

**APLIKASI MATERIAL BERUBAH FASA DARI MINYAK KELAPA DI
DALAM *HEAT EXCHANGER TIPE SHELL AND TUBE* SEBAGAI
PENDINGINAN UDARA**

(Skripsi)

Oleh

MOH. ROYRIL



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

2021

ABSTRAK

APLIKASI MATERIAL BERUBAH FASA DARI MINYAK KELAPA DI DALAM *HEAT EXCHANGER TIPE SHELL AND TUBE* SEBAGAI PENDINGINAN UDARA

Oleh

MOH. ROYRIL

Energi listrik merupakan sumber daya utama yang dibutuhkan oleh masyarakat dalam berbagai kegiatan. Kebutuhan listrik akan terus meningkat seiring dengan adanya peningkatan jumlah penduduk, jumlah investasi dan perkembangan teknologi (Wahid, 2014). Proyeksi permintaan listrik di Indonesia dari 22 wilayah penjualan PLN (Perusahaan Listrik Negara) dalam periode 17 tahun (2003 hingga 2020) mengalami peningkatan dari 91,72 TWh pada tahun 2003 menjadi 272,34 TWh pada tahun 2020, dengan pertumbuhan rata-rata permintaan listrik adalah 6,5% per tahun (Muchlis, 2003). Peralatan listrik yang sering digunakan pada rumah tangga dan berpotensi penghematan yang besar adalah alat pendingin ruangan AC (*Air Conditioner*) dan kulkas (Santoso, 2019). Salah satu cara untuk meringankan beban konsumsi energi listrik yang digunakan untuk mesin pengkondisian udara ialah memanfaatkan material berubah fasa atau PCM (*Phase Change Material*) sebagai *thermal energy storage*. PCM dapat menyerap panas dalam bentuk kalor laten (kalor yang tersimpan dalam suatu zat untuk mengubah wujudnya dari suatu bentuk ke bentuk lain tanpa mengalami kenaikan temperatur) sehingga PCM dapat digunakan untuk mengurangi beban termal ruangan pada sebuah bangunan. Penelitian dilakukan dengan cara memanfaatkan udara dingin pada malam hari sehingga minyak kelapa dapat membeku, lalu temperatur ruangan yang tinggi pada siang hari dapat diserap oleh minyak kelapa.

Kata Kunci : *Air Conditioner (AC), Phase Change Material (PCM), Thermal Energy Storage* dan Alat Penukar Kalor.

ABSTRACT

APPLICATION OF PHASE CHANGING MATERIAL OF COCONUT OIL IN SHELL AND TUBE TYPE HEAT EXCHANGER AS AIR COOLING

By

MOH. ROYRIL

Electrical energy is the main resource needed by the community in various activities. The need for electricity will continue to increase along with the increase in population, the amount of investment and technological developments (Wahid, 2014). The projection of electricity demand in Indonesia from 22 sales areas of PLN (State Electricity Company) in the 17 year period (2003 to 2020) has increased from 91.72 TWh in 2003 to 272.34 TWh in 2020, with an average growth in electricity demand is 6.5% per year (Muchlis, 2003). Electrical equipment commonly used in households and potentially big savings is the air conditioning AC (Air Conditioner) and refrigerator (Santoso, 2019). One way to ease the burden of electrical energy consumption used for air conditioning machines is to use phase change material or PCM (Phase Change Material) as thermal energy storage. PCM can absorb heat in the form of latent heat (heat stored in a substance to change its form from one form to another without experiencing an increase in temperature) so that PCM can be used to reduce the thermal load of the room in a building. The research was conducted by utilizing cold air at night so that coconut oil can freeze, then the high room temperature during the day can be absorbed by coconut oil.

