melintas *Plate and Frame Heat Exchangers* dapat dilihat pada gambar 2.6.

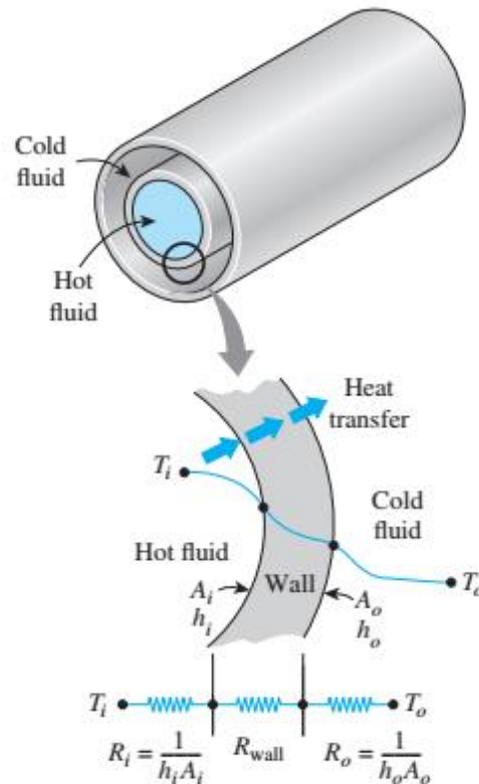


Gambar 2.6. Skema penukar panas *plate and frame*

### 2.2.2 Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Penukar panas biasanya melibatkan dua aliran fluida yang dipisahkan oleh padatan dinding. Panas pertama-tama dipindahkan dari fluida panas ke dinding

secara konveksi, melalui dinding dengan konduksi, dan dari dinding ke cairan dingin lagi dengan konveksi. Efek radiasi biasanya termasuk dalam koefisien perpindahan panas konveksi (Cengel & Ghajar, 2014). Resistansi termal pada penukar panas pipa ganda melibatkan dua resistansi konveksi dan satu resistansi konduksi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Resistansi termal pada penukar panas pipa ganda

Resistansi konduksi pada penukar panas pipa ganda dapat dinyatakan dalam persamaan 2.4

$$R_{\text{wall}} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (2.4)$$

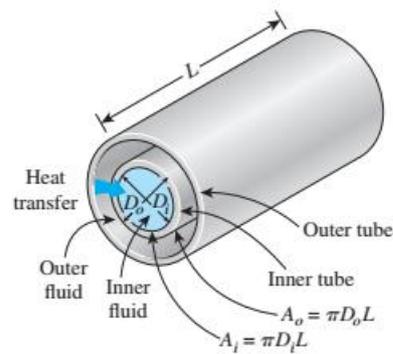
dimana  $k$  adalah konduktivitas termal bahan dinding (W/m.K) dan  $L$  adalah panjang tabung (m). Resistansi konveksi pada penukar panas pipa ganda dapat dinyatakan dalam persamaan 2.5

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h \cdot A_s} \quad (2.5)$$

dimana  $h$  adalah koefisien perpindahan panas konveksi ( $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$  dan  $A_s$  adalah luas permukaan perpindahan panas konveksi ( $\text{m}^2$ ). Maka resistansi termal total menjadi persamaan 2.6

$$R = R_{\text{total}} = R_i + R_{\text{wall}} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.6)$$

Ketika satu cairan mengalir di dalam tabung, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Dua luas permukaan pada penukar panas pipa ganda

Maka luas penampang masing-masing area silinder dalam seperti pada persamaan 2.7

$$A_i = \pi D_i L \quad \text{dan} \quad A_o = \pi D_o L \quad (2.7)$$

Dalam analisis penukar panas, akan lebih mudah untuk menggabungkan semua hambatan termal di jalur aliran panas dari fluida panas ke fluida dingin ke dalam resistansi tunggal  $R$ , dan untuk menyatakan laju perpindahan panas antara kedua fluida dapat dinyatakan dalam persamaan 2.8 (Cengel & Ghajar, 2014).

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} U A_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (2.8)$$

Dimana :

$A_s$  : luas permukaan ( $m^2$ )

$U$  : koefisien perpindahan panas keseluruhan ( $W/m^2 \cdot K$ )

Dengan menghilangkan  $\Delta T$  maka didapatkan persamaan 2.9

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.9)$$

Ketika pipa dilakukan modifikasi berupa sirip yang bertujuan untuk memperluas area perpindahan panas, maka persamaan perpindahan panas total pada sisi sirip akan berubah seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.10

$$A_s = A_{total} = A_{fin} + A_{unfinned} \quad (2.10)$$

Untuk sirip pendek dengan konduktivitas termal yang tinggi dan bersifat isothermal, maka dapat menggunakan hubungan resistansi konveksi untuk menghitung luas total seperti yang di tulis pada persamaan 2.11.

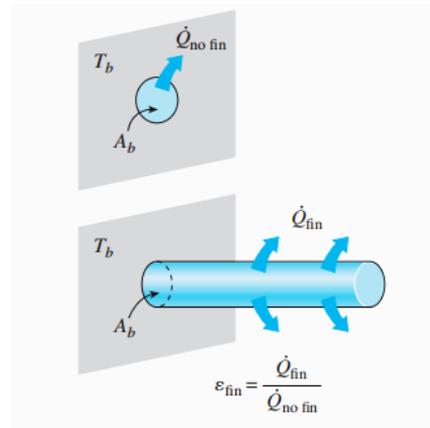
$$R_{conv} = 1/hA_s \quad (2.11)$$

Tetapi jika konduktivitas sirip rendah dan tidak isothermal maka luas permukaan efektif dapat ditentukan dalam persamaan 2.12(Cengel & Ghajar, 2014).

$$A_s = A_{unfinned} + \eta_{fin} A_{fin} \quad (2.12)$$

### 2.2.3 Efisiensi Sirip

Sirip digunakan untuk meningkatkan perpindahan panas. Faktanya, tidak ada jaminan bahwa menambahkan sirip pada permukaan akan meningkatkan perpindahan panas. Performa dari sirip dinilai berdasarkan peningkatan perpindahan panas relatif terhadap kasus tanpa sirip. (Cengel & Ghajar, 2014).



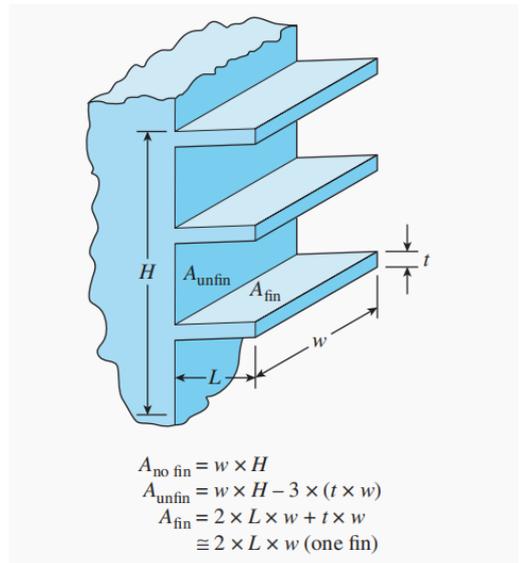
Gambar 2.9. Efektivitas Sirip

Kinerja sirip dinyatakan dalam bentuk efisiensi sirip yang didefinisikan dalam bentuk persamaan 2.12 berikut.

$$\epsilon_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{no\ fin}} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{hA_b(T_b - T_\infty)} = \frac{\eta_{fin} h A_{fin} (T_b - T_\infty)}{hA_b(T_b - T_\infty)} = \frac{A_{fin}}{A_b} \eta_{fin} \quad (2.13)$$

Permukaan bersirip dirancang untuk memaksimalkan efektivitas dan meminimalkan biaya. Kinerja sirip mempengaruhi efektivitas dari penggunaan sirip, efektivitas sirip dapat ditentukan dengan mudah bila efisiensi sirip diketahui, atau sebaliknya.

Efektivitas keseluruhan untuk permukaan bersirip diartikan sebagai rasio dari total perpindahan panas dari permukaan bersirip ke perpindahan panas dari permukaan yang sama jika tidak ada sirip seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 (Cengel & Ghajar, 2014) .



