

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

(SKRIPSI)

OLEH:

AGUNG FERDIAN SAGALA



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

2024

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

**OLEH:
AGUNG FERDIAN SAGALA**

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

PADA

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024n**

ABSTRAK

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

Oleh:

Agung Ferdian Sagala

Pemanas air tenaga surya (*solar water heater*) merupakan sumber energi yang bisa dimanfaatkan untuk memanaskan air dengan mengubahnya menjadi energi termal. Salah satu media penyimpan energi termal adalah phase change material (PCM), yang dapat mengalami proses *reversible*, seperti peleburan (*melting*) dan pembekuan (solidifikasi), sehingga bisa digunakan untuk menjaga suhu tetap stabil dalam jangka waktu tertentu. Energi panas ini diserap dan dilepaskan melalui alat penukar kalor tipe Shell and Tube Heat Exchanger. Penelitian ini memvariasikan sistem aliran terbuka dan tertutup, serta debit aliran air. Tujuannya adalah untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas dan waktu yang dibutuhkan parafin untuk mengalami perubahan fasa. Parameter yang diukur meliputi temperatur masuk dan keluar alat penukar kalor, temperatur parafin, dan waktu pembekuan parafin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil debit aliran air, laju perpindahan panas semakin tinggi, sehingga parafin lebih cepat mencapai titik beku. Waktu pembekuan parafin dari suhu awal 60°C hingga melewati titik beku 40°C tercatat paling cepat pada variasi aliran terbuka dengan debit 6 l/min, yaitu dalam waktu 25 menit 30 detik. Dengan demikian, alat ini terbukti efektif dalam mencapai perubahan suhu, tergantung pada variasi sistem aliran dan debit air yang digunakan..

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

ABSTRACT

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

By:

Agung Ferdian Sagala

A solar water heater is an energy source that can be utilized to heat water by converting it into thermal energy. One of the thermal energy storage mediums is phase change material (PCM), which can undergo reversible processes such as melting and solidification, allowing it to maintain a stable temperature over a certain period. This heat energy is absorbed and released through a Shell and Tube Heat Exchanger. This research varied both open and closed flow systems, as well as the water flow rate. The goal was to determine the heat transfer characteristics and the time required for paraffin to undergo phase changes. The measured parameters included the inlet and outlet temperatures of the heat exchanger, the paraffin temperature, and the paraffin freezing time. The research results showed that as the water flow rate decreases, the heat transfer rate increases, causing the paraffin to reach the freezing point more quickly. The fastest paraffin freezing time, from an initial temperature of 60°C to below the freezing point of 40°C, was recorded in the open flow variation with a flow rate of 6 l/min, taking 25 minutes and 30 seconds. Thus, this device has proven to be effective in achieving temperature changes, depending on the flow system variation and the water flow rate used..

Keywords: Water heater, PCM, Paraffin, Heat Transfer

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

Mahasiswa : Agung Ferdian Sagala

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021081

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing



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

NIP. 197112142000121001



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

NIP. 199301102019031008

MENGETAHUI

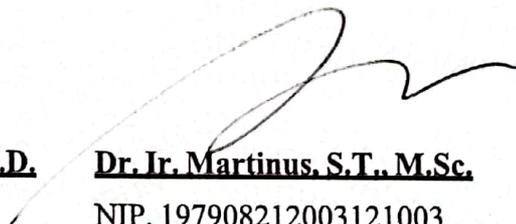
Ketua Jurusan
Teknik Mesin



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

NIP. 197108171998021003

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



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

NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **30 Juli 2024**

PERNYATAAN PENULIS

Skripsi yang berjudul "KAJIAN EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR PROSES PEMBEKUAN PCM PARAFIN PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* DENGAN POSISI VERTIKAL" merupakan hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana yang diatur dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010

Bandar Lampung, 2024
Pembuat Pernyataan



Handwritten signature of Agung Ferdian Sagala.

Agung Ferdian Sagala
NPM. 2015021081

MOTO

*“Sebab itu janganlah kamu kuatir akan hari besok,
karena hari besok mempunyai kesusahannya
sendiri. Kesusahan sehari cukuplah untuk sehari”*

(MATIUS 6:34 TB)

“Tetap Berbisik Kebumi, Agar Terdengar di Penghuni
Langit”

(Ngerek Dolot)

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

(Simone de Beauvoir)

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

(Agung Ferdian Sagala)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

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

1. Orang tua penulis, Bapak almarhum Kastro Sagala dan Ibu Ruminta Situmorang yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku Dekan 1 Fakultas Teknik Universitas Lampung dan juga sebagai Dosen Pembimbing utama yang telah membimbing serta memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir di perkuliahan.
6. Ahmad Yonanda, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.

7. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah kalian berikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
9. Keluarga besar grup TA lurr yang terdiri dari Bayu, Alfito, dan Arahman yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali di kemudian hari.
10. Keluarga besar rumah tangga yang terdiri dari Melisa Duma Sagala, Maria Belen Sagala, dan Monika Prastika Sagala yang telah membantu, menyemangati, dan memberikan dukungan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga yang sudah lulus dimudahkan untuk mendapatkan pekerjaan, dan yang masih berjuang dalam tugas akhir dilancarkan penelitiannya.
11. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2020 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 28 September 2020 menjalin kekeluargaan.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharap koreksi dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Binjai, pada tanggal 30 Juni 2002 sebagai anak terakhir, dari pasangan Bapak Almarhum Kastro Sagala dan Ibu Ruminta Situmorang. Penulis menempuh Pendidikan Dasar di SD NEGERI 027950 SATRIA DI KOTA BINJAI

hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP SWASTA SANTO THOMAS 2 BINJAI yang diselesaikan tahun 2017, dan

SMA NEGERI 1 BINJAI yang diselesaikan tahun 2020, hingga pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM). Selain aktif dalam HIMATEM, penulis pernah menjadi bagian panitia kegiatan yang ada di Jurusan Teknik Mesin, kemudian juga mengikuti Organisasi Unit Kegiatan Mahasiswa Kristen (UKMK) dari tahun 2021. Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di Bandara Adi Soemarmo Solo (Persero) dengan judul laporan **“ANALISIS EFISIENSI KERJA AIR COOLED CHILLER DI BANDARA ADI SOEMAROMO (PERSERO) SOLO”**.

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

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Perpindahan Panas.....	5
2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	6
2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi.....	7
2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi	8
2.1.4 Perpindahan Panas Radiasi	9
2.2 Alat Penukar Kalor (<i>Heat Exchanger</i>)	9
2.2.1 Aliran Searah.....	10
2.2.2 Berlawanan Arah (<i>Counter-Current</i>).....	11
2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor	12
2.4 Persamaan Dasar <i>Heat Exchanger</i>	15
2.5 Klasifikasi PCM	17
2.5.1 PCM Organik.....	17
2.5.2 PCM Anorganik	18
2.5.3 PCM <i>Eutectic</i>	18
2.6 Parafin.....	19
2.7 Sifat-sifat parafin	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Tempat Pelaksanaan	23

3.2 Waktu Pelaksanaan	23
3.3 Alat dan Bahan	24
3.4 Diagram Alir	32
3.5 Skema Pengujian	35
3.6 Penempatan Titik Pengukuran	37
3.7 Metode Pengambilan Data	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Hasil Pengambilan Data	41
4.1.1 Temperatur Air Masuk dan Keluar Alat Penukar Kalor.....	41
4.1.2 Temperatur Parafin.....	42
4.1.3 Proses Pembekuan Parafin.....	45
4.1.1 Temperatur Penampungan Air	46
4.1.2 Waktu Untuk Mencapai Titik beku	47
4.2 Hasil Perhitungan	49
4.2.1 Laju Perpindahan Panas Air.....	49
4.2.2 Bilangan Reynold	52
4.2.3 Perhitungan Energi	54
BAB 5 PENUTUP.....	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi	6
Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi	7
Gambar 2.3 Profil Temperatur Aliran Co-Curent.....	10
Gambar 2.4 Profil temperatur aliran counter-current.....	11
Gambar 2.5 Aliran double pipe heat exchanger	12
Gambar 2.6 Plate heat exchanger.....	13
Gambar 2.7 Shell and tube heat exchanger (one shell pass and four tube passes)	14
Gambar 2.8 Shell and tube heat exchanger (two shell passes and four tube passes)	14
Gambar 2.9 Shell and tube heat exchanger.....	15
Gambar 2.10 Klasifikasi pcm.....	17
Gambar 2.11 (a) Parafin padat (b) Parafin cair	19
Gambar 3.1 Penampung air.....	25
Gambar 3.2 Data logger dan thermocouple	25
Gambar 3.3 Pompa air.....	26
Gambar 3.4 Water flow meter	27
Gambar 3.5 Selang pipa air panas.....	28
Gambar 3.6 Katup air	29
Gambar 3.7 Alumunium foil	29
Gambar 3.8 Alat Penukar kalor shell and tube.....	30
Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan shell and tube.....	32
Gambar 4.1 Grafik perbandingan nilai rata-rata temperatur air masuk dan keluar alat penukar kalor.....	41
Gambar 4.2 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin variasi aliran terbuka.....	43
Gambar 4.3 Grafik perbandingan temperatur rata-rata parafin.....	44
Gambar 4.4 (a) Pembekuan awal parafin (b) Pembekuan tengah parafin (c) Pembekuan akhir parafin.....	45
Gambar 4.5 Grafik perbandinngan temperatur air penampungan.....	46