Keywords : *Air Conditioner (AC), Phase Change Material (PCM), Thermal Energy Storage and Heat Exchanger.*

**APLIKASI MATERIAL BERUBAH FASA DARI MINYAK KELAPA DI
DALAM *HEAT EXCHANGER TIPE SHELL AND TUBE* SEBAGAI
PENDINGINAN UDARA**

Oleh

MOH. ROYRIL

Skripsi

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

Pada

**Program Studi Teknik Mesin
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



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

2021

Judul Skripsi : **APLIKASI MATERIAL BERUBAH FASA
DARI MINYAK KELAPA DI DALAM
HEAT EXCHANGER TIPE SHELL AND
TUBE SEBAGAI PENDINGINAN UDARA**

Nama Mahasiswa : **Moh. Royril**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1615021005

Program Studi : Teknik Mesin


Jurusan : Teknik Mesin

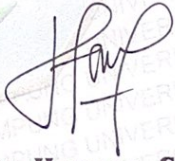
Fakultas : Teknik



Pembimbing Utama


Pembimbing Pendamping



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


Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP 19690620 200003 1 001

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin


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


Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP 19701104 199703 2 001

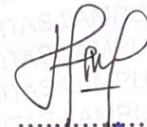
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

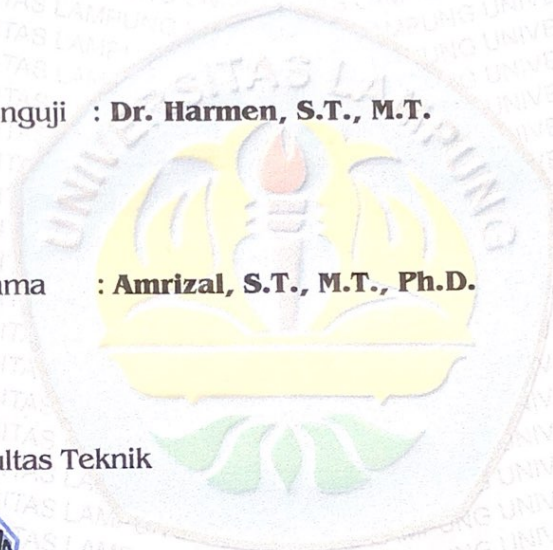
Ketua : Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 September 2021

PERNYATAAN PENULIS

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN PERATURAN REKTOR
NO. 13 TAHUN 2019.

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



NPM. 1615021005

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Moh. Royril yang biasa dipanggil dengan nama Roy. Penulis dilahirkan di Cirebon pada tanggal 16 Juli 1998. Penulis merupakan anak dari pasangan Bapak Ahmad Fuadi dan Ibu Ferliantina. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis memulai pendidikan taman kanak-kanak di TK Teratai Cirebon dan lulus pada tahun 2004, kemudian melanjutkan pendidikan ke sekolah dasar di SD Negeri 1 Kalibalau Kencana dan lulus pada tahun 2010, kemudian melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Pertama di SMP Kartika II-2 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2013, kemudian melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2016. Penulis melanjutkan Pendidikan di Teknik Mesin Universitas Lampung pada tahun 2016. Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi staff Dinas Sosial dan Politik pada Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penulis pernah menjadi anggota Divisi Kreativitas Bidang Minat dan Bakat Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Termodinamika dan menjadi asisten praktikum prestasi mesin. Penulis pernah melakukan kerja praktik di Biodiesel *Plant* PT. Tunas Baru Lampung Tbk, sebagai peserta magang dengan karya tulis “Analisis Pengaruh Pengotoran Terhadap Laju Perpindahan Panas dan Efektivitas *Condenser* Tipe *Shell and Tube*”. Penulis pernah menjadi Koordinator Kecamatan Pakwaan Ratu, Way Kanan dalam kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung Periode I 2019.

MOTTO

“It may be that you hate something, when it is very good for you, and it may be (also) that you like something, when it is very bad for you. Allah knows, while you don’t know.”- QS. Al-Baqarah

216

“Everyone thinks of changing the world, but no one thinks of changing themselves.”

“Never regret a day in your life. Good days give happiness, bad days give experiences, the worst days give lessons, and the best day give memories.”

“Whatever you are, be a good one.”

“God is never wrong in giving the sustenance.”

**DENGAN MENYEBUT NAMA ALLAH YANG MAHA PENGASIH LAGI
MAHA PENYAYANG**

KARYA TULIS INI DIPERSEMBAHKAN KEPADA

Ayahku (Ahmad Fuadi) dan Ibuku (Ferliantina)

Kedua orangtuaku terima kasih atas segala ilmu yang telah kalian berikan dan atas segala dukungan untuk menguatkanmu yang senantiasa mencintaiku dan menyayangiku dengan penuh kasih sayang dengan penuh kesabaran dalam mendidik, merawatku sedari kecil, mendoakanku agar aku menjadi orang yang sukses, mengorbankan segalanya untuk kebahagiaanku dan cita-citaku, menasehatiku agar aku menjadi pribadi yang lebih baik lagi dan tidak pernah menyerah.

serta

Kepada Semua Pihak Yang Telah Mendukung, Mendidik dan Membimbing
Penulis

Terima Kasih Banyak.