Gambar 2.10. Berbagai luas permukaan yang terkait dengan permukaan persegi panjang dengan tiga sirip

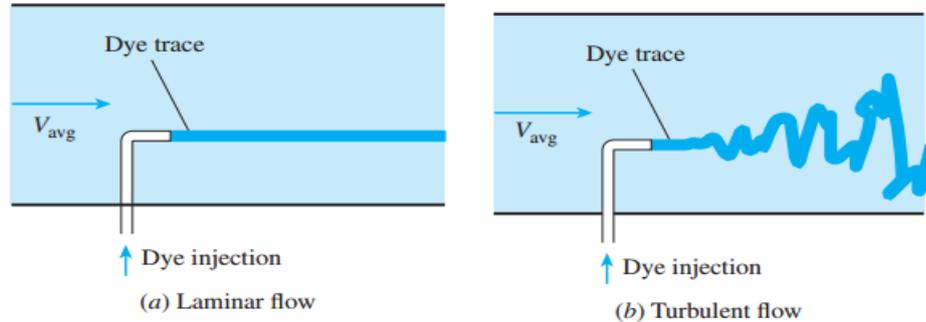
Efektivitas keseluruhan sirip dapat ditentukan melalui persamaan 2.14.

$$\varepsilon_{fin\ overall} = \frac{\dot{Q}_{total,fin}}{\dot{Q}_{total,nofin}} = \frac{h (A_{unfin} + \eta_{fin} A_{fin})(T_b - T_{\infty})}{h A_{no\ fin}(T_b - T_{\infty})} = \frac{A_{unfin} + \eta_{fin} A_{fin}}{A_{no\ fin}} \quad (2.14)$$

#### 2.2.4 Aliran Laminar dan Turbulen

Pemeriksaan yang cermat terhadap aliran dalam pipa mengungkapkan bahwa aliran fluida efisien pada kecepatan rendah tetapi berubah menjadi kacau ketika kecepatan meningkat di atas nilai kritis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Pada kasus pertama dikatakan aliran laminar, ditandai dengan kelancaran arus dan gerakan yang sangat teratur, sedangkan pada kasus kedua dikatakan aliran turbulen, yang dicirikan oleh fluktuasi kecepatan dan gerakan yang sangat tidak teratur. Transisi dari aliran laminar ke turbulen tidak terjadi secara tiba-tiba melainkan, itu terjadi di beberapa wilayah di mana aliran berfluktuasi antara aliran laminar dan turbulen sebelum menjadi turbulen penuh. Sebagian besar aliran yang ditemui dalam praktiknya adalah turbulen. Aliran

laminar ditemui ketika cairan sangat kental seperti minyak mengalir dalam pipa kecil atau saluran sempit.



Gambar 2.11. Perilaku cairan berwarna yang disuntikkan ke dalam aliran dalam laminar dan aliran turbulen dalam pipa

### 2.2.5 Reynold Number

Transisi dari aliran laminar ke turbulen antara lain tergantung pada geometri permukaan, kekasaran permukaan, kecepatan aliran, temperatur permukaan, dan jenis cairan. Setelah eksperimen yang melelahkan pada tahun 1880-an, Osborn Reynolds menemukan bahwa aliran tergantung pada rasio gaya inersia terhadap gaya viskos dalam fluida. Rasio ini disebut bilangan Reynolds, yang merupakan besaran tak berdimensi, dan dinyatakan untuk aliran eksternal yang dinyatakan seperti persamaan 2.15 berikut.

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya viskos}} = \frac{VLc}{\nu} = \frac{\rho VLc}{\mu} \quad (2.15)$$

Dimana  $V$  merupakan kecepatan awal (setara dengan kecepatan aliran bebas untuk sebuah pelat datar) dan  $\nu$  merupakan viskositas kinematik cairan yang ditulis dalam persamaan 2.16 berikut.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.16)$$

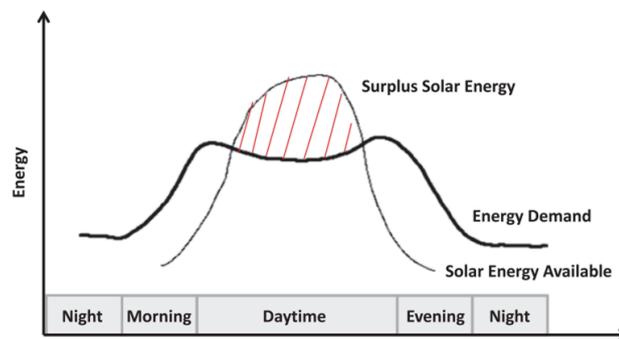
Bilangan Reynold kritis merupakan batas antara aliran laminar dan turbulen. Nilai bilangan Reynolds kritis berbeda untuk geometri dan kondisi aliran yang berbeda. Untuk aliran di atas pelat datar, nilai bilangan Reynolds kritis yang diterima secara umum adalah  $Re_{cr} = V_{x_{cr}}/v = 5 \times 10^5$ , di mana  $x_{cr}$  adalah jarak dari tepi depan pelat di mana transisi dari laminar ke aliran turbulen terjadi. Nilai  $Re_{cr}$  bisa berubah tergantung pada tingkat turbulensi dalam aliran bebas (Cengel & Ghajar, 2014).

### 2.3 Penyimpanan Energi Panas

Teknologi penyimpanan panas mengacu pada teknologi yang menyimpan sumber daya limbah panas dan melepaskannya pada waktu dan tempat yang tepat untuk menghemat energi. Penyimpanan energi melalui perubahan fase padat-cair secara inheren merupakan proses sementara. Bahan tersebut menyerap atau melepaskan energi saat meleleh atau memadat. Dengan demikian jenis sistem ini tidak terlalu cocok untuk aplikasi yang beroperasi terutama dalam kondisi tunak. Sebaliknya, bahan ini paling cocok untuk sistem yang mengalami transien berulang, seperti siklus hidup-mati, siklus puncak periodik atau yang memerlukan penyimpanan energi panas untuk digunakan nanti (Fleischer, 2015). Dalam aplikasi ini, energi yang dilepaskan diserap ke dalam PCM untuk mencegah panas berlebih di tempat lain di dalam sistem. Ketika siklus selesai, energi yang tersimpan dilepaskan ke sekeliling dan PCM memadat dan siap untuk melakukan penyerapan energi berikutnya.

PCM panas mentransfer panasnya ke dalam lingkungan saat memadat. Panas harus menembus dengan cepat dan efektif ke dalam massa PCM, yang

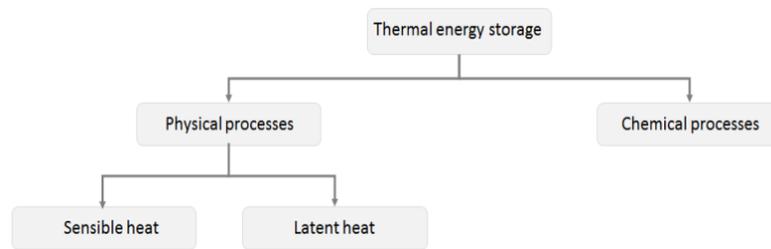
mengarah ke peleburan kongruen di seluruh sistem. Sistem yang membutuhkan PCM sebagai penyimpanan energi panas disebut sebagai penyimpanan energi termal atau TES (*Thermal energy storage*). Dalam aplikasi ini, selama masa produksi energi berlebih, sebagian dari energi panas itu dapat dialihkan ke sistem penyimpanan yang akan digunakan di lain waktu. Penyimpanan energi termal untuk pembangkit listrik tenaga surya ditunjukkan seperti gambar 2.12 (Fleischer, 2015).



Gambar 2.12. Grafik distribusi penyinaran dalam penyimpanan energi termal

Banyak pembangkit energi surya skala besar memberikan surplus energi pada waktu-waktu tertentu dalam sehari. Jika pembangkit dapat dirancang untuk menyimpan energi surplus untuk digunakan pada saat pasokan menurun, pabrik akan beroperasi lebih ekonomis dan efisien seperti yang terlihat pada Gambar 12. *Thermal energy storage* dapat diaplikasikan pada sistem pemanas dan pendingin udara efisiensi tinggi, sistem pemanas air domestik, dan bahan bangunan.

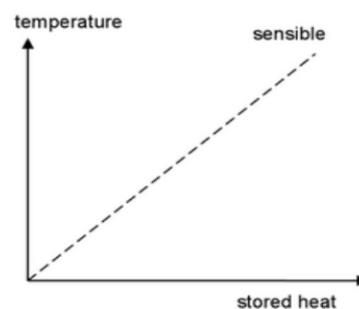
Ada tiga jenis sistem penyimpanan termal berdasarkan bagaimana energi panas disimpan: sensibel, laten, dan termokimia (Chen et al., 2020) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13 ((Jouhara et al., 2020).



Gambar 2.13. Metode penyimpanan energi panas

### 2.3.1 Penyimpanan Panas Sensibel

Penyimpanan panas sensibel sejauh ini merupakan metode yang paling umum untuk penyimpanan panas karena yang paling sederhana dan bentuk termudah dari teknologi penyimpanan panas (Guelpa & Verda, 2019). Panas sensibel merupakan panas didalam sistem penukar panas yang dapat merubah temperatur media penyimpanan tetapi tidak merubah fasanya. Perubahan temperatur linear dengan jumlah panas yang disimpan dan tergantung pada kapasitas panas spesifik dari suatu bahan seperti ditunjukkan grafik pada gambar 2.14 (Jouhara et al., 2020).