Gambar 4.6 Grafik perbandingan waktu parafin membeku.....	48
Gambar 4.7 Grafik perbandingan laju perpindahan panas air.....	51
Gambar 4.8 Perbandingan energi air dan parafin pada variasi aliran	56
Gambar 4.9 Perbandingan energi air dan parafin pada variasi aliran tertutup.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Data Logger	26
Tabel 3.2 Spesifikasi Thermocouple	26
Tabel 3.3 Spesifikasi Pompa Air	27
Tabel 3.4 Spesifikasi Water Flow Meter	27
Tabel 3.5 Ukuran Alat Penukar Kalor	30
Tabel 4.1 Data Laju Perpindahan Panas	50
Tabel 4.2 Perhitungan Bilangan Reynolds	53
Tabel 4.3 Energi yang Diserap Air	54
Tabel 4.4 Energi yang dilepas parafin	55

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanas air tenaga surya adalah sebagai sistem perpindahan panas yang menghasilkan energi panas dengan memanfaatkan radiasi sinar matahari sebagai sumber energi utama. Ketika cahaya matahari menimpa alat pada pemanas air tenaga surya, sebagian cahaya akan dipantulkan kembali ke lingkungan, sedangkan sebagian besarnya akan diserap dan dikonversi menjadi energi panas, lalu panas tersebut dipindahkan kepada fluida yang bersirkulasi di dalam pipa pemanas air. Dalam hal ini solar water heater menggunakan pemanas listrik padatan, untuk menjaga temperatur air agar tetap konstan ketika sistem tidak cukup menerima energi matahari, dan menyebabkan biaya operasional yang cukup besar. (Gesi, 2021)

Penggunaan Pemanas Air Tenaga Surya/Solar Water Heater di dunia saat ini berkembang sangat pesat. Potensi energi panas matahari di Indonesia sekitar 4,8 KWh/m² atau setara dengan 112 ribu (GWp). Namun saat ini energi matahari yang sudah relative masih sangat rendah yaitu 147 MW atau 0,05% dari total potensi 208 GW. Potensi energi surya yang besar ini sedang diupayakan pemanfaatannya secara masif agar dapat memberikan kontribusi yang cukup signifikan dalam mencapai target EBT.

Menurut Robert (2007), *shell and tube heat exchanger* Shell and tube heat exchanger merupakan salah satu jenis heat exchanger yang biasa digunakan dalam berbagai proses industri untuk mentransfer panas antara dua fluida. Mereka terdiri dari cangkang (atau bejana luar) dan serangkaian tabung (atau lembaran tabung) yang ditempatkan di dalam cangkang. Kedua fluida

tersebut, yang dikenal sebagai fluida panas dan fluida dingin, mengalir dalam saluran terpisah satu di dalam tabung dan satu lagi di luar tabung di dalam selubung. Hal ini pada koefisien perpindahan panas dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi geometri unit, properti aliran, dan nilai heat loss yang timbul. Perhitungan koefisien perpindahan panas pada sisi shell membutuhkan analisis yang lebih rumit jika dibandingkan dengan sisi analisis pada sisi tube dikarenakan karakteristik aliran dalam shell yang kompleks dengan banyak faktor yang berpengaruh (Yuliani, 2016).

Parafin dapat berubah 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.

Hal inilah yang melatar belakangi kegiatan penelitian ini yang berjudul Kajian Proses Perpindahan Kalor *Shell and Tube Heat Exchanger* Berisi PCM Parafin Dengan Penambahan Sirip Tembaga Pada Proses Pembekuan. Dalam penelitian ini digunakan PCM jenis parafin sebagai penyimpan

energi termal dimana memiliki sifat-sifat yang baik dan sangat memungkinkan jika dikembangkan lebih lanjut.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik perpindahan panas dari air ke parafin dalam proses pembekuan dalam variasi temperatur masuk dan laju pada aliran air.
2. Mengetahui durasi waktu yang diperlukan untuk proses pembekuan parafin untuk menghasilkan perpindahan panas.

1.3 Batasan Masalah

Dalam proses penelitian ini dilakukan pembatasan masalah untuk memudahkan pengambilan data. Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat penukar kalor yang digunakan berjenis *shell and tube* berdiameter 4 inch (101 mm), panjang *shell* 520 mm dan panjang *tube* 530 mm.
2. Jenis material pipa luar (*shell*) alat penukar panas yang digunakan adalah pipa akrilik dengan ukuran 4 inch dan ketebalan 5 mm.
3. Jenis material pipa dalam (*tube*) alat penukar panas yang digunakan adalah pipa tembaga berdiameter 3/8 inch (9,5 mm) sebanyak 19 buah.
4. Jenis PCM yang diuji adalah parafin padat atau lilin parafin.
5. Variasi kecepatan aliran air yang digunakan sebesar 2 l/min, dan 6 l/min.
6. Variasi sistem aliran terbuka dan tertutup.
7. Temperatur fluida air yang digunakan yaitu *ambient*.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian, tujuan dari penelitian, batasan masalah yang diberikan dan sistematika penulisan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan landasan dari teori mengenai hal-hal yang berhubungan dengan penelitian seperti perpindahan panas, material berubah fasa (PCM), parafin, alat penukar kalor dan lainnya.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi hal-hal yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian, bahan penelitian, peralatan dan prosedur pengujian.

4. HASIL DAN PEMBAHA

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

5. PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

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

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

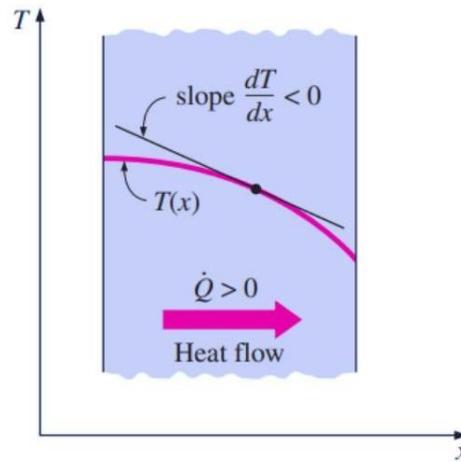
2.1 Perpindahan Panas

Panas merupakan salah satu bentuk energi yang dapat dipindahkan dari suatu tempat ke tempat lain, tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan sama sekali. Pada suatu proses, panas dapat mengakibatkan terjadinya kenaikan suhu suatu zat atau perubahan tekanan, reaksi kimia dan kelistrikan. Proses terjadinya perpindahan panas dapat dilakukan secara langsung, yaitu fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin tanpa adanya pemisah dan untuk secara tidak langsung, yaitu jika diantara fluida panas dan fluida dingin tidak berhubungan langsung tetapi dipisahkan oleh sekat-sekat pemisah. Perbedaan temperatur merupakan potensi utama terjadinya perpindahan energi dalam bentuk panas yang sering atau lebih populer disingkat dengan perpindahan panas. Dari studi pustaka diperoleh bahwa ada 3 (tiga) cara perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Selain ketiga cara itu ada pula cara perpindahan panas gabungan (Supriyadi, 1987).

Dalam praktek terlalu sulit untuk membuktikan bahwa perpindahan panas hanya berlangsung dengan satu cara yang tersebut diatas. Perpindahan panas akan berlangsung bersamaan, sebagai contoh misalnya perpindahan panas pada pipa steam yang terisolasi, maka perpindahan panas tersebut akan berlangsung baik dari dinding dalam pipa ke permukaan isolasi maupun dari permukaan luar isolasi ke udara sekitarnya, dimana perpindahan panas berlangsung secara konduksi, konveksi dan radiasi.

2.1.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas melibatkan aliran panas dari suatu tempat dengan suhutinggi ke tempat dengan suhu rendah, dengan menggunakan mediumpenghantar panas yang tetap (tanpa gerakan dari penghantar panas). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas melalui konduksiterjadi melalui benda padat.



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

Perpindahan panas secara konduksi dasar Hukum Fourier dapat dinyatakan dengan persamaan: (Cengel & A, 2003)

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

Dimana:

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

A = Luas penampang yang tegak lurus dengan arah laju perpindahan kalor (m^2)

k = Konduktivitas thermal ($Wm^2/^\circ C$)

T = Temperatur (K)

X = Tebal (m)

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

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

Dimana:

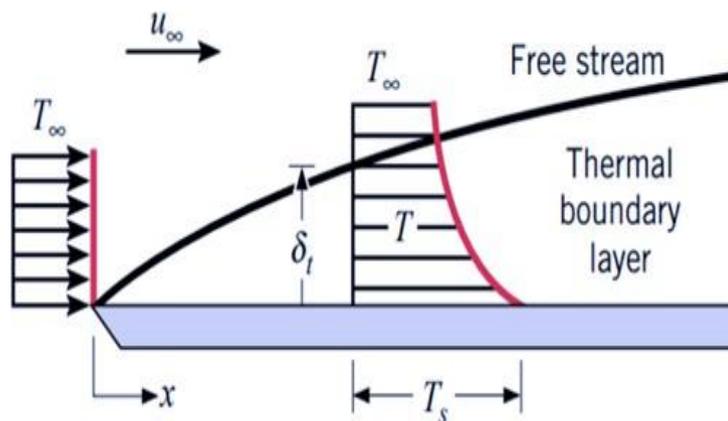
A_r = Luas permukaan silinder (cm^2)

r = Jari-jari silinder (cm)

l = Panjang silinder (cm)

2.1.2 Perpindahan Panas Konveksi

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



Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi

(Incropera, 2007)

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

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

Dimana:

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

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².K)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m²)

T_s = temperatur permukaan padat (°C)

T_∞ = Temperatur fluida yang jauh dari permukaan benda padat (°C)

2.1.3 Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan Koestoer (2002) menjelaskan bahwa radiasi adalah proses perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik atau paket energi (foton), yang dapat mencapai laju perpindahan panas. Banyak faktor memengaruhi laju perpindahan energi, termasuk suhu permukaan yang memancarkan dan menerima radiasi, emisivitas, refleksi, penyerapan dan transmisi permukaan yang diterangi, dan faktor sudut pandang antara permukaan pemancar dan penerima (Wahyono, 2019). Perpindahan panas radiasi merupakan proses dimana panas mengalir dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah bila benda itu terpisah di dalam ruang. Radiasi termal merupakan energi yang dipancarkan oleh materi yang berada pada temperatur nol, dan faktanya perpindahan panas radiasi terjadi dengan sangat efisien dalam ruang hampa (Incropera, 2011).