SANWACANA

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa ta'ala, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul "**APLIKASI MATERIAL BERUBAH FASA DARI MINYAK KELAPA DI DALAM *HEAT EXCHANGER* TIPE *SHELL AND TUBE* SEBAGAI PENDINGIN UDARA**". Sholawat serta salam semoga tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW.

Skripsi ini ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat wajib kelulusan jenjang Strata 1 Program Studi Teknik Mesin Universitas Lampung. Selain itu skripsi ini ditujukan untuk mengamati dan mengetahui serta mempraktekkan ilmu yang telah didapatkan pada perkuliahan dalam pelaksanaan penelitian.

Selama menjalani pengerjaan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan kemudahan, kelancaran dan rezeki kepada penulis serta Rasulullah Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan dalam berperilaku selama kegiatan penelitian skripsi berlangsung.
2. Kedua orang tua, Bapak Ahmad Fuadi dan Ibu Ferliantina yang telah mendukung dan mendoakan penulis sehingga dapat semangat dan lancar dalam menjalankan studi di Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
4. Dr. Amrul S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Novri Tanti S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 1 Tugas Akhir Skripsi yang telah membimbing dalam penyusunan skripsi.
7. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 2 Tugas Akhir Skripsi yang telah membimbing dalam penyusunan skripsi.
8. Amrizal, S.T., M. T., Ph.D. selaku Penguji Utama atas koreksian serta masukan dalam pengerjaan skripsi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak pengetahuan kepada penulis.
10. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
11. Sabrina Ayunani, Radhi Hirzi selaku kakak penulis dan keponakan penulis Abdurazzaq Mangkuto Hirzi serta seluruh keluarga penulis yang telah memberikan dukungan dan doa.
12. Wellica Gustia Putri yang selalu memberikan saran, dukungan, semangat dan do'a selama penulis menyelesaikan skripsi.
13. Tim Laboratorium Termodinamika Sulton, Hawari dan Azka terkhusus pada penelitian Material Berubah Fasa.
14. Deas, Dio, Handika, Fachry, Gerry, Fazri, Yoga, Refi, Bayu, Nadhita, Irena, Alifia, Esti, Maisi, Tiwi, Eka, Shovia dan Laras yang telah bersama-sama tumbuh dan berkembang dari bangku Sekolah Menengah Pertama hingga semuanya telah menyelesaikan perkuliahan.
15. Teman-teman penghuni kostan Wisma Dita dan Griya Delicia yang senantiasa bertukar pikiran dan bercerita tentang skripsi dan percintaan.
16. Teman-teman Angkatan 2016 yang telah bersama-sama studi dan memberikan motivasi, dorongan serta semangat.
17. Kantin uni yang telah menyediakan makanan dan minuman untuk melepas lapar dan dahaga.

Kritik dan saran diperlukan untuk meningkatkan kualitas dari skripsi ini. Oleh karena itu segala bentuk kritik maupun saran yang sifatnya membangun akan sangat diharapkan kedepannya. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi semua pihak.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung, 3 September 2021

Moh. Royril

1615021005

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR NOTASI	vii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Material Berubah Fasa	6
2.2 Klasifikasi Material Berubah Fasa	6
2.2.1 Material Berubah Fasa Organik.....	7
2.2.2 Material Berubah Fasa Anorganik.....	11
2.3 Minyak Kelapa	13
2.4 Sifat-Sifat Minyak Kelapa	15
2.4.1 Massa Jenis	15
2.4.2 Panas Spesifik	15
2.4.3 Panas Laten	15
2.5 Aplikasi Material Berubah Fasa	15
2.6 Penyimpanan Energi Termal	18
2.6.1 Panas Sensibel.....	19
2.6.2 Panas Laten	20
2.7 Perpindahan Panas	20
2.7.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi	21
2.7.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi	22
2.7.3 Perpindahan Panas Secara Radiasi.....	23
2.8 Metode Penggunaan PCM Sebagai Penyimpanan Energi Termal ...	24
2.8.1 Metode Penggabungan Langsung (<i>Direct Incorporation</i>).....	24