Gambar 2.14. Peningkatan temperatur selama penyimpanan panas sensibel

Metode penyimpanan sensibel memiliki beberapa kekurangan, diantaranya kepadatan energi yang rendah dan kehilangan energi panas pada temperatur berapapun (Elias & Stathopoulos, 2019). Penyerapan dan pelepasan energi panas

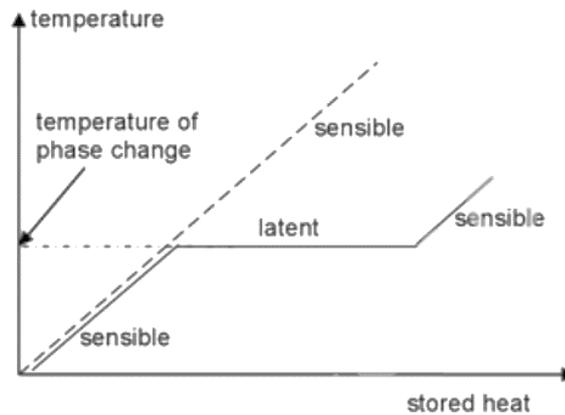
dalam media penyimpanan dapat berlangsung melalui radiasi, konduksi dan konveksi yang dituliskan dalam persamaan 2.17 (Jouhara et al., 2020)

$$Q = mC_p (T_f - T_i) \quad (2.17)$$

Bahan penyimpanan panas sensibel yang paling umum digunakan adalah keramik, air serta minyak. Mereka bisa diterapkan dalam skala industri maupun perumahan, misalnya pemanas air perumahan atau penyimpanan air panas di pemanas distrik jaringan. Selain itu bahan bangunan dengan kapasitas termal yang sangat tinggi dapat menyimpan energi panas dalam waktu beberapa bulan (Elias & Stathopoulos, 2019).

### 2.3.2 Penyimpanan Panas Laten

Penyimpanan panas laten adalah perpindahan panas sebagai akibat dari perubahan fasa yang terjadi pada suatu tempat tertentu dalam rentang temperatur yang sangat sempit. Bahan yang biasa digunakan dalam penyimpanan panas laten adalah : garam cair, lilin parafin dan air. Fase transisi bisa padat-cair (mencair dan membeku), cair-gas (penguapan dan kondensasi), atau padat-padat (Elias & Stathopoulos, 2019). Dalam proses penyimpanan panas ini tergantung dari sifat-sifat bahan yang dipilih. Dengan kenaikan temperatur, perubahan fase dari padat ke cair terjadi perubahan volume yang sangat kecil, biasanya kurang dari 10 % dan tekanan tidak berubah secara signifikan. Hal ini membuat pelelehan dan pembekuan bahan penyimpan panas terjadi pada temperatur konstan atau dikenal dengan temperatur perubahan fasa. Ketika peleburan selesai, perpindahan panas lebih lanjut menyebabkan panas sensibel disimpan kembali seperti ditunjukkan pada gambar 2.15 (Jouhara et al., 2020).



Gambar 2.15. Penyimpanan panas laten pada perubahan fase padat-cair

Energi yang tersimpan merupakan rangkaian kimia yang tersusun ulang dalam struktur massal material. Sehingga sistem penyimpanan panas laten menyediakan kepadatan penyimpanan energi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem penyimpanan sensibel (Jouhara et al., 2020). Panas yang tersimpan sebanding dengan perbedaan entalpi ( $\Delta H$ ) antara fase padat dan cair atau dapat dituliskan dalam persamaan 2.18.

$$\Delta Q = \Delta H = m \Delta h \quad (2.18)$$

Sistem molekuler internal berubah dalam bahan perubahan fase padat-cair ketika temperatur melebihi ambang kritis (yaitu temperatur fase transisi). Proses nukleasi dimulai tergantung pada laju pendinginan, jenis partikel dan keberadaan pengotor ketika temperatur turun di bawah temperatur fase transisi. Bahan perubahan fase padat-padat mempunyai karakteristik kepadatan penyimpanan energi yang tinggi dengan perubahan volume yang kecil. Selain itu, mereka tidak berisiko bocor dan tidak memerlukan enkapsulasi (Fallahi et al., 2017).

Kondisi batas mempengaruhi temperatur perubahan fasa untuk transformasi cair-gas. Kepadatan penyimpanan energi dalam sistem LHS (*Latent Heat Storage*)

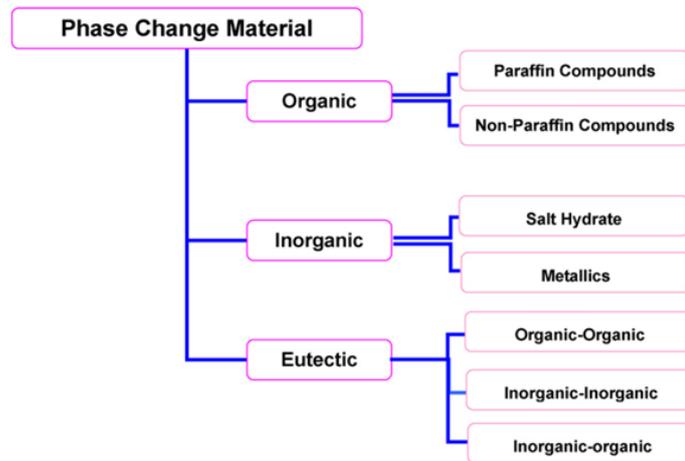
lebih efisien daripada di sistem SHS (*Sensibel Heat Storage*) karena mereka menggunakan transformasi ikatan kimia dalam struktur massa material (Elias & Stathopoulos, 2019). Kapasitas panas laten suatu bahan dapat didefinisikan dalam persamaan 2.19.

$$Q = mC_p dT(s) + mL + mC_p dT \quad (2.19)$$

Di mana  $m$  adalah massa bahan perubahan fasa (kg),  $L$  adalah entalpi fusi dan  $dT$  adalah perbedaan suhu. Persamaan di atas menggambarkan panas sensibel fase padat, panas laten peleburan, dan panas sensibel fase cair.

#### 2.4 *Phase Change Material (PCM)*

PCM adalah bahan penyimpanan panas “laten”. Perpindahan energi panas terjadi ketika suatu bahan berubah dari padat menjadi cair atau cair menjadi padat. Ini disebut dengan perubahan fase. PCM menyerap dan melepaskan panas pada temperatur yang hampir konstan. Mereka dapat menyimpan 5-14 kali lebih banyak panas per satuan volume dibanding dengan bahan penyimpan panas sensibel. Sejumlah besar PCM diketahui meleleh dengan panas fusi dalam rentang yang diperlukan. Namun sebagai bahan penyimpanan panas laten, bahan ini harus menunjukkan sifat termodinamika, kinetik dan kimia tertentu yang diinginkan (Sharma et al., 2009). PCM yang digunakan sebagai penyimpan panas laten dapat diklasifikasikan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16. Klasifikasi PCM

#### 2.4.1. PCM Organik

PCM organik dikaitkan dengan berbagai komponen termasuk parafin, asam lemak, dan campuran eutektiknya, seperti ester, dan zat organik lainnya. Karena panas peleburannya yang tinggi, temperatur perubahan tahap yang berfluktuasi, sifat pendinginan nol, tekanan uap yang lebih rendah, kelembaman kimiawi, dan konduktivitas berkelanjutan, di antara sifat-sifat penting lainnya, parafin telah digunakan untuk penyimpanan energi (Verma et al., 2023). Bahan organik selanjutnya dijelaskan sebagai parafin dan nonparafin. Bahan organik termasuk peleburan kongruen berarti meleleh dan membeku berulang kali tanpa pemisahan fase dan degradasi akibat panas laten fusi mereka, nukleasi diri berarti mereka mengkristal dengan sedikit atau tanpa pendinginan dan biasanya non-korosif (Sharma et al., 2009).

### 2.4.2. Parafin

Parafin merupakan senyawa rantai lurus, yang mempunyai karakteristik penting yaitu pelelehan yang homogen dan pembentukan inti. Parafin secara kimia bersifat netral dan stabil pada temperatur dibawah 500 °C. Selain itu parafin aman, tidak korosif, murah serta stabil. Hal inilah yang membuat parafin menjadi pilihan alternatif sebagai PCM untuk penyimpanan (Rostami et al., 2020). Lilin parafin sebagian besar ditemukan sebagai padatan lilin putih, tidak berbau, tidak berasa, dengan titik leleh khas antara sekitar 47 °C dan 64 °C (116,6 °F hingga 147,2 °F), dan memiliki kerapatan sekitar 0,9 g/cm<sup>3</sup> (Ijogbemeye Oseghale & Akpabio, 2012). Lilin parafin kelas komersial diperoleh dari penyulingan minyak mentah. Kebanyakan PCM parafin adalah campuran hidrokarbon jenuh dengan jumlah atom karbon yang berbeda dalam molekul. Temperatur leleh dan panas peleburan parafin meningkat dengan panjang rata-rata rantai hidrokarbon. Hubungan ini dapat digunakan untuk merancang sifat PCM dengan mencampur parafin yang berbeda secara fisik. Bahkan setelah 1000-2000 siklus lilin parafin kelas komersial dan parafin murni lainnya memiliki sifat stabil dan keandalan termal yang baik. Lilin parafin aman, karena parafin tidak menyebabkan korosi dan kompatibel dengan wadah logam. (Alva et al., 2017).



(a)



(b)

Gambar 2.17. Parafin (a) Parafin padat (b) Parafin cair.

Beberapa studi eksperimental tentang proses peleburan dan pembekuan dari berbagai parafin tingkat teknis telah dilakukan, melaporkan sifat yang diinginkan seperti yang dilakukan Rathod and Banerjee yang mempelajari perilaku termal lilin parafin dengan temperatur leleh 60 C, mengamati bahwa temperatur masuk memiliki efek yang lebih tinggi pada fraksi panas selama PCM meleleh daripada laju aliran massa (Rathod & Banerjee, 2014). Selain itu, Akgün mempelajari proses peleburan dan pembekuan parafin komersial yang berbeda (P42-44, P46-48, P56-58), yang diuji secara eksperimental di laboratorium (5 mg) dan pada skala yang lebih tinggi (2,2 kg) dalam penukar panas shell-and-tube dengan kemiringan sudut 5 derajat untuk berbagai temperatur saluran masuk dan laju aliran massa HTF (air), dan diperoleh kesimpulan yang sama seperti pada penelitian sebelumnya (Akgün et al., 2008).