Panas radiasi dipancarkan oleh suatu benda dalam bentuk kumpulan (*batch*) energi yang terbatas atau quanta. Contoh perpindahan panas radiasi terjadi pada panas matahari yang sampai permukaan bumi.

Dengan rumus perpindahan panas secara radiasi adalah sebagai berikut:

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

Dimana:

\dot{Q}_{rad} = Laju perpindahan panas radiasi (W)

ε = Koefisien Emisivitas ($0 < \varepsilon < 1$)

σ = Konstanta Stefan-Bolzman $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²·K⁴)

A = Luas permukaan (m²)

T = Suhu permukaan benda (°K)

2.1.4 Perpindahan Panas Radiasi

Perubahan wujud zat disebut juga perubahan fisika. Perubahan fisika ini terkandung dalam perubahan sementara sifat-sifat suatu benda, karena perubahan wujud benda dapat dikembalikan ke bentuk semula tanpa menimbulkan materi baru. Variasi bentuk suatu benda dapat dibagi menjadi beberapa kategori, tergantung dari bentuk benda itu sendiri. Salah satu perubahan wujud zat adalah membeku.

Membeku (disebut pembekuan) adalah proses yang menyebabkan perubahan fasa suatu zat dari cair menjadi padat. Ketika suatu zat menjadi padat, energi internal padatan menurun hingga suhu tertentu (disebut titik beku). Setiap benda memiliki titik beku yang berbeda. Jadi beberapa benda dapat membeku dengan mudah dan beberapa tidak. Contohnya adalah parafin, jika didinginkan sampai titik beku sekitar 48°C maka akan menjadi padat.

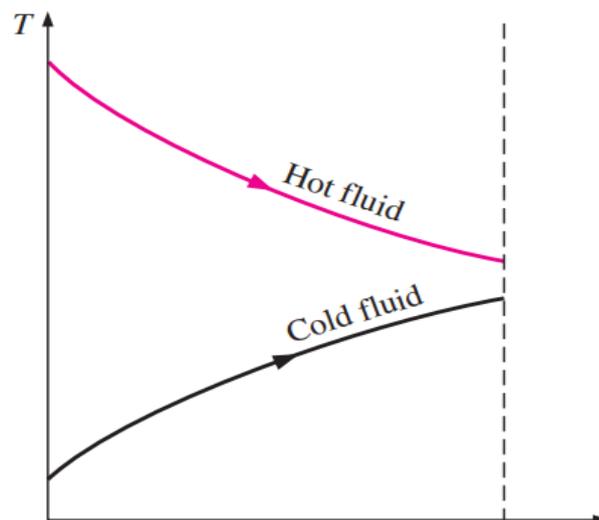
2.2 Alat Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

Alat penukar panas, juga dikenal sebagai *heat exchangers*, adalah alat yang memungkinkan panas mengalir antara dua fluida dengan suhu yang berbeda tanpa membuat keduanya bercampur. Alat ini biasanya digunakan

untuk menurunkan atau meningkatkan temperatur sebuah sistem dengan memanfaatkan suatu media pendingin atau pemanas sehingga kalor dapat berpindah dari temperatur yang tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Dalam alat penukar panas, proses perpindahan panas terdiri dari konveksi dalam fluida masing-masing dan konduksi di dinding yang memisahkan keduanya. Terdapat dua aliran penukaran panas yaitu dengan aliran searah (*co-current*) dan penukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter-current*) (Cengel, 2003).

2.2.1 Aliran Searah

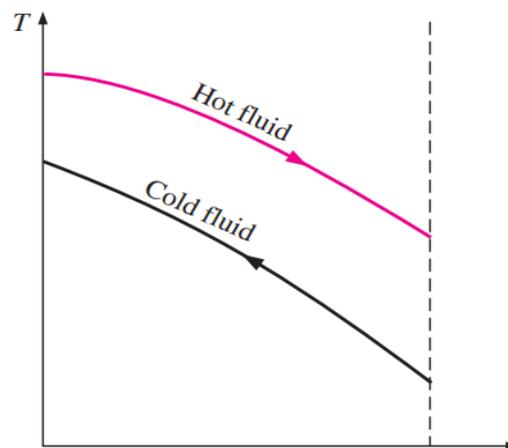
Dalam penukaran panas dengan aliran searah, dua fluida (dingin dan panas) memasuki sisi penukar panas yang sama, mengalir dalam arah yang sama, dan akhirnya keluar dari sisi yang sama. Suhu fluida dingin yang keluar dari perangkat tidak dapat melebihi suhu fluida panas yang juga keluar dari perangkat. Akibatnya, seringkali diperlukan media pemanas atau pendingin tambahan yang cukup banyak. Profil suhu aliran *co-current* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Profil Temperatur Aliran *Co-Curent*
(Cengel, 2003)

2.2.2 Berlawanan Arah (*Counter-Current*)

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



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

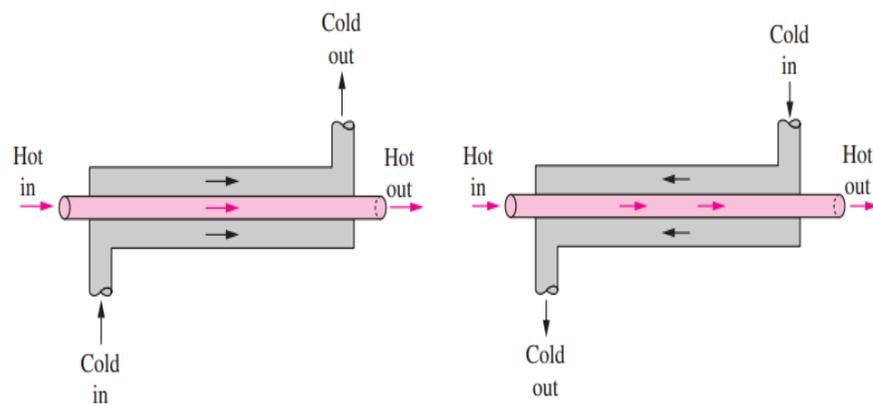
Alat penyukat kalor juga dikategorikan berdasarkan proses transfernya, yaitu alat penyukat kalor langsung dan tidak langsung. Alat penyukat kalor langsung terjadi ketika fluida panas bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam bejana atau ruang tertentu. Sedangkan alat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

2.3 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor

Jenis-jenis *heat exchanger* dapat dibedakan atas:

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

Double pipe heat exchanger merupakan perangkat penukar panas yang melibatkan aliran fluida dalam suatu pipa yang mengalir dari satu titik sisi ke sisi lainnya, dengan ruang dalam bentuk 'U' yang membentang di sepanjang interior pipa. Aliran cairan dapat berupa searah atau berlawananarah, dan desain alat ini memungkinkan perpindahan panas yang efisien. Konstruksi *double* panjang yang dihubungkan satu sama lain, membentuk pola 'U'. Kelebihannya, alat pemanas ini sangat sesuai untuk mengatasi aliran dengan laju aliran yang rendah.

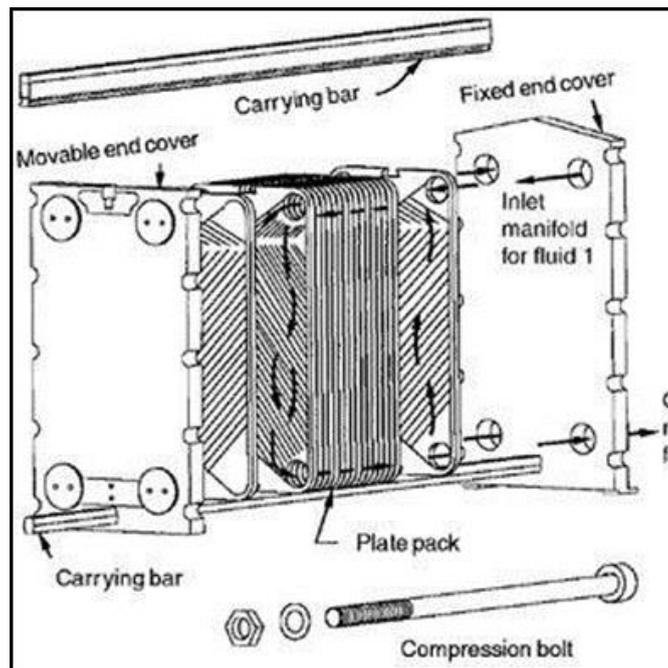


Gambar 2.5 Aliran *double pipe heat exchanger*

(Cengel, 2003)

2. Tipe *plate and frame*

Penukar panas jenis *plate* yaitu alat yang digunakan untuk mempertukarkan panas secara kontinu dari suatu medium ke medium lainnya dengan membawa energi panas. Secara umum ada 2 tipe penukar panas, yaitu:

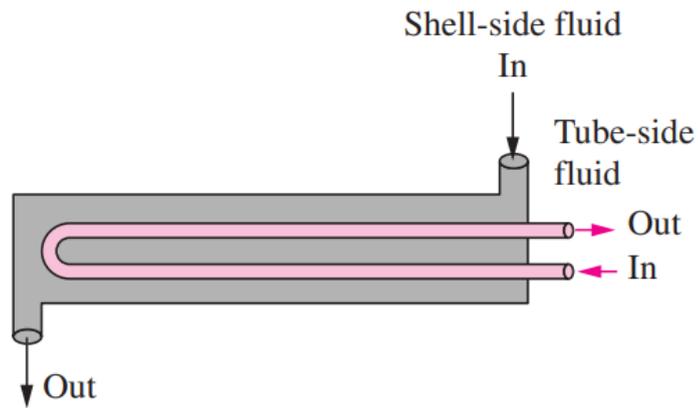


Gambar 2.6 *Plate heat exchanger*

(Sumber: Subasgar Kumareswaran, 2002)