2.8.2 Metode Pencelupan	25
2.8.3 Metode Enkapsulasi (<i>Encapsulation</i>)	25
2.9 Metode Peningkatan Laju Perpindahan Kalor PCM.....	26
2.10 <i>Passive Cooling</i>	27
2.10.1 <i>Solar Shading</i>	27
2.10.2 <i>Air Ventilation</i>	27
2.10.3 <i>Insulation</i>	27
2.10.4 <i>Evaporative Cooling</i>	28
2.10.5 <i>Earth Coupling</i>	28
III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	29
3.2 Tahapan Penelitian	29
3.2.1 Studi Literatur	30
3.2.2 Persiapan	30
3.2.3 Pengujian.....	31
3.2.4 Analisis Data.....	31
3.2.5 Penulisan Laporan.....	31
3.3 Alat dan Bahan.....	31
3.3.1 Alat.....	31
3.4 Metode Pengambilan Data	35
3.4.1 Pembekuan	35
3.4.2 Pelelehan	35
3.5 Alur Pengambilan Data	36
3.6 Variabel Pengujian	37
3.7 Pengolahan Data Perhitungan	37
3.7.1 Menghitung Energi pada PCM	37
3.7.2 Menghitung Laju Perpindahan pada Udara	38
3.8 Instalasi Alat Pengujian	39
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Pengolahan Data Perhitungan	40
4.2 Laju Perubahan Temperatur Minyak Kelapa Pada Proses Pelelehan	42
4.3 Pengaruh Temperatur Awal PCM Terhadap Kenaikan Temperatur Minyak Kelapa	45
4.4 Pengaruh Kecepatan Udara Masuk Terhadap Kenaikan Temperatur Minyak Kelapa	47

4.5 Laju Pemanasan.....	50
4.6 Keseimbangan Energi	51
4.7 Pengaruh Temperatur Udara Masuk Terhadap Penurunan Temperatur Ruangan	57
4.8 Pengaruh Kecepatan Udara Masuk Terhadap Laju Perpindahan Panas yang Dilepas Udara.....	62
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Klasifikasi <i>Phase Change Material</i>	7
Gambar 2. 2 Parafin Padat	9
Gambar 2. 3 Garam Hidrat.....	11
Gambar 2. 4 Minyak Kelapa	14
Gambar 2. 5 Klasifikasi penyimpanan energi termal.....	18
Gambar 2. 6 Proses Perpindahan Panas Secara Konduksi.....	22
Gambar 2. 7 Perpindahan Panas Konveksi.....	22
Gambar 2. 8 Penggunaan PCM dengan metode <i>direct incorporation</i>	24
Gambar 2. 9 Penggunaan PCM dengan metode enkapsulasi.....	25
Gambar 3. 1 <i>Air Conditioner</i>	32
Gambar 3. 2 <i>Shell and Tube</i>	32
Gambar 3. 3 Temperatur <i>Recorder</i> dan Termokopel	33
Gambar 3. 4 <i>Blower</i>	33
Gambar 3. 5 Anemometer	34
Gambar 3. 6 Minyak Kelapa	34
Gambar 3. 7 Instalasi pengujian.....	39
Gambar 3. 8 Skema pengujian	39
Gambar 4.1 Laju perubahan temperatur PCM pada proses pelelehan dengan kecepatan udara : (a) 6 m/s (b) 5 m/s (c) 4 m/s.....	44
Gambar 4.2 Pengaruh temperatur awal PCM terhadap kenaikan temperatur PCM dengan variasi kecepatan udara : (a) 6 m/s (b) 5 m/s (c) 4 m/s.....	46
Gambar 4.3 Pengaruh kecepatan udara masuk terhadap proses pelelehan dengan variasi temperatur awal PCM.....	49
Gambar 4.4 Laju pemanasan PCM dengan variasi kecepatan 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s	51
Gambar 4.5 Keseimbangan energi pada proses pelelehan minyak kelapa variasi kecepatan udara 4 m/s pada temperatur awal PCM : (a) 22,1 °C, (b) 22,7°C dan (c) 23,3°C	54