PCM yang sering digunakan adalah parafin komersial RT58, yang dikomersialkan oleh Rubitherm GmbH (Berlin, Jerman). Hal ini disebabkan rentang termal leleh parafin RT 58 yang sesuai dengan kebutuhan terutama pada aplikasi pemanas air domestik. Berikut ini sifat termo-fisik yang dimiliki oleh Parafin RT 58 seperti ditunjukkan pada tabel 2.2 (Gasia et al., 2016).

Tabel 2.2 Sifat termo-fisik RT58 menurut pabrikan

Properties	Units	Values
Melting area	(°C)	53–59
Congeaing area	(°C)	59–53
Heat storage capacity $\pm$ 7.5% (combination of latent and sensible heat in a temperature range of 50 °C to 65 °C)	(kJ·kg <sup>-1</sup> )	160
	(Wh·kg <sup>-1</sup> )	48
Specific heat capacity	(kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> )	2
Density solid (at 15 °C)	(kg·L <sup>-1</sup> )	0.88
Density liquid (at 80 °C)	(kg·L <sup>-1</sup> )	0.77
Heat conductivity (solid and liquid)	(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	0.2
Volume expansion	(%)	12.5
Flash point (PCM)	(°C)	>200
Max. operation temperature	(°C)	80

### 2.4.3. Non-Parafin

Bahan organik Non-Parafin sering disebut juga dengan fatty acids merupakan PCM dengan jumlah variasi paling banyak. Masing - masing material ini memiliki sifat-sifat tersendiri, tidak seperti material parafin yang rata-rata memiliki sifat yang hampir sama. Jenis material ini adalah material penyimpan panas yang paling banyak digunakan. Bahan organik non parafin memiliki beberapa sifat diantaranya : Kalor jenis laten yang tinggi, titik nyala rendah, termal konduktivitas yang rendah, tidak mudah terbakar sehingga tidak terlalu berbahaya dan tidak stabil pada temperatur tinggi (Bal dkk., 2010).

### **III. METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini merupakan pengujian yang mengkaji perpindahan panas pada material perubahan fasa (PCM) berupa parafin di dalam alat penukar panas sebagai media untuk menyimpan serta melepas panas. Penggunaan parafin sebagai media PCM dikarenakan 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 adalah alat penukar panas dengan tipe *double pipe heat exchanger* dimana pada penelitian ini akan menggunakan tiga variasi konfigurasi geometri yaitu pipa dalam tanpa sirip, pipa dalam dengan dua variasi ketinggian sirip aksial dan pipa dalam dengan dua variasi ketinggian sirip horisontal. Penelitian ini merupakan penelitian yang dilakukan secara eksperimental sehingga membutuhkan alat, bahan serta tempat dalam melakukan pengujiannya.

#### **3.1 Tempat Penelitian**

Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung, Balai Riset dan Standarisasi Industri Bandar Lampung, Laboratorium analisa kimia Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI Lampung.

#### **3.2 Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilakukan selama 5 bulan, dimulai pada bulan Oktober 2022 sampai dengan bulan Februari 2023. Adapun deskripsi waktu penelitian dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Rencana Pelaksanaan Penelitian

Nama Kegiatan	Oktober				November				Desember				Januari				Februari			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur																				
Persiapan dan pembuatan alat pengujian																				
Pengujian dan pengambilan data																				
Pembuatan laporan																				

### 1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah mencari jurnal tentang penelitian sebelumnya, mempelajari isi jurnal-jurnal tersebut sehingga mendapatkan hal baru yang perlu atau dapat dikembangkan dengan penelitian selanjutnya. Selanjutnya mengumpulkan data sebagai pendukung penelitian yang akan dilakukan.

### 2. Persiapan dan Pembuatan Alat Pengujian

Mempersiapkan alat pengujian dan bahan yang dibutuhkan seperti alat penukar panas berupa pipa tembaga, tabung akrilik, rangka penyangga, data logger, termokopel, pompa air.

### 3. Pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan variasi sirip pada pipa penukar panas berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan.

#### 4. Penulisan Laporan

Penulisan laporan merupakan tahapan akhir dari penelitian ini. Penulisan laporan ditujukan untuk melaporkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebagai kesimpulan data hasil dari penelitian.

### 3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

#### 3.3.1. Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

##### a. Pemanas air

Pemanas air yang digunakan berupa koil pemanas, merupakan 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 600 Watt. Nantinya koil pemanas ini akan dihubungkan dengan listrik dan dicelupkan pada air untuk memanaskan air pada temperatur tertentu. Pemanas air ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Pemanas air listrik

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. *Thermocouple* dan *data logger* dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2. *Thermocouple dan data logger*

c. *Kontroler temperatur dan SSR*

Pengontrol temperatur PID Digital ganda REX-C100 dengan termokopel tipe K sebagai input pembaca temperatur. Pengontrol temperatur REX-C100 berfungsi sebagai pengontrol mati hidupnya elemen pemanas, yang mana termokopel akan membaca temperatur air dan dikirimkan ke kontroler untuk mengontrol elemen pemanas. Apabila temperatur air telah tercapai maka kontroler mematikan elemen pemanas. Kontroler temperatur dan SSR yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut ini:

	<p><i>Spesifikasi :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daya: 10 VA</li> <li>• Akurasi pengukuran: 0.5% FS</li> <li>• Siklus pengambilan sampel: 0.5 detik</li> <li>• Temperatur pengukuran: 0-400°C</li> <li>• Power supply: AC 100-240V</li> </ul>
---	---

Gambar 3.3. Kontroler temperatur dan SSR

d. Pompa Air

Pompa air ini berfungsi untuk mensirkulasi air untuk masuk dan keluar dari alar penukar kalor hingga perpindahan panas maksimal terjadi. Pompa air yang dipakai adalah pompa air dengan kapasitas maksimal 20 liter per menit.

	<p><i>Spesifikasi :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daya: 60/85/120 Watt</li> <li>• Voltase: 220 V</li> <li>• Temperatur air (maks.): 90°C</li> <li>• Tekanan sistem (maks.): 10 bar</li> <li>• Daya dorong (maks.): 9 meter</li> <li>• Kapasitas (maks.): 27 l/menit</li> <li>• Ukuran pipa: ¾ inch</li> </ul>
---	--

Gambar 3.4. Pompa air

e. *Water flow meter*

*Water flow meter* berfungsi mengukur debit fluida yang mengalir dari penukar kalor ke tabung penampungan air, sehingga kecepatan aliran fluida dapat diketahui. *Water flow meter* yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada gambar 3.5 berikut ini:



Gambar 3.5 *Water flow meter*

f. *Selang air panas*

Selang air yang digunakan dalam penelitian ini berupa selang PEX dengan ukuran diameter 0,5 inch seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 *Selang PEX*

g. Katup air

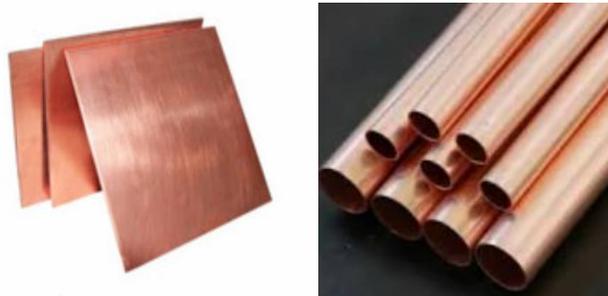
Katup air berfungsi mengontrol jumlah fluida yang mengalir seperti memperbesar dan memperkecil serta memutus aliran fluida dengan cara memutar pegangannya. penelitian ini menggunakan keran air sistem putar yang di dalamnya terdapat bola sebagai penutup seperti terlihat pada gambar 3.7 berikut ini:



Gambar 3.7 Katup air

h. Alat penukar panas

Alat penukar panas yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat penukar panas 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 pipa menggunakan pipa akrilik dengan diameter luar 50 mm dan diameter dalam pipa 46 mm. Panjang keseluruhan dari alat penukar kalor ini adalah 500 mm. Pipa dan plat tembaga, serta pipa akrilik ditunjukkan seperti gambar 3.8 dan 3.9 berikut ini.



Gambar 3.8. Plat dan pipa tembaga



Gambar 3.9 Pipa Akrilik

Pada penelitian ini dilakukan variasi debit aliran air, geometri sirip dan tinggi sirip :

1. Variasi Debit Aliran Air

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

2. Variasi geometri sirip

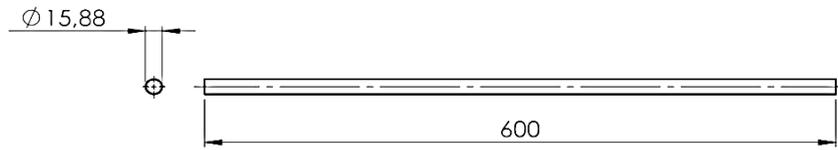
Pada pipa tembaga menggunakan tiga variasi geometri sirip yaitu pipa tanpa sirip, pipa sirip aksial dan pipa sirip longitudinal.