3. Tipe tabung dan pipa (*Shell and Tube Heat Exchanger*)

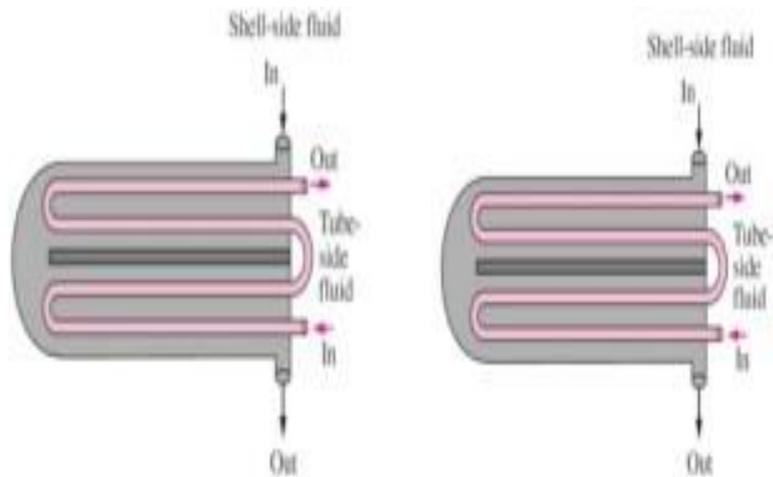
Shell and Tube heat exchanger adalah tipe penukar kalor yang terdiri dari suatu tabung (*Shell*) yang diisi dengan susunan pipa (*Tube*). Dalam strukturalat penukar kalor ini, fluida panas mengalir di dalam pipa, sementara fluida dingin mengalir di luar pipa, entah itu di dalam shell atau sebaliknya. Karena kedua aliran fluida hanya melewati penukar kalor sekali, desain ini dikenal sebagai penukar kalor satu lintas (*single-pass*). Apabila arah aliran kedua fluida sejalan, maka tipe penukar kalor ini disebut aliran searah (*parallel flow*). Sebaliknya, jika kedua fluida mengalir berlawanan arah, maka penukar kalor ini diklasifikasikan sebagai aliran berlawanan. Penukar kalor *Shell and Tube* memiliki beragam variasi, dan penamaannya mencerminkan konfigurasi pipa dan tabung.



Gambar 2.7 *Shell and tube heat exchanger (one shell pass and four tube passes)*

(Sumber: Cengel & A, 2002)

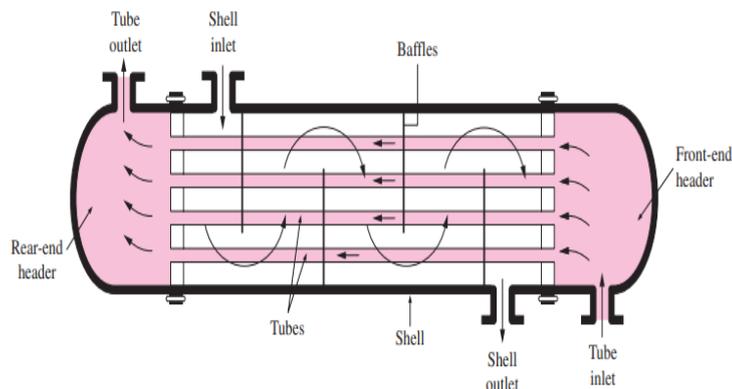
Dalam penukar kalor kita mengenal koefisien perpindahan panas total atau biasa dituliskan dengan U dan ini identik dengan koefisien perpindahan panas konveksi h dimana sama-sama memiliki satuan $W/m^2 \cdot ^\circ C$.



Gambar 2.8 *Shell and tube heat exchanger (two shell passes and four tube passes)*

(Sumber: Cengel & A, 2002)

Penukar kalor *Shell and Tube* umumnya digunakan dalam situasi tekanan yang relatif tinggi, dengan struktur terdiri dari suatu tabung yang berisi annulus dengan susunan tertentu di dalamnya, bertujuan untuk mencapai luas permukaan optimal. Fluida mengalir baik di dalam tabung maupun di dalam annulus, sehingga terjadi perpindahan panas antara fluida dan dinding annulus, dengan contoh pola seperti triangular pitch (pola segitiga) atau square pitch (pola segiempat).



Gambar 2.9 *Shell and tube heat exchanger*

(Sumber: Cengel & A, 2002)

2.4 Persamaan Dasar *Heat Exchanger*

2.4.1 Panas yang Diserap

Kenyataannya pada penelitian ini yang menjadi sasaran analisis ialah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika (Holman, 1995). Pada penukar panas, transfer panas atau mengalir dari air panas sirkuit ke sirkuit air dingin. tingkat perpindahan panas adalah fungsi dari tingkat cairan massa aliran, perubahan suhu dan kapasitas panas spesifik dari cairan (pada suhu rata-rata).

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

Dimana:

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

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

c_p = Panas spesifik (J/kg.°C)

ΔT = Perbedaan temperatur (°C)

Kita juga dapat mengetahui kinerja perpindahan panas yang terjadi ini dengan cara menghitung panas masuk dan kapasitas penyimpanan panas dari fluida lainnya, dalam hal ini yaitu parafin. Persamaannya yaitu sebagai berikut:

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

Dimana:

E_{air} = Energi air (Joule)

t = Waktu perpindahan panas (s)

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

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

Dimana:

ρ = Massa jenis (kg/m³)

m = Massa benda (kg)

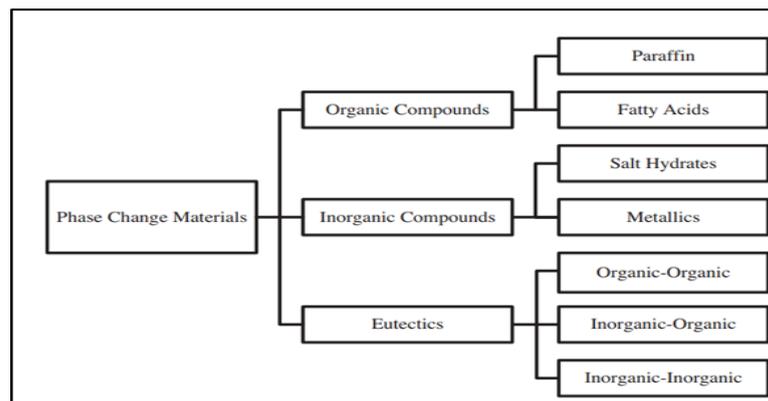
v = Volume benda (m³)

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

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = \dot{m}_H . c_{pH} . \Delta T_H = \dot{m}_C . c_{pC} . \Delta T_C \quad (2.8)$$

2.5 Klasifikasi PCM

PCM biasanya termasuk dalam dua kelompok besar yaitu organik dan anorganik. Pengelompokan ini didasarkan pada panas peleburan laten dan titik leleh. Namun, karena tidak ada satu bahan yang dapat memenuhi semua sifat yang diinginkan, PCM adalah kombinasi dari dua kelompok bahan (Sharma dkk., 2009). PCM dapat dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan kondisi perubahan fasanya: padat-cair, cair-gas, dan padat-gas. PCM padat-cair biasanya digunakan untuk penyimpanan energi panas dan terdiri dari tiga komponen yaitu komposisi organik, komposisi anorganik, dan eutektik. Adapun klasifikasi PCM organik, senyawa inorganik dan eutectic dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Klasifikasi pcm

(Zhou dkk., 2012)

2.5.1 PCM Organik

Sebagian besar PCM organik mudah terbakar di alam. PCM organik dapat berupa alifatik atau jenis organik lainnya, biasanya memiliki rentang suhu rendah, mahal, dan memiliki panas laten rata-rata per satuan volume yang rendah. Material berubah fasa organik terdiri dari parafin dan nonparafin. Bahan organik termasuk bahan yang dapat melebur dan membeku berulang kali tanpa kehilangan volumenya dan biasanya tidak korosif. Lilin parafin terdiri dari campuran dengan rumus kimia $\text{CH}_3 - 14 (\text{CH}_2) - \text{CH}_3$.

Parafin memenuhi syarat sebagai panas bahan penyimpanan fusi karena ketersediaan mereka dalam berbagai suhu yang besar. Tidak seperti parafin organik, yang memiliki sifat yang sangat mirip, parafin non organik adalah yang paling banyak dari bahan fase perubahan yang memiliki sifat yang sangat bervariasi. Ini merupakan kategori bahan potensial terbesar untuk penyimpanan fase perubahan (Kusumah dkk. 2020).

2.5.2 PCM Anorganik

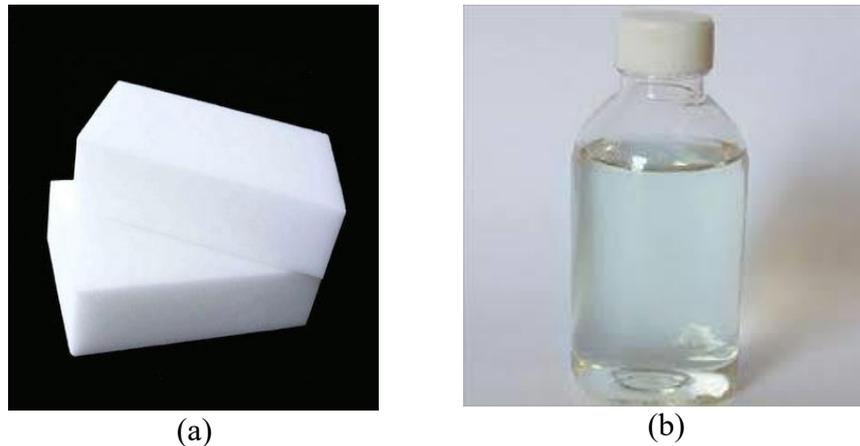
PCM anorganik biasanya terdiri dari garam alami laut, endapan mineral, atau produk sampingan dari proses lainnya. Kategori ini mencakup garam hidrat dan *metallic* (Kusumah dkk., 2020). Keunggulan PCM anorganik termasuk panas laten volumetric tinggi, konduktivitas termal lebih tinggi, fusi termal yang sangat baik, harga yang lebih rendah, ketersediaan yang melimpah, dan tidak mudah terbakar. Kekurangan PCM anorganik adalah pendinginan super yang sangat tinggi dan sifat korosifnya (Irsyad, 2018).