- Gambar 4.6 Kestimbangan energi pada proses pelelehan minyak kelapa variasi kecepatan udara 5 m/s pada temperatur awal PCM : (a) 21,7 °C, (b) 22,6°C dan (c) 23,1°C 55
- Gambar 4.7 Kestimbangan energi pada proses pelelehan minyak kelapa variasi kecepatan udara 6 m/s pada temperatur awal PCM : (a) 21,2 °C, (b) 22,4°C dan (c) 22,7°C 56
- Gambar 4.8 Pengaruh temperatur pembekuan setting AC terhadap penurunan temperatur ruangan pada kecepatan udara : (a) 4 m/s (b) 5 m/s (c) 6 m/s..... 61
- Gambar 4.9 Pengaruh kecepatan udara masuk terhadap laju perpindahan panas yang dilepas udara pada temperatur awal minyak kelapa..... 64

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Temperatur leleh dan panas laten pada beberapa jenis parafin (Pudjiastuti, 2011).....	8
Tabel 2.2 Titik leleh dan panas laten non parafin (Sharma et al, 2009)	10
Tabel 2.3 Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa <i>metallic</i>	12
Tabel 2.4 Karakteristik PCM (Kalnas et al, 2015).....	13
Tabel 2.5 Aplikasi material berubah fasa (Pudjiastuti, 2011).....	16
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian	30
Tabel 4. 1 Energi yang diserap PCM pada variasi 6 m/s	41
Tabel 4. 2 Energi yang dilepas udara pada variasi 6 m/s	41
Tabel 4. 3 Energi yang diserap PCM pada variasi 5 m/s	41
Tabel 4. 4 Energi yang dilepas udara pada variasi 5 m/s	41
Tabel 4. 5 Energi yang diserap PCM pada variasi 4 m/s	42
Tabel 4. 6 Energi yang dilepas udara pada variasi 4 m/s	42
Tabel 4. 7 Tabel laju pemanasan minyak kelapa	50
Tabel 4. 8 Nilai energi yang diserap minyak kelapa.....	52
Tabel 4. 9 Energi yang dilepas udara	52
Tabel 4. 10 Penurunan temperatur ruangan	57

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan Unit
A	Luas permukaan	m^2
C_p	Panas spesifik	J/kg.K
D_p	Diameter luar pipa <i>tube</i>	m
dT	Perubahan temperatur	K, °C
h	Koefisien perpindahan kalor konveksi	$W/m^2.K$
h_o	Koefisien perpindahan kalor konveksi luar pipa	$W/m^2.K$
h_i	Koefisien perpindahan kalor konveksi didalam pipa	$W/m^2.K$
k	Konduktifitas termal bahan	$W/m.K$
L	Kalor laten	J/kg
m	Massa	kg
\dot{m}	Laju aliran masa	kg/s
N	Bilangan Nusselt	
P_r	Bilangan Prandtl	
Q	Jumlah Kalor	J
\dot{q}	Laju Perpindahan Kalor	J/s
R_e	Bilangan Reynold	
R_a	Bilangan Rayleigh	
T	Temperatur	K, °C
U	Koefisien Perpindahan panas menyeluruh	$W/m^2.K$
V	Kecepatan fluida	m/s
ρ	Masa jenis fluida	Kg/m^3
q	Debit Fluida	m^3/s
RH	Relative Humidity	%

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan sumber daya utama yang dibutuhkan oleh masyarakat dalam berbagai kegiatan. Kebutuhan listrik akan terus meningkat seiring dengan adanya peningkatan jumlah penduduk, jumlah investasi dan perkembangan teknologi (Wahid, 2014). Proyeksi permintaan listrik di Indonesia dari 22 wilayah penjualan PLN (Perusahaan Listrik Negara) dalam periode 17 tahun (2003 hingga 2020) mengalami peningkatan dari 91,72 TWh pada tahun 2003 menjadi 272,34 TWh pada tahun 2020, dengan pertumbuhan rata-rata permintaan listrik adalah 6,5% per tahun (Muchlis, 2003). Konsumsi tenaga listrik terbesar berasal dari sektor rumah tangga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peralatan listrik yang biasa digunakan pada rumah tangga memiliki potensi untuk dilakukan penghematan. Peralatan listrik yang sering digunakan pada rumah tangga dan berpotensi penghematan yang besar adalah alat pendingin ruangan AC (*Air Conditioner*) dan kulkas (Santoso, 2019).