3. Variasi Tinggi Sirip

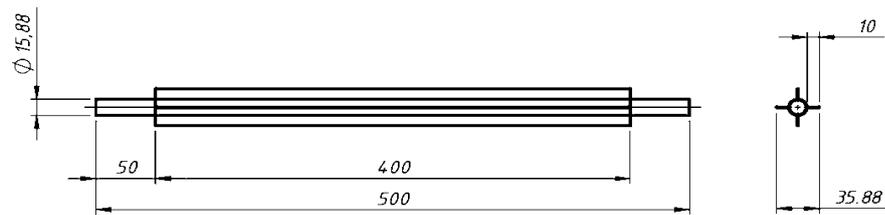
Masing-masing dari variasi geometri sirip aksial dan horisontal 6 sirip akan divariasikan lagi menjadi 3 ukuran tinggi sirip, yaitu 7 cm, 10 cm, dan 13 cm untuk mengetahui pengaruh tinggi sirip terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh.

Desain alat penukar panas dapat dilihat pada gambar 3.10 dan 3.11 berikut

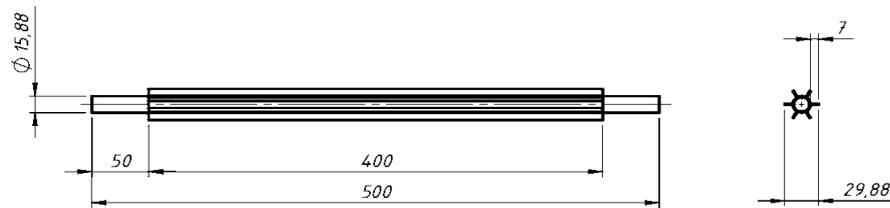
ini:



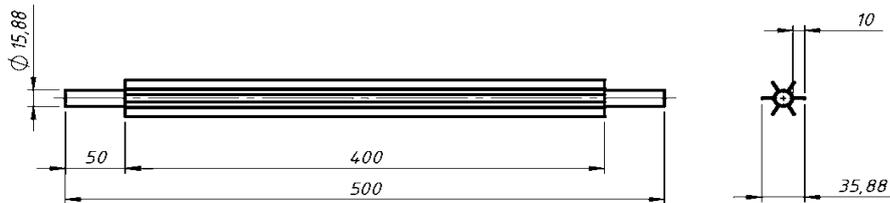
A



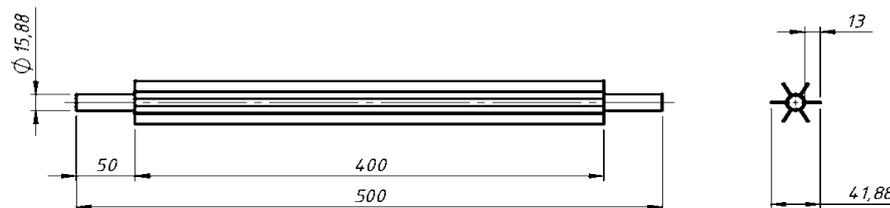
B12



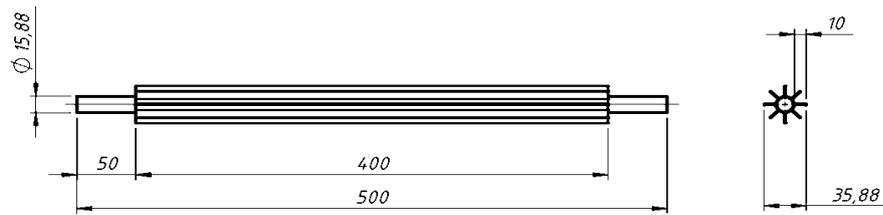
B22



B32



B21



B23

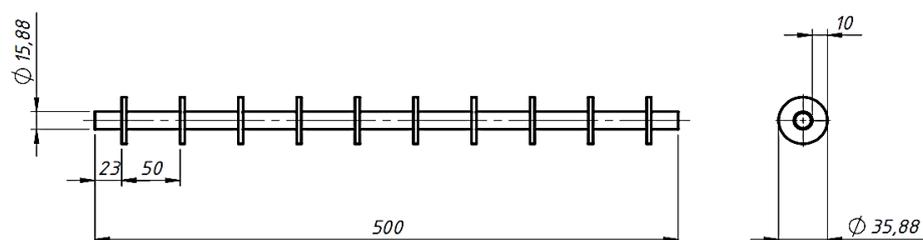
Gambar 3.10. Alat penukar panas tanpa sirip dan variasi sirip longitudinal

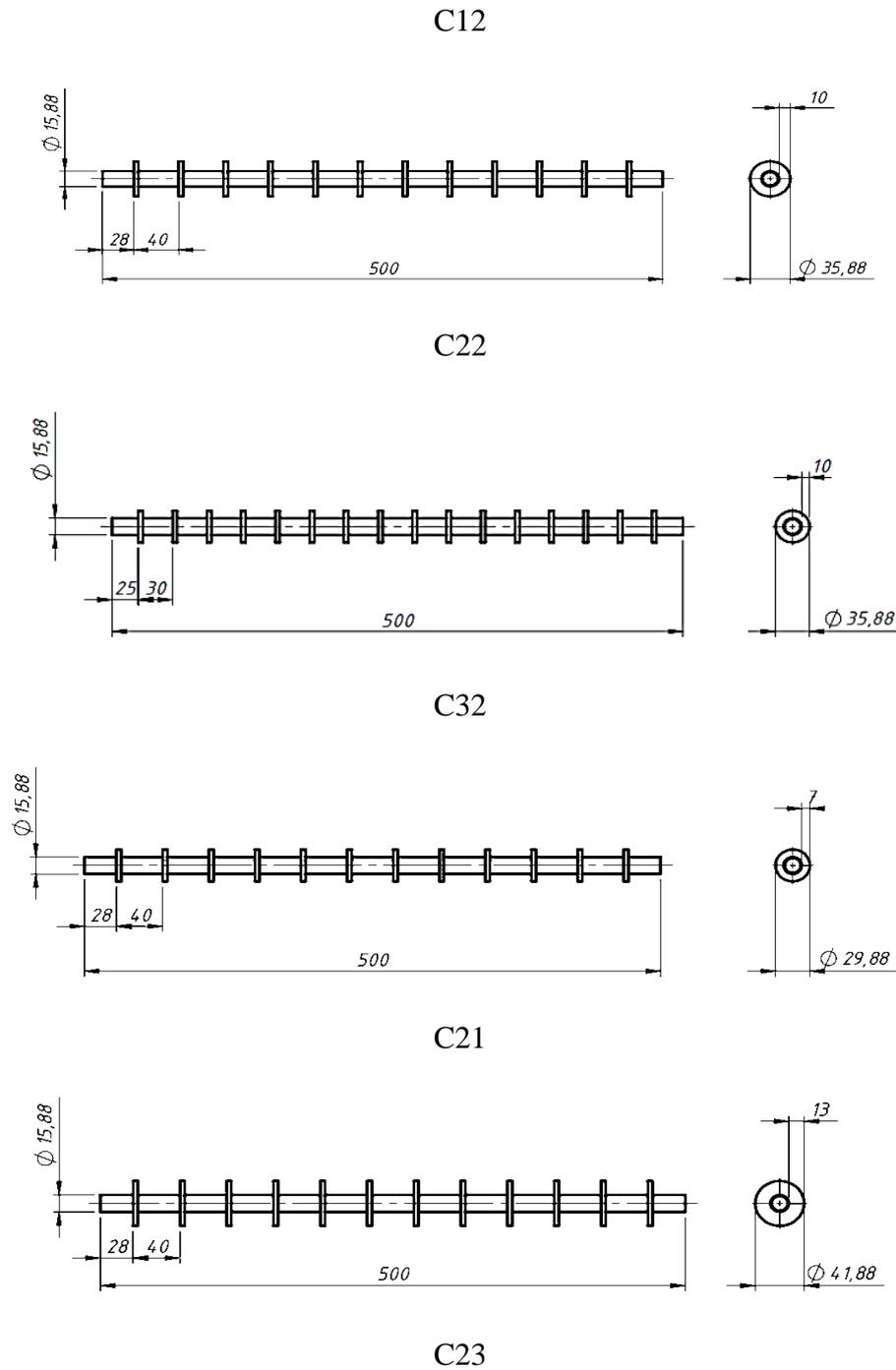
Pada gambar 3.10 menunjukkan desain pipa tembaga *annulus* dilengkapi dengan lima variasi sirip longitudinal yang berbeda jumlah dan tinggi siripnya.

Tabel 3.2 menunjukkan variasi jumlah dan tinggi sirip longitudinal.

Tabel 3.2 Variasi sirip longitudinal dan tanpa sirip

No	Variasi	Panjang pipa (mm)	Jumlah sirip	Panjang sirip (mm)	Tinggi sirip (mm)
1	A	600	0	0	0
2	B12	600	4	500	10
3	B22	600	6	500	10
4	B32	600	8	500	10
5	B21	600	6	500	7
6	B23	600	6	500	13





Gambar 3.11. Alat Penukar Panas dengan variasi sirip aksial

Pada gambar 3.11 menunjukkan desain pipa tembaga *annulus* dilengkapi dengan lima variasi sirip aksial yang berbeda jumlah dan tinggi siripnya. Tabel 3.3 menunjukkan variasi jumlah dan tinggi sirip aksial.