2.5.3 PCM Eutectic

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

2.6 Parafin

Parafin, sebagai contoh PCMs organik, adalah bagian dari kelompok hidrokarbon alkana dengan rumus C_nH_{2n+2} . Parafin diperoleh melalui proses destilasi minyak bumi, di mana hasil destilasinya masih mengandung sejumlah besar hidrokarbon. Parafin memiliki beragam kandungan atom C, dan semakin tinggi kandungan atom C, rantai karbonnya akan semakin panjang, mengakibatkan fasaparafin menjadi lebih padat. Parafin dengan kandungan atom C5-C15 memiliki fasa cair, sementara parafin dengan kandungan atom karbon lebih dari C15 memiliki fasa padat, yang sering disebut sebagai parafin wax, seperti yang terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 (a) Parafin padat (b) Parafin cair

Parafin dalam bentuk padat memiliki rentang temperatur leleh antara 53-59 °C dan menunjukkan panas laten yang cukup tinggi sekitar 160 kJ/kg, sehingga sering dimanfaatkan sebagai penyimpan energi termal. Kemampuan ini terkait dengan kemudahan parafin dalam menyerap, menyimpan, dan melepaskan energitermal, yang ditandai dengan perubahan fasa dari keadaan padat menjadi cair atausebaliknya (Gasia dkk, 2016).

Memanfaatkan parafin sebagai media penyimpan energi termal melibatkan evaluasi kelebihan dan kekurangan. Kelebihan yang dimiliki parafin

memberikan keuntungan bagi pengguna, sementara kekurangan yang dimilikinya merupakan tantangan yang harus diatasi dalam aplikasi sebagai penyimpan energi termal. Hal ini dikarenakan parafin memiliki banyak keunggulan dibandingkan material perubah fasa yang lainnya (Irsyad, 2018). Energi yang disimpan oleh parafin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_{par} = m(\text{liquid}) \times C_p(\text{liquid}) \times (T_m - T_f) + m_{par}(\text{Total}) \times L + m(\text{solid}) \times C_p(\text{solid}) \times (T_i - T_m) \quad (2.9)$$

Dimana:

E_{par} = Energi Parafin (Joule)

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

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

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

L = Kalor Peleburan (kJ/kg)

Kelebihan dari penggunaan parafin sebagai penyimpan energi termal melibatkan beberapa aspek positif. Pertama, parafin tidak menunjukkan adanya perubahan dalam sifat thermal properties-nya setelah digunakan secara terus menerus. Selanjutnya, parafin memiliki tingkat panas laten yang tinggi, memungkinkan untuk menyerap dan melepaskan energi termal secara efisien. Parafin cenderung tidak mengalami proses supercooling, yang merupakan keunggulan tambahan dalam penggunaannya. Kelebihan lainnya adalah sifat non-reaktif, tidak berbau, serta tidak menimbulkan bahaya ekologis maupun efek toksik, menjadikannya aman dan ramah lingkungan. Parafin juga cocok untuk disimpan dalam kontainer logam, dan dapat diaplikasikan sebagai penyimpan energi termal untuk berbagai tipe aplikasi. Keberagaman kelebihan ini membuat parafin menjadi pilihan yang menarik sebagai media penyimpan energi termal (Sarier dkk, 2012).

Kelemahan dari penggunaan parafin sebagai media penyimpan energi termal mencakup konduktivitas termal yang rendah ketika berada dalam

keadaan fasa padat, yang dapat menjadi kendala dalam aplikasinya. Namun, tantangan ini dapat diatasi dengan mengadopsi strategi seperti menambahkan sirip pada permukaan perpindahan panas atau mencampurkan material logam ke dalam parafin, tindakan yang dapat meningkatkan konduktivitas termal. Selain itu, sifat mudah terbakar dari parafin menimbulkan keprihatinan tambahan dalam perancangan kontainer sebagai penyimpan parafin (Sharma dkk, 2005).

2.7 Sifat-sifat parafin

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

1. Massa Jenis

Massa jenis parafin adalah 880 kg/m^3 pada 20°C . Kepadatan parafin dapat meningkat pada temperatur rendah. Peningkatan densitas ini disebabkan oleh penyusutan parafin, atau peningkatan kerapatan massa sehingga volume pada parafin berkurang. Parafin juga dapat mengalami penurunan massa jenis ketika temperatur tinggi, hal ini dikarenakan parafin memuai pada temperatur tinggi sehingga membuat volume parafin menjadi meningkat (Inouye, 1934). Oleh karena itu, penggunaan parafin sebagai suatu penyimpanan energi termal harus diperhatikan, terutama dalam mengenai volume parafin yang mengambang.

2. Panas Spesifik

Panas spesifik dalam parafin pada suatu fasa padat yaitu 2 kJ/kg.K sedangkan pada fasa cair memiliki panas spesifik yaitu $2,2 \text{ kJ/kg.K}$ (Data sheet RT50, 2020). Saat parafin digunakan sebagai penyimpanan energi termal maka jumlah panas yang dapat diserap cukup besar sesuai

dengan jumlah massa parafin yang digunakan. Namun waktu yang dibutuhkan untuk melepaskan panas menjadi lebih lama, hal tersebut dikarenakan saat panas spesifik pada fasa cair lebih besar dari pada fasa padat.

3. Konduktivitas termal

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

4. Panas Laten

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

5. Temperatur leleh

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

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian yang mengkaji karakteristik perpindahan kalor pada material berubah fasa berupa parafin di dalam alat penukar kalor sebagai media untuk menyimpan dan memberikan kalor. Bahan baku PCM yang digunakan pada penelitian ini yaitu parafin. Hal ini disebabkan parafin memiliki harga yang ekonomis dan ketersediaannya yang melimpah di Indonesia serta memiliki karakteristik yang baik sebagai *thermal energy storage*. Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini yaitu alat penukar kalor dengan tipe *shell and tube heat exchanger* dimana pada penelitian ini alat penukar kalor diposisikan pada horizontal. Penelitian ini merupakan penelitian yang dilakukan secara experimental, sehingga membutuhkan waktu dan tempat untuk melakukan pengujiannya. Adapun waktu dan tempat serta hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

3.1 Tempat Pelaksanaan

Pengambilan data Penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2 Waktu Pelaksanaan

Adapun waktu pelaksanaannya dilakukan dari bulan Oktober 2023 sampai dengan bulan Februari 2023. Adapun deskripsi penelitian dapat dilihat pada uraian berikut:

1. Studi Literatur

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

2. Persiapan Alat

Mempersiapkan alat pengujian dan bahan yang dibutuhkan seperti alat penukar panas, penyimpanan air, parafin dan lain sebagainya yang akan dijelaskan lebih rinci pada bagian alat dan bahan.

3. Pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan tata peletakan posisi alat penukar kalor *shell and tube* dalam horizontal berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan.

4. Penulisan Laporan

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

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

a. Penampungan Air

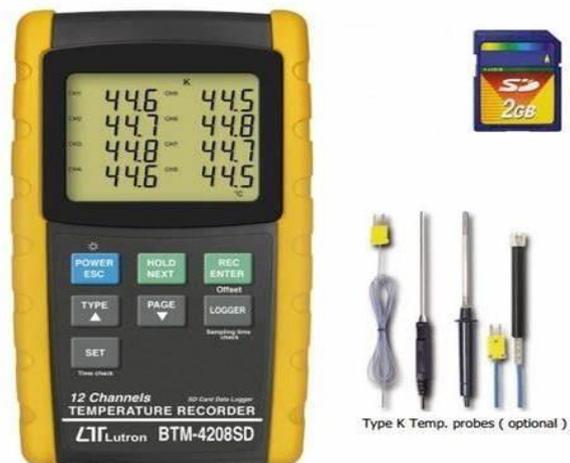
Penampungan air merupakan wadah untuk menampung kebutuhan air dari keran sebelum air disalurkan melalui pipa-pipa dalam proses pembekuan parafin. Penampung air ini dapat menampung air sebanyak 85 liter air. Penampungan air yang digunakan dapat dilihat seperti pada gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Penampung air

b. *Data Logger dan Thermocouple*

Data Logger dan *Thermocouple* berfungsi dalam mengambil pengukuran temperatur pada parafin, temperatur fluida yang masuk dan keluar dari alat penukar panas, serta juga temperatur fluida yang masuk dan keluar dari tabung penyimpanan air. Fluktuasi suhu ini akan dicatat oleh data *logger* dan dapat diarsipkan dalam *SD card*.