Indonesia merupakan negara beriklim tropis lembab dengan suhu udara berkisar 24-32°C, kelembaban udara 60-95%, dan kecepatan angin yang rendah. Kondisi ini menyebabkan iklim Indonesia secara termal menjadi tidak nyaman, karena tidak berada pada zona dimana komposisi udara nyaman secara termal (Satwiko, 2008). Kebutuhan kenyamanan termal untuk daerah tropis lembab dapat dicapai dengan batas $24^{\circ}\text{C} < T < 26^{\circ}\text{C}$, $40\% < \text{RH} < 60\%$, $0,6 < V < 1,5$ m/s. Pencapaian kenyamanan termal dalam bangunan, dapat diusahakan dengan memasang mesin pengkondisian udara. Dalam memasang mesin pengkondisian udara dibutuhkan upaya dalam penggunaannya agar menjadi lebih efektif dan efisien. Besarnya penggunaan

listrik tergantung pada besar panas yang harus dikeluarkan oleh mesin AC untuk menghasilkan udara yang sejuk sesuai dengan kebutuhan suhu ruang. Pemahaman tentang beban penyejukan AC dibutuhkan agar dapat diupayakan cara pengurangannya sehingga kerja mesin AC menjadi ringan dan listrik yang digunakan pun menjadi kecil (Jati, 2008).

Faktor–faktor kenyamanan menurut Lippsmeier (1980), dalam ruang tertutup adalah temperatur udara, kelembaban udara, temperatur radiasi rata–rata dari atap dan dinding, kecepatan gerak udara, tingkat pencahayaan dan distribusi cahaya pada dinding pandangan. Selain itu terdapat beberapa standar yang menentukan kenyamanan termal. Penelitian mengenai termal di Indonesia sudah sejak dari dulu dilakukan oleh para peneliti. Penelitian ini pertama kali dilakukan oleh Mom Wiesebron antara tahun 1936 – 1940 di Bandung. Penelitian tersebut melibatkan 3 kelompok etnis responden yaitu etnis Eropa, etnis Tionghoa, dan etnis Indonesia. Dari penelitian ini diperoleh rentang suhu nyaman untuk responden Indonesia adalah antara 24°C hingga 28°C suhu udara dengan kelembaban sekitar 70%.

Salah satu upaya untuk efisiensi pemakaian AC adalah menggunakan material fasa berubah (phase change material disingkat PCM) sebagai penyimpan energi termal. PCM ini ada yang digunakan untuk mengurangi beban termal dengan menjadikan material tambahan pada dinding dan plafon, dan ada yang digunakan pada refrigeran sekunder (Irsyad *et al*, 2020). PCM dapat menyerap panas dalam bentuk kalor laten (kalor yang tersimpan dalam suatu zat untuk mengubah wujudnya dari suatu bentuk ke bentuk lain tanpa mengalami kenaikan temperatur) sehingga PCM dapat digunakan untuk mengurangi beban termal ruangan pada sebuah bangunan. Awalnya, pada PCM terdapat bahan penyimpan konvensional dimana energi yang dilepaskan sesuai dengan panas yang diserap. Tidak seperti bahan penyimpan energi konvensional, PCM dapat menyerap dan melepaskan panas mendekati suhu konstan. PCM dapat melepaskan panas empat sampai lima kali lebih besar

setiap satuan volume dibandingkan bahan penyimpan energi konvensional seperti air atau batu (Sharma *et al*, 2009).