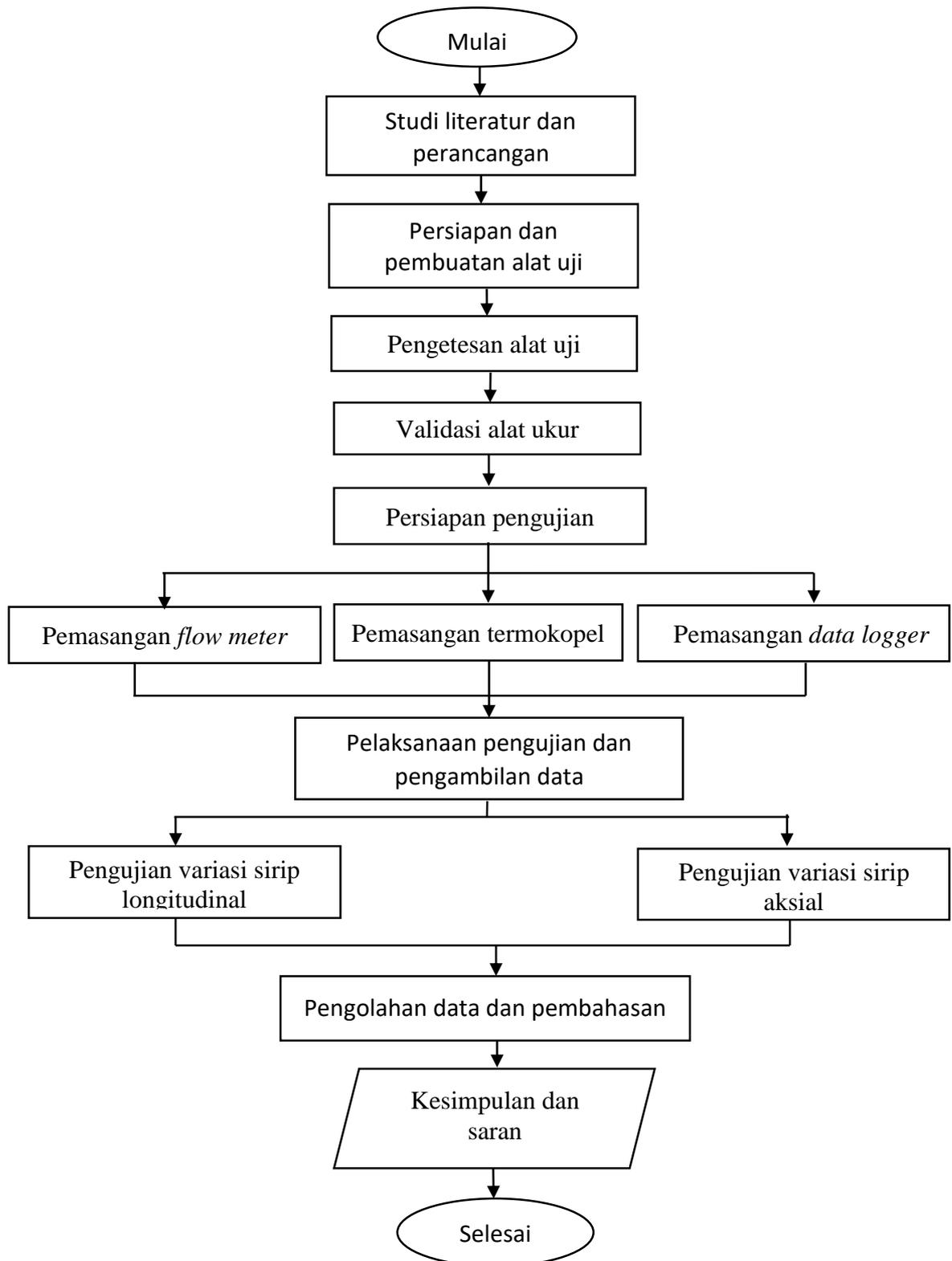
Tabel 3.3 Spesifikasi variasi sirip aksial

No	Variasi Sirip	Jumlah sirip	Tinggi sirip ( mm )
1	C12	10	10
2	C22	12	10
3	C32	16	10
4	C21	12	7
5	C23	12	13

### 3.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah air dan parafin. Air disirkulasikan oleh pompa dari penampungan air menuju alat penukar panas kemudian kembali ke penampungan air. Parafin sebagai material berubah fasa yang digunakan berjenis padat atau lilin parafin yang kemudian diletakkan pada bagian luar pipa dalam (*inner pipe*)

### 3.4 Diagram Alir Penelitian



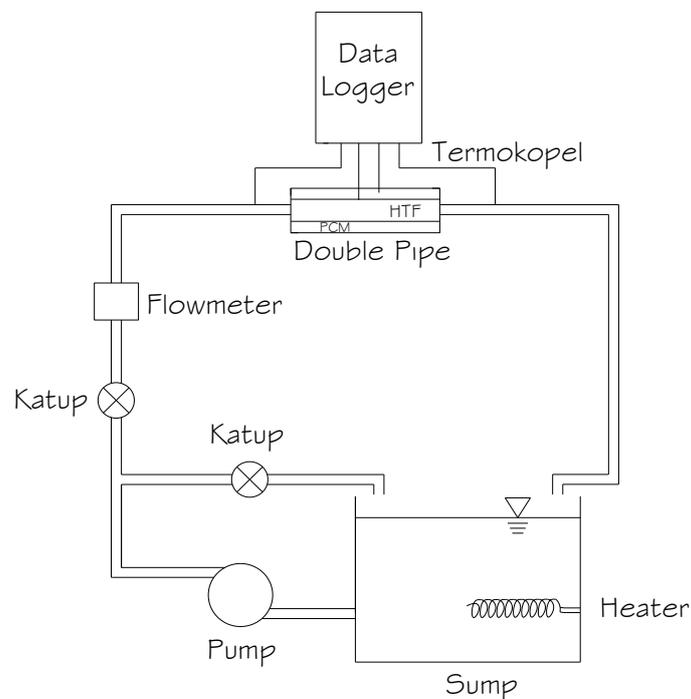
Gambar 3.12. Diagram alir penelitian

Keterangan diagram alir metodologi pengujian:

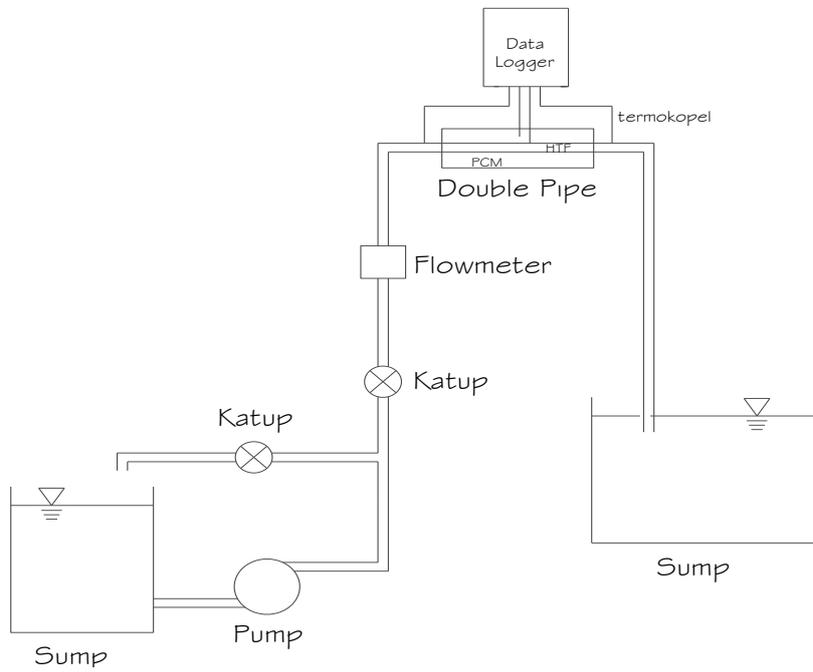
- Mulai: pembuatan proposal Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Penggunaan Sirip Longitudinal Dan Aksial Pada *Double Pipe* Terhadap Proses Pelelehan Dan Pembekuan Parafin Sebagai Penyimpan Energi Thermal”
- Studi literatur dan perancangan : mencari literatur melalui jurnal dan buku pendukung untuk kemudian melakukan rencana perancangan alat.
- Persiapan dan pembuatan alat uji : merakit rangka pengujian, tempat penampungan air dan pembuatan tabung akrilik serta variasi sirip pada pipa tembaga.
- Pengetesan alat uji : pengetesan kebocoran pada alat uji
- Persiapan pengujian : komponen utama untuk melakukan pengujian dipersiapkan, yaitu pemasangan sensor termokopel, pemasangan *flow meter*, dan pemasangan *data logger*.
- Pelaksanaan pengambilan data dan pengujian : Pengujian dibagi kedalam dua proses yaitu pelelehan dan pembekuan dengan masing-masing variasi sirip longitudinal dan aksial dan variasi laju aliran massa.
- Pengolahan Data dan Pembahasan: mengolah data dari hasil pengujian dan membahasnya disertai dengan referensi dari literatur dan buku-buku pendukung.
- Kesimpulan dan Saran: mengambil kesimpulan dari keseluruhan proses pengujian dan memberikan saran yang dibutuhkan untuk melengkapi kekurangan pada pengujian yang telah dilakukan.
- Selesai.