Gambar 3.2 *Data logger dan thermocouple*

Tabel 3.1 Spesifikasi Data *Logger*

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

Tabel 3.2 Spesifikasi *Thermocouple*

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

c. Pompa Air

Pompa air ini berfungsi untuk mensirkulasi air untuk masuk dan keluar dari alat penukar kalor hingga perpindahan panas maksimal terjadi. Pompa air yang dipakai adalah pompa air akuarium, yaitu seperti pada gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Pompa air

Tabel 3.3 Spesifikasi Pompa Air

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

d. *Water Flow Meter*

Water flow meter berfungsi mengukur debit fluida yang mengalir dari keluaran pompa ke alat penukar kalor, sehingga besar laju aliran massa fluida dapat diketahui. *Water flow meter* yang dipakai dalam penelitian ini yaitu seperti pada gambar 3.4 berikut:

Gambar 3.4 *Water flow meter*Tabel 3.4 Spesifikasi *Water Flow Meter*

Merk	ZJ-LCD-M
Satuan	LPM (liter per menit)
Rentang Tegangan Operasi	DC 24V/1A
Rentang Kuantitatif	1-9999 LPM

e. Selang Pipa Air Panas

Pada penelitian ini, digunakan selang pipa air panas yang dirancang khusus untuk mengalirkan fluida panas dalam rangka dengan menghubungkan aliran fluida seperti yang tertera dalam skema pengujian. Jenis selang pipa air panas yang digunakan yaitu pipa westpex R dengan diameter 16 mm setara dengan 5/8 inch, dan mampu menahan suhu hingga 110° C. Dengan karakteristik ini, selang westpex untuk pipa air panas menjadi pilihan yang baik dan efektif dalam mengatasi kebutuhan aliran fluida panas pada berbagai sistem perpipaan seperti yang terlihat pada gambar 3.5 berikut:



Gambar 3.5 Selang pipa air panas

f. Katup Air

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



Gambar 3.6 Katup air

g. Isolator

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



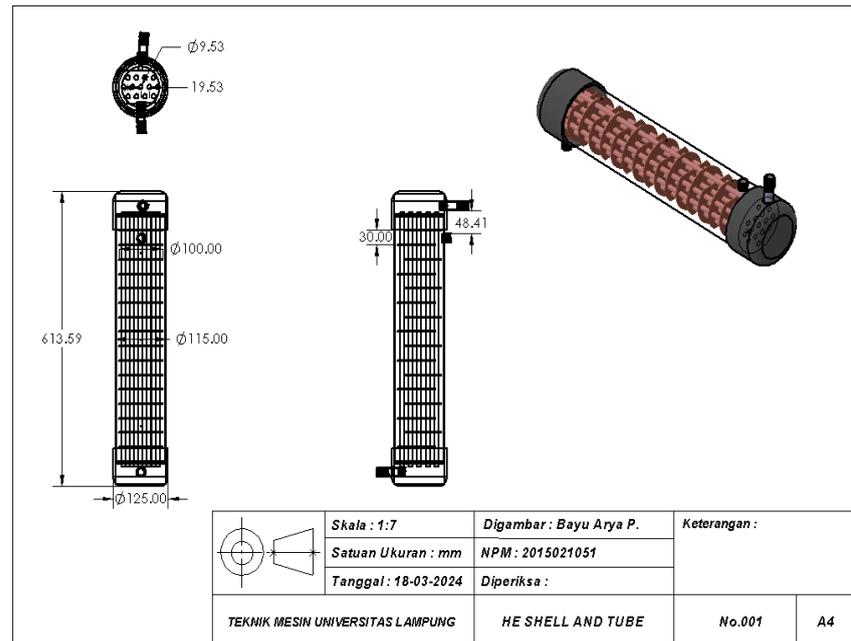
Gambar 3.7 Aluminium foil

h. Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor yang digunakan dalam penelitian ini yaitu penukar kalor tipe *shell and tube*, dimana parafin terletak di bagian luar pipa sedangkan air mengalir di bagian dalam pipa. Bagian dalam pipa menggunakan bahan tembaga sebanyak 19 buah dengan diameter masing-masing $3/8$ inch dan pada bagian luar

menggunakan pipa akrilik dengan diameter 4 inch. Panjang keseluruhan dari alat penukar kalor ini yaitu 61 cm.

Pada penelitian ini dilakukan variasi kecepatan aliran air, juga digunakan tambahan sirip pada sisi luar pipa dalam *shell and tube* dan dilakukannya percobaan dengan posisi alat penukar kalor horizontal seperti yang terlihat pada gambar 3.8 berikut:



Gambar 3.8 Alat Penukar kalor *shell and tube*

Detail dari variasi dan desain alat penukar kalor pada gambar 3.7 diatas dapat dilihat pada table 3.6 berikut ini.

Tabel 3.5 Ukuran Alat Penukar Kalor

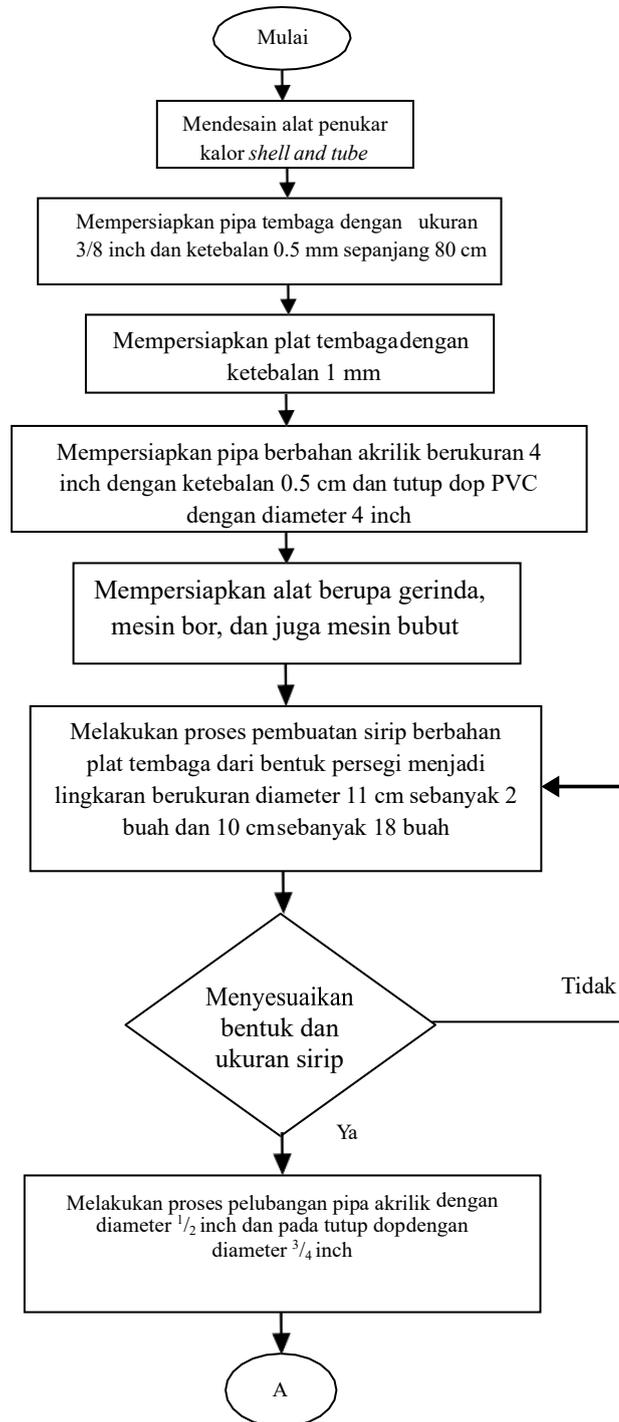
Nama	Keterangan
Pipa Tembaga	Ukuran: 3/8" Panjang: 530 mm Diameter dalam: 9,5 mm Diameter luar: 10,5 mm

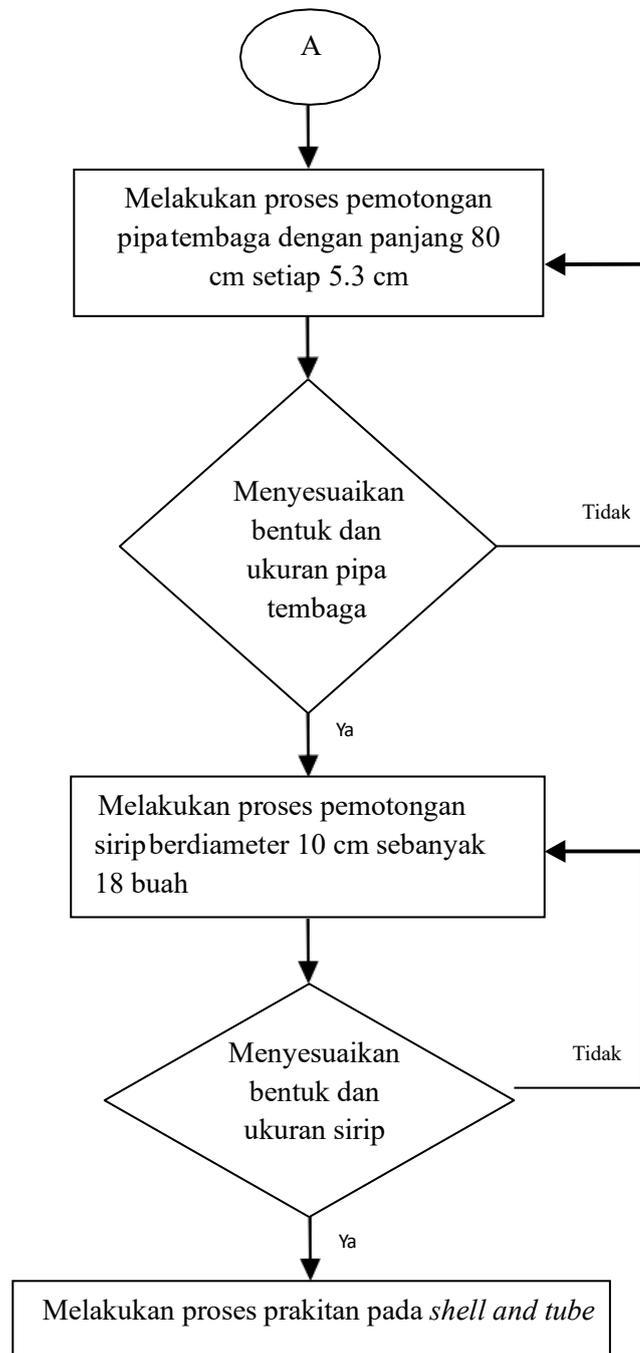
Pipa Akrilik	Ukuran: 4" Panjang: 520 mm Diameter dalam: 110 mm Diameter luar: 115 mm
Sirip	Diameter luar: 100 mm Jarak antar sirip: 30 mm Jumlah sirip: 18 buah