Secara luas, berdasarkan titik leleh dan panas peleburan laten, PCM diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, yaitu organik dan anorganik. Namun, karena tidak ada satu bahan yang dapat memenuhi seluruh sifat yang diinginkan, maka dikembangkan juga PCM yang merupakan kombinasi antara dua kelompok bahan. Pada penelitian ini, PCM yang digunakan ialah minyak kelapa. Minyak kelapa dipilih karena mudah dicari di pasaran dan memiliki harga yang tergolong murah. Metode yang diterapkan yaitu dengan cara memanfaatkan udara dingin pada malam hari sehingga minyak kelapa dapat membeku, lalu temperatur ruangan yang tinggi pada siang hari dapat dikurangi dengan minyak kelapa yang telah melepas kalor pada malam hari. Dengan prinsip perpindahan kalor, panas akan berpindah dari suhu tinggi ke rendah. Hal ini yang melatarbelakangi penelitian yang dilakukan yaitu Aplikasi Material Material Berubah Fasa dari Minyak Kelapa di Dalam *Heat Exchanger Tipe Shell and Tube* Sebagai Pendinginan Udara.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh temperatur awal minyak kelapa dan kecepatan udara masuk terhadap kenaikan temperatur minyak kelapa
2. Menganalisa pengaruh temperatur awal minyak kelapa dan kecepatan udara masuk terhadap laju perpindahan panas udara
3. Menganalisa pengaruh temperatur awal minyak kelapa dan kecepatan udara masuk terhadap penurunan temperatur ruangan

1.3 Batasan Masalah

Kajian pada penelitian ini memfokuskan tentang kemampuan material berubah fasa dari minyak kelapa dalam menyimpan energi sehingga dapat

dimanfaatkan sebagai penurunan temperatur ruangan. Batasan masalah yang dikaji pada penelitian ini antara lain:

1. Bahan baku material berubah fasa yang digunakan adalah minyak Kelapa dengan temperatur pembekuan 23°C .
2. Alat yang digunakan untuk menguji pembekuan dan pelelehan pada PCM minyak kelapa yaitu *heat exchanger* tipe *shell and tube*.
3. Variasi temperatur udara yang digunakan pada proses pelelehan PCM yaitu $30-31^{\circ}\text{C}$.
4. Variasi kecepatan udara yang digunakan pada proses pelelehan PCM yaitu 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s.
5. Ruang yang digunakan berukuran 3,38 m x 2,49 m x 2,97 m

1.4 Sistematika Penulisan

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang dilakukannya penelitian, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat teori dasar mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian seperti penyimpanan energi termal, material berubah fasa (PCM), metode penggunaan material berubah fasa, dan minyak kelapa.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini yang menjelaskan tentang tempat dan waktu pengujian, alat dan bahan yang di gunakan saat pengujian, metode pengambilan data, dan variabel yang digunakan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil eksperimen dan pembahasan yang didapat dari data-data yang dilakukan saat pengujian.

V. PENUTUP

Bab ini berisikan tentang kesimpulan hasil eksperimen dari penelitian yang dilakukan dan saran yang ingin disampaikan penulis.

DAFTAR PUSTAKA

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

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Berubah Fasa

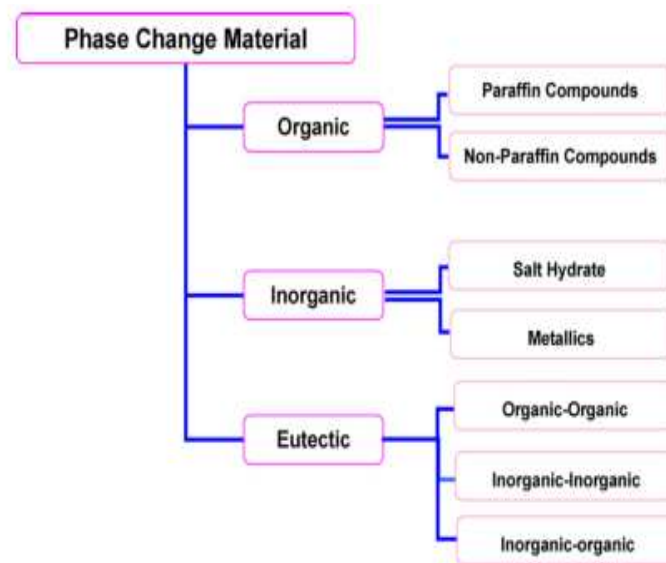
Material berubah fasa merupakan material penyimpan panas laten yang dapat mengubah fasa dari padat menjadi cair atau sebaliknya (Sharma *et al*, 2009). Material berubah fasa pada umumnya digunakan sebagai penyimpanan energi, dimana energi yang dilepaskan sama seperti energi yang diserap. Material berubah fasa dinilai sebagai penyimpanan energi panas yang efisien