### 3.5 Skema Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian dimulai dari parafin dengan temperatur 31 °C atau masih dalam bentuk padat, kemudian fluida berupa air dipanaskan di tempat penampung air panas yang kemudian panasnya dialirkan ke pipa dalam dengan menggunakan pompa air hingga parafin mencair. Kecepatan dari aliran air ini dapat dikontrol dengan menggunakan katup air serta kecepatan alirannya dapat dibaca melalui *water flow meter sensor*. Temperatur parafin, temperatur fluida masuk dan fluida keluar penukar panas, serta temperatur fluida masuk dan fluida keluar tempat penampungan air dapat diketahui/terbaca dengan *thermocouple* dan data logger. Instalasi alat pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan 3.14 berikut ini.

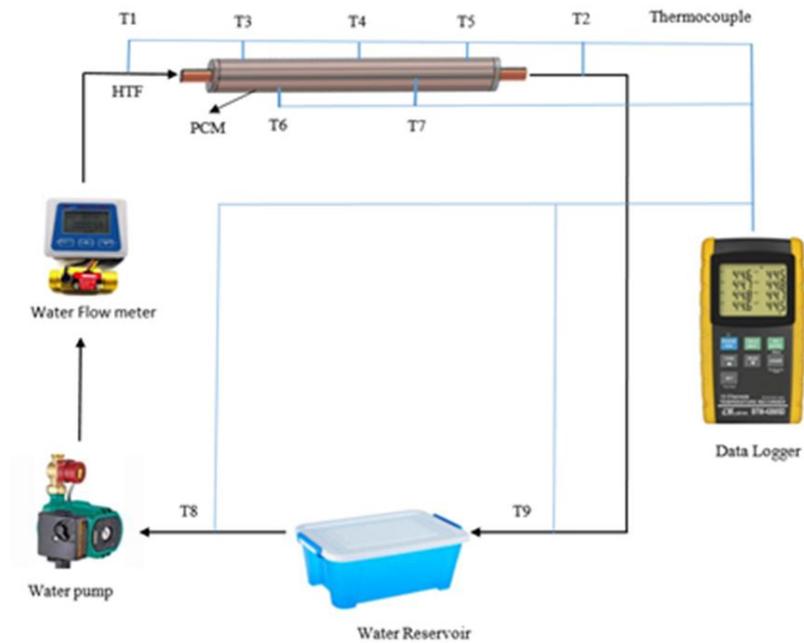


Gambar 3.13 Skema Proses Pelelehan PCM

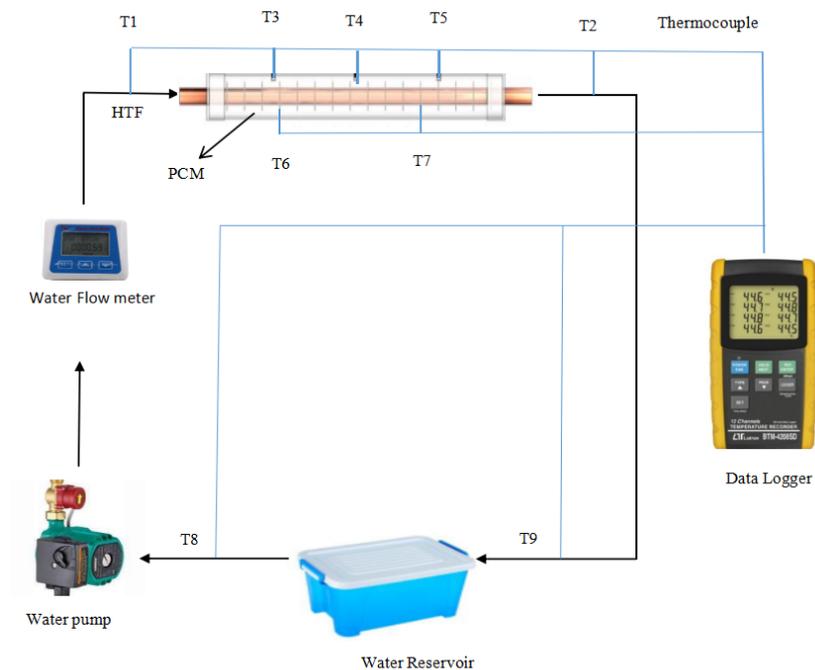


Gambar 3.14 Skema Proses Pembekuan PCM

### 3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3.15. Penempatan Titik Pengukuran Pada Sirip Longitudinal



Gambar 3.16 Penempatan Titik Pengukuran Pada Sirip Aksial

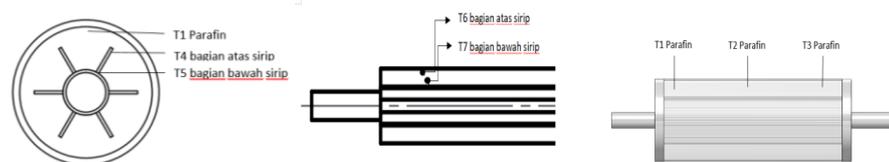
Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan *water flow meter*. Untuk pengukuran temperatur, digunakan 9 buah termokopel (T1 – T9). T1 adalah temperatur air sebelum masuk *double pipe*, T2 adalah temperatur air sesudah keluar dari *double pipe*, T3 adalah temperatur parafin yang diletakkan 10 cm setelah pangkal pipa, T4 adalah temperatur parafin yang diletakkan ditengah pipa, T5 adalah temperatur parafin yang diletakkan 10 cm sebelum ujung pipa, T6 adalah temperatur sirip bawah *inner pipe*, T7 adalah temperatur sirip atas *inner pipe*, T8 adalah temperatur air sesudah keluar *reservoir*, dan T9 adalah temperatur air sebelum masuk ke reservoir.

Untuk mengukur debit aliran air, *water flow meter* disambungkan dengan pipa penghubung antara *double pipe* dan katup *bypass*. Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 detik dengan menggunakan *data logger*.

### 3.7 Metode Pengambilan Data

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

- a. Proses Pelelehan
  1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pompa air, *thermocouple* dan *data logger*, *water flow meter sensor*, pemanas air, tempat penampung air, alat penukar kalor, parafin, selang air, dan katup air.
  2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
  3. Memasukkan parafin ke dalam tabung akrilik dan tunggu hingga memadat dan temperatur mencapai 31 °C.
  4. Menghidupkan *data logger* dan memasang *thermocouple* seperti gambar 3.17



Gambar 3.17 Posisi termokopel pada alat penukar panas

5. Memanaskan air yang berada pada tempat penampung air panas hingga temperatur air mencapai 80°C.
6. Menghidupkan pompa air.
7. Atur debit aliran sesuai kebutuhan menggunakan katup air.

8. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat debit aliran fluida.
9. Merekam data perubahan temperatur pada data logger setiap 10 detik.
10. Membiarkan air bersiklus hingga temperatur parafin (T1 Parafin, T2 Parafin, T3 Parafin) mencapai 63 °C.
11. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam Ms. Excel.
12. Mengulangi langkah 4-11 dengan variasi laju aliran air (4 Lpm, 8 Lpm, 12 Lpm) serta jumlah dan tinggi sirip yang telah ditentukan (4,6,8 sirip)
13. Membuat kesimpulan hasil penelitian
14. Selesai

b. Proses Pembekuan

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pompa air, *thermocouple* dan *data logger*, *water flow meter sensor*, pemanas air, tempat penampung air, alat penukar kalor, parafin, selang air, dan katup air.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Memasukkan parafin ke dalam tabung akrilik dengan temperatur 70°C.
4. Menghidupkan data logger dan memasang *thermocouple*.
5. Menghidupkan pompa air.
6. Atur debit aliran sesuai kebutuhan menggunakan katup air.
7. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat debit aliran air.
8. Merekam data perubahan temperatur pada data logger setiap 30 detik.
9. Membiarkan air bersiklus hingga temperatur parafin (T1 Parafin, T2 Parafin, T3 Parafin) mencapai 31 °C.
10. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam Ms. Excel.