2. Bahan

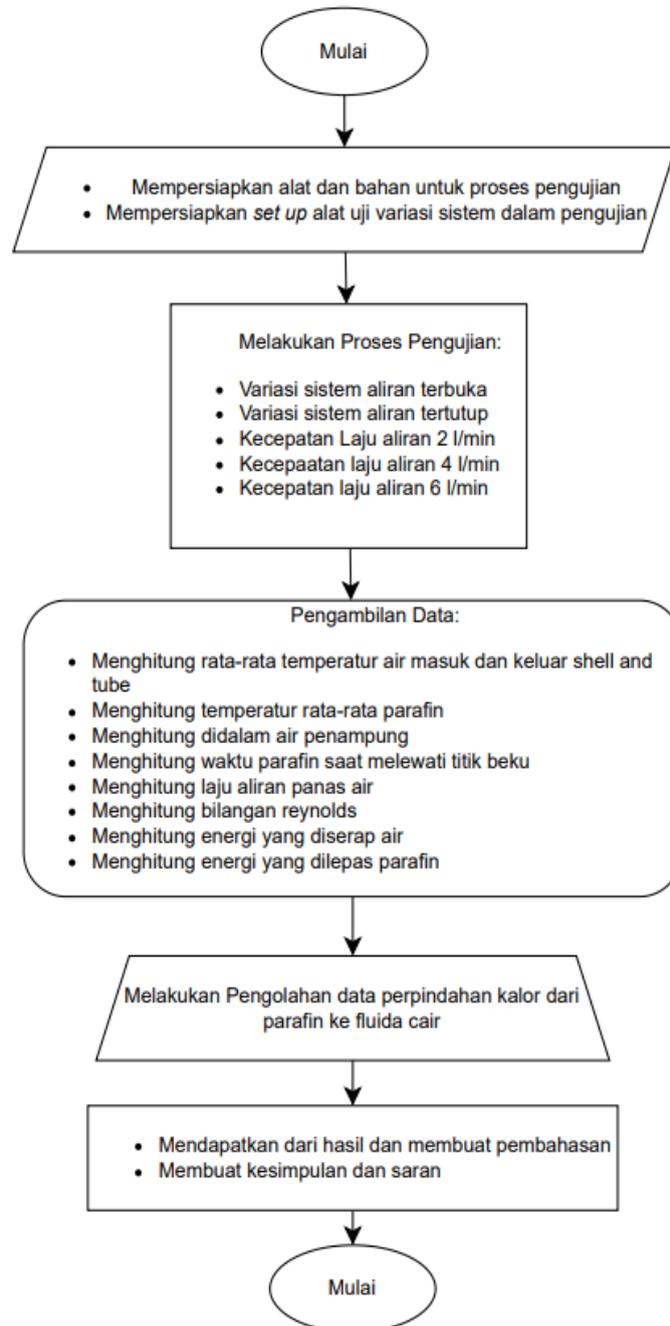
Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah air dan parafin. Air disirkulasikan oleh pompa dari penampungan air menuju alat penukar kalor kemudian kembali ke penampungan air. Parafin sebagai material berubah fasa yang digunakan berjenis padat atau lilin parafin yang kemudian diletakkan diantara pipa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

3.4 Diagram Alir





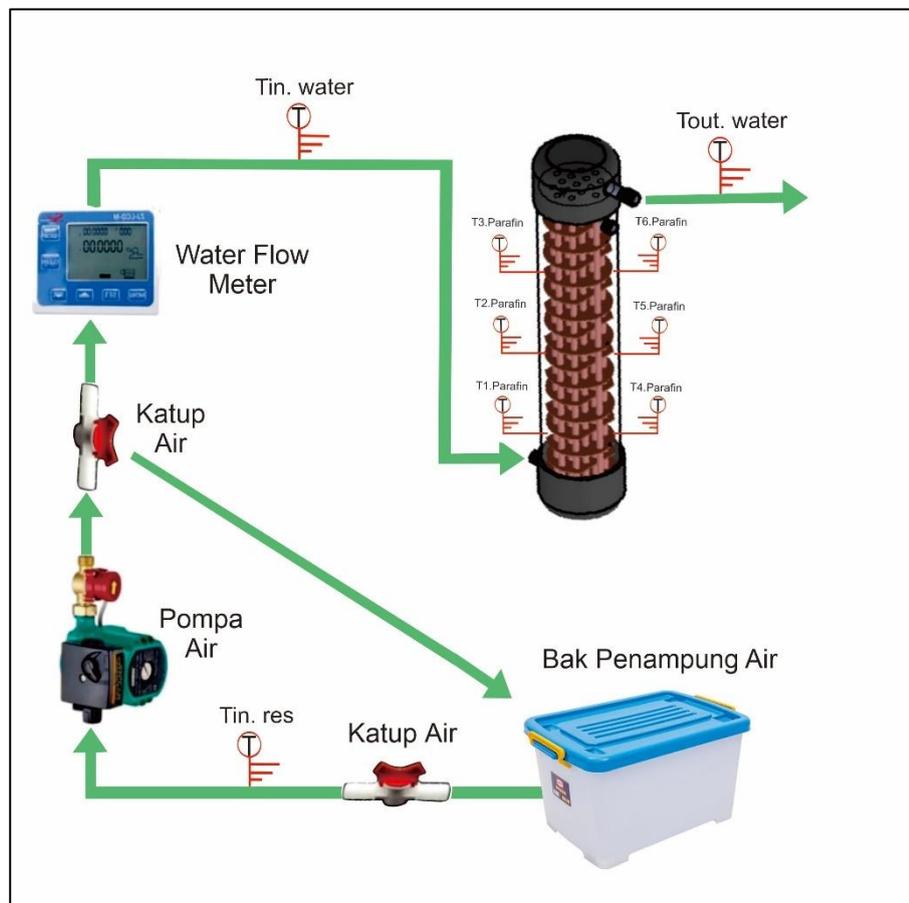
Gambar 3 9 Diagram alir pembuatan *shell and tube*



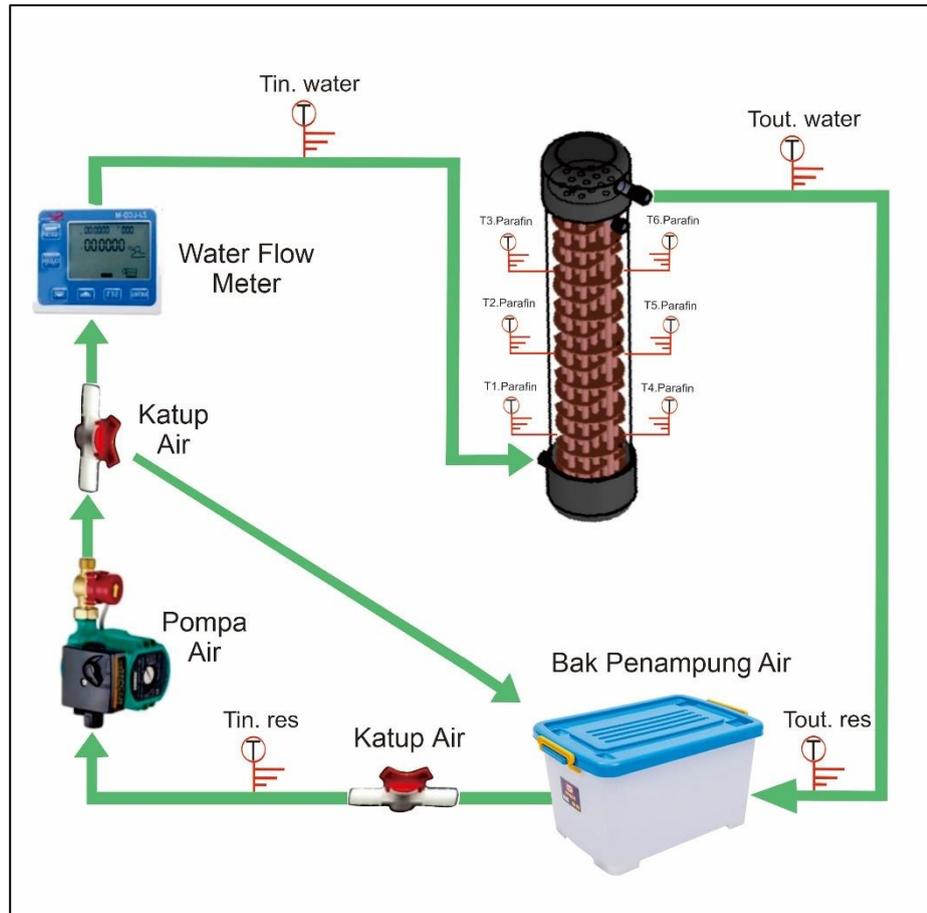
Gambar 3.10 Diagram alir pengujian

3.5 Skema Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan skema pengujian yang mana bermula dari parafin masih dalam bentuk padat, kemudian fluida berupa air dipanaskan di tempat penampung air panas yang kemudian panasnya dialirkan ke *shell and tube* dengan menggunakan pompa hingga parafin mencair. Kecepatan dari aliran air ini dapat dikontrol dengan menggunakan katup air serta kecepatan alirannya dapat dilihat melalui *water flow meter sensor*. Temperatur parafin, temperatur fluida masuk dan keluar penukar panas, serta temperatur masuk dan keluar tempat penampung air dapat diketahui dengan *thermocouple* dan *data logger*. Instalasi alat pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.10 berikut:



Gambar 3.11 Skema pengujian sistem aliran terbuka

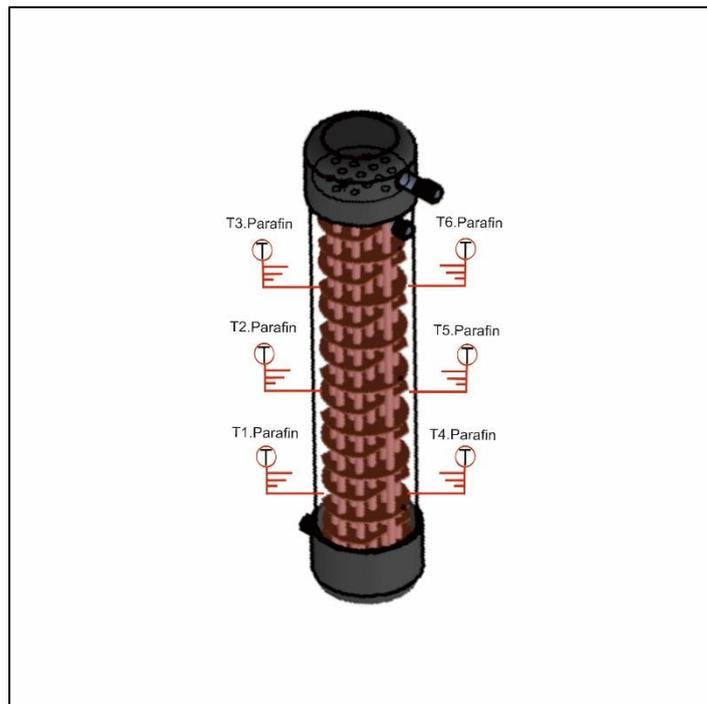


Gambar 3.12 Skema pengujian sistem aliran tertutup

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

Untuk mengukur debit aliran air, water flow meter akan disambungkan dengan pipa penghubung diantara shell and tube dan katup bypass. Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 detik dengan menggunakan data logger. Percobaan dilakukan sebanyak 6 kali dimana terdiri dari 3 variasi debit air (2 l/min, 4 l/min, dan 6 l/min).

3.6 Penempatan Titik Pengukuran



Gambar 3.13 Penempatan titik pengukuran *shell and tube*

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran temperatur dan debit aliran air. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel dan pengukuran debit aliran air dengan menggunakan water flow meter. Digunakan 10 buah termokopel untuk melakukan pengukuran temperatur.

$T_{in,water}$ merupakan temperatur air sebelum masuk pada *shell and tube*, $T_{out,water}$ merupakan temperatur air sesudah keluar dari *shell and tube*, $T_{1,parafin}$ merupakan temperatur parafin yang diletakkan 10 cm setelah pangkal pipa, $T_{2,parafin}$ merupakan temperatur parafin yang diletakkan ditengah pipa, $T_{3,parafin}$ merupakan temperatur parafin yang diletakkan 10 cm sebelum ujung pipa. Kemudian untuk T_4 , T_5 , dan T_6 diletakkan dan diarahkan kebagian bawah pipa agar dapat mengetahui temperatur leleh parafin bagian dangkal atau bawah pipa.

Untuk mengukur debit aliran air, water flow meter akan disambungkan dengan pipa penghubung diantara *shell and tube* dan katup bypass.

Pengambilan data temperatur dilakukan setiap 10 detik dengan menggunakan data logger. Percobaan dilakukan sebanyak 9 kali dimana terdiri dari 3 variasi debit air (2 l/min, 4 l/min, dan 6 l/min).

3.7 Metode Pengambilan Data

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

1. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan seperti pompa air, *thermocouple* dan *data logger*, *water flow meter sensor*, tempat penampung air, alat penukar kalor, parafin, pipa air akrilik, dan katup air.
2. Merangkai alat dan bahan seperti pada skema pengujian.
3. Menghidupkan data logger dan memasang *thermocouple*, dengan susunan CH 1, dan CH 2 temperatur fluida masuk keluar penukar panas, CH 3, CH 4, CH 5, CH 6, CH 7 dan CH 8 adalah temperatur parafin di dalam penukar panas, CH 9, dan CH 10 adalah temperatur fluida masuk dan keluar tempat penampung air.
4. Menyalakan keran air.
5. Menghidupkan pompa air.
6. Memanaskan parafin menggunakan kompor hingga mencapai 80°C.
7. Merekam data perubahan temperatur pada *data logger* setiap 10 detik.
8. Menghidupkan *water flow meter sensor* untuk melihat kecepatan aliran fluida.
9. Mengatur kecepatan aliran yang telah ditentukan menggunakan katup air.
10. Memasukkan data hasil rekaman *data logger* kedalam Ms. Excel.
11. Mengulangi langkah 9-11 dengan variasi kecepatan aliran yang telah ditentukan.
12. Membuat kesimpulan hasil penelitian
13. Selesai.

Pengambilan data ini dilakukan secara langsung dengan melakukan eksperimen pada alat penukar kalor. Sebelum air dialirkan ke alat uji, kita harus menentukan kecepatan aliran air dan variasi temperatur air yang akan digunakan untuk penelitian. Setelah air pada tempat penampung mencapai temperatur yang dikehendaki dan sudah konstan, kemudian air tersebut dialirkan ke dalam pipa bagian dalam (*tube*).

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Hasil pengujian laju perpindahan panas terendah tercapai pada variasi aliran tertutup dengan laju aliran 2 l/min, yaitu 200,04 watt. Lalu, laju perpindahan panas tertinggi ditemukan pada variasi aliran terbuka dengan laju aliran 2 l/min, yaitu 292,07 watt. Energi terbesar yang diserap oleh air juga terjadi pada variasi aliran tertutup dengan laju aliran 6 l/min, sebesar 518,63 kJ. Hal ini menunjukkan bahwa variasi jenis dan laju aliran air yang masuk sangat mempengaruhi laju perpindahan panas. Semakin besar laju aliran yang masuk, semakin besar pula laju perpindahan panas yang terjadi, yang pada gilirannya meningkatkan proses pembekuan parafin.
2. Hasil pada proses pembekuan terjadi dari suhu 60°C melewati titik beku pada suhu 40°C dengan kapasitas air yang digunakan 10 liter. Data tersebut dapat diketahui dengan waktu tercepat terjadi pada variasi aliran terbuka dengan laju aliran 6 l/min yaitu 25 menit 30 detik dan waktu terlama terjadi pada variasi aliran tertutup dengan laju aliran 6 l/min yaitu 30 menit. Oleh karena itu variasi aliran dan laju aliran air yang masuk sangat berpengaruh terhadap waktu yang dibutuhkan untuk proses pembekuan parafin. Sehingga variasi dalam parameter-parameter ini dapat menghasilkan perubahan waktu yang signifikan dalam proses pembekuan.

5.2 Saran

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

1. Lebih baik perlu ditambahkannya variasi pada kapasitas air agar dapat mengetahui pengaruhnya terhadap nilai ΔT .
2. Dalam kebutuhan dalam penelitian selanjutnya, agar dapat mengetahui berapa besar kalor yang dilepaskan ke suhu lingkungan sekitar, dapat menambahkannya titik pengukuran temperatur ke titik-titik bagian pipa *tube*, sirip, dan bagian luar pipa akrilik.

DAFTAR PUSTAKA

- Cengel & A, Y., 2003. Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition. Mc. Graw- Hill Book. Singapura. Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition*.
- Cengel, Yunus A dan M.A, Boles. 2005. Thermodynamics and Engineering Approach 5th Edition. McGraw-Hill Collage. Boston
- Incopera, Frank. P., Bergman, Theodore. L., Lavine, Andrienne. S., Dewitt, David. P. 2007. Fundamentals Of Heat And Mass Transfer Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc: River Street, Hoboken.
- Jefri, Nanda., Sutjahjono, Hary., dan Djumhariyanto, Dwi. 2018. Analisa Thermal Kolektor Surya Pelat Datar Yang Dilengkapi PCM Campuran Parafin Dengan Bahan Berbasis Minyak. Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember. Jember
- Irsyad, Muhammad., Natal A. H. L. Tobing., M. Dyan Susila. 2020. Pemanfaatan Material Fasa Berubah untuk Mempertahankan Kesegaran Sayuran. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- Jufrizal, Farel H., dan Ambarita, Himsar. 2014. Studi Eksperimental Performansi Solar Water Heater Jenis Kolektor Plat Datar Dengan Penambahan Thermal Energy Storage. Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara. Medan

Ma'a, Mustaza. 2013. Karakteristik Perpindahan Panas Pada Double Pipe Heat Exchanger Perbandingan Aliran Parallel Dan Counter Flow. Program Studi Teknik Mekatronika, Politeknik Caltex Riau. Riau

Prianto, Gesi Oktaviani., Amaliyah., Kirom, Ramdhan. 2021. Analisis Pemanfaatan Pemanfaatan Parafin Di Thermal Energy Storage Pada Solar Water Heater. Universitas Telkom. Bandung

Rokhadi, Akhyar Wahyu. 2010. Pengujian Karakteristik Perpindahan Panas Dan Penurunan Tekanan Dari Sirip-Sirip Pin Ellips Susunan Selang-Seling Dalam Saluran Segiempat. Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret. Surakarta

Rosyadi, Ahmad Adib., Wibowo, Arif., Djumhariyanto, Dwi., 2019. Pengaruh Glass Tube Terhadap Performa Kolektor Tabung Pemanas Air Dengan Campuran Parafin – Minyak Jarak. Program Studi Teknik Mesin, Universitas Jember. Jember

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). *Review on Thermal Energy Storage With Phase Change Materials and Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(2), 318-345.

Sharma, S. D., & Sagara, K. (2005). *Laten Heat Storage Material and System : A Riview. International Journal Green Energy*, 2, 1-56.

Yuliani, Ika., Tina Mulya Gantina., Nurlita Yunikasari. 2016. Alat Penyimpan Energi Panas Menggunakan Parafin Sebagai PCM (Phase Change Material) Pada Sistem Pemanas Air Surya. Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung. Bandung