11. Mengulangi langkah 4-11 dengan variasi laju aliran air (4 Lpm, 8 Lpm, 12 Lpm) serta jumlah dan tinggi sirip yang telah ditentukan (4,6,8 sirip)
12. Membuat kesimpulan hasil penelitian
13. Selesai

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dalam penelitian ini, efek geometri sirip pada karakteristik sistem pelelehan dan pembekuan LHTES shell and tube sirip longitudinal dan aksial telah diperiksa dan dibandingkan dalam hal waktu pelelehan, waktu pembekuan dan laju perpindahan panas pada proses penyimpanan energi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa:

1. Penambahan 2 dan 4 buah sirip longitudinal sebesar 21% dan 42% dari total luas pipa tembaga bersirip 4 ( $66.806 \text{ mm}^3$ ) dapat mengurangi waktu leleh sebesar 21,5% dan 19,4 %, sedangkan dalam proses pembekuan dapat mengurangi waktu sebesar 4,9 % dan 6,8 %. Penambahan 3mm dan 6 mm pada tinggi sirip atau sebesar 18,6 % dan 37,27% dari total luas pipa tembaga bersirip 6 dengan tinggi 7 mm ( $69.806 \text{ mm}^3$ ) dapat mengurangi waktu leleh sebesar 8,5 % dan 11,46 % sedangkan dalam proses pembekuan sebesar 1,7 % dan 4,5 %
2. Penambahan 2 dan 6 buah sirip aksial sebesar 4,6% dan 13,7% dari total luas pipa tembaga bersirip 10 ( $36.833 \text{ mm}^3$ ) dapat mengurangi waktu leleh sebesar 6,9 % dan 16,1 %, sedangkan dalam proses pembekuan sebesar 1,3 % dan 1,8 %. Penambahan 3 mm pada tinggi sirip atau sebesar 11,13% dari total luas

pipa tembaga bersirip 12 dengan tinggi 7 mm ( $41.008 \text{ mm}^3$ ) dapat mengurangi waktu leleh sebesar 2,7 % tetapi penambahan 6 mm tinggi sirip atau sebesar 24,29% dari total luas pipa tembaga bersirip 12 dengan tinggi 7 mm ( $41.008 \text{ mm}^3$ ) justru akan menambah waktu pelelehan sebesar 2,7 % sedangkan dalam proses pembekuan dapat mengurangi waktu pembekuan sebesar 0,9 % dan 3 %.

3. Pada proses pelelehan, penambahan 2 dan 4 buah sirip longitudinal meningkatkan nilai laju perpindahan panas sebesar 26,36 % dan 34,27 % dibandingkan pipa tembaga bersirip 4 longitudinal. Sedangkan menambah tinggi sirip sebesar 3 mm dan 6 mm akan meningkatkan laju perpindahan panas sebesar 4,7 % dan 13,22 %. Pada sirip aksial penambahan 2 dan 6 buah sirip akan menambah laju perpindahan panas sebesar 6,5 % dan 17,8 % dibandingkan pipa tembaga bersirip 10 aksial. Sedangkan penambahan tinggi sirip sebesar 3mm dan 6 mm menunjukkan peningkatan sebesar 7,94 % dan 7,27 %.

4. Pada proses pembekuan penambahan 2 dan 4 buah sirip longitudinal meningkatkan nilai laju perpindahan panas sebesar 5,19 % dan 9,4 % dibandingkan pipa tembaga bersirip 4 longitudinal. Sedangkan menambah tinggi sirip sebesar 3 mm dan 6 mm akan meningkatkan laju perpindahan panas sebesar 2,5 % dan 8,8 %. Pada sirip aksial penambahan 2 dan 6 buah sirip akan menambah laju perpindahan panas sebesar 0,03 % dan 1,19 % dibandingkan pipa tembaga bersirip 10 aksial. Sedangkan penambahan tinggi sirip sebesar 3mm dan 6 mm menunjukkan peningkatan sebesar 1,45 % dan 5,09 %.

5. Peningkatan Rasio (ER) pada pipa tembaga bersirip longitudinal dengan jumlah sirip 6 buah dan tinggi sirip 7 mm dengan luas permukaan sirip sebesar 45.000 mm<sup>2</sup> dapat dianggap sebagai luas sirip optimal. Ini menunjukkan bahwa kombinasi antara tinggi dan jumlah sirip yang tepat akan meningkatkan kinerja termal sistem LHTES secara substansial.

## 5.2 Saran

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

1. Sebaiknya dilakukan pengukuran temperatur dengan titik pengukuran yang lebih banyak lagi seperti pada bagian dalam maupun luar pipa tembaga, bagian dalam maupun luar pipa akrilik, serta titik pengukuran parafin yang lebih banyak di setiap bagiannya.
2. Untuk mengukur temperatur masuk dan keluar alat penukar kalor sebaiknya digunakan lebih dari satu termokopel pada masing-masing titik pengukuran untuk mengurangi kesalahan pembacaan.
3. Pada pengaplikasiannya untuk alat penukar kalor dengan ukuran diameter yang tidak terlalu besar sebaiknya digunakan lintasan yang panjang sehingga perpindahan panas yang terjadi akan lebih maksimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akgün, M., Aydin, O., & Kaygusuz, K. (2008). Thermal energy storage performance of paraffin in a novel tube-in-shell system. *Applied Thermal Engineering*, 28(5–6), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.05.013>
- Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(February 2016), 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2014). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (5th ed.)*. McGraw-Hill Professional. McGraw-Hill Education.
- Chen, G., Sun, G., Jiang, D., & Su, Y. (2020). Experimental and numerical investigation of the latent heat thermal storage unit with PCM packing at the inner side of a tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119480. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119480>
- El, A., Feddi, K., Saadeddine, S., Ben, A., & El, M. (2020). Performance enhancement of finned annulus using surface interruptions in double-pipe heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 210(March), 112710. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112710>
- Elias, C. N., & Stathopoulos, V. N. (2019). A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia*, 161, 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.101>
- Fallahi, A., Guldentops, G., Tao, M., Granados-Focil, S., & Van Dessel, S. (2017). Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161>
- Fleischer, A. S. (2015). Thermal energy storage using phase change materials: Fundamentals and applications. In *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology* (Issue 9783319209210). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20922-7>
- Gasia, J., Miró, L., de Gracia, A., Barreneche, C., & Cabeza, L. F. (2016). Experimental evaluation of a paraffin as phase change material for thermal

energy storage in laboratory equipment and in a shell-and-tube heat exchanger. *Applied Sciences*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/app6040112>

Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 31–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>

Guelpa, E., & Verda, V. (2019). Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Applied Energy*, 252(June), 113474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113474>

Harding, K. G. (2012). Heat Transfer Introduction. *Research Gate*, December, 2–6. <https://www.researchgate.net/publication/323144799>

Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer: Tenth Edition* (L. Neyens (ed.)). McGraw-Hill Education. [www.mhhe.com](http://www.mhhe.com)

Ihsan, S., & Irawan, H. (2019). Analisis Dan Perhitungan Pengaruh Bilangan Raynolds Terhadap Kinerja Kondensor Tipe Concentric Tube Sebagai Alat Pengujian Dan Pembelajaran. *Jurnal Teknologi Proses Dan Inovasi Industri*, 3(2). <https://doi.org/10.36048/jtpii.v3i2.4225>

Ijogbemeye Oseghale, C., & Akpabio, E. J. (2012). Managing paraffin wax deposition in oil wells - Related problems in Nigerian oil fields. *Society of Petroleum Engineers - 36th Nigeria Annual Int. Conf. and Exhibition 2012, NAICE 2012 - Future of Oil and Gas: Right Balance with the Environment and Sustainable Stakeholders' Participation*, 2(July), 551–560. <https://doi.org/10.2118/163037-ms>

Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., & Lipinski, T. (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5–6, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>

Koželj, R., Mlakar, U., Zavrl, E., Stritih, U., & Stropnik, R. (2021). An experimental and numerical analysis of an improved thermal storage tank with encapsulated PCM for use in retrofitted buildings for heating. *Energy and Buildings*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111196>

Li, H., Hu, C., He, Y., Tang, D., & Wang, K. (2021). Influence of fin parameters on the melting behavior in a horizontal shell-and-tube latent heat storage unit with longitudinal fins. *Journal of Energy Storage*, 34(December 2020), 102230. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102230>

Modi, N., Wang, X., Negnevitsky, M., & Cao, F. (2021). Melting characteristics of a longitudinally finned-tube horizontal latent heat thermal energy storage

system. *Solar Energy*, 230(July), 333–344.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.043>

Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2014). Experimental investigations on latent heat storage unit using paraffin wax as phase change material. *Experimental Heat Transfer*, 27(1), 40–55. <https://doi.org/10.1080/08916152.2012.719065>

Rostami, S., Afrand, M., Shahsavari, A., Sheikholeslami, M., Kalbasi, R., Aghakhani, S., Shadloo, M. S., & Oztop, H. F. (2020). A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118698>

Seddegh, S., Wang, X., & Henderson, A. D. (2016). A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 93, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.107>

Seddegh, S., Wang, X., Henderson, A. D., & Xing, Z. (2015). Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 517–533. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.147>

Shahsavari, A., Goodarzi, A., Mohammed, H. I., Shirneshan, A., & Talebizadehsardari, P. (2020). Thermal performance evaluation of non-uniform fin array in a finned double-pipe latent heat storage system. *Energy*, 116800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116800>

Shallal, B. A., Gedik, E., Wahhab, H. A. A., & Ajel, M. G. (2023). *Impact of Alumina Nanoparticles Additives on Open-Flow Flat Collector Performance for PV Panel Thermal Control Application*. 10(02), 870–879.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>

Thulukkanam, K. (2013). Heat Exchanger Design Handbook. In *Heat Exchanger Design Handbook*. <https://doi.org/10.1201/b14877>

Verma, K., Prakash, O., Paikra, A. S., & Tiwari, P. (2023). Photovoltaic Panel Integration Using Phase Change Material (PCM): Review. *Evergreen*, 10(1), 444–453. <https://doi.org/10.5109/6782147>

Zaphar, S., Chandrashekara, M., & Verma, G. (2023). *Thermal Analysis of an Evacuated Tube Solar Collector using a One-end Stainless Steel Manifold for Air Heating Applications under Diverse Operational Conditions*. 10(02), 897–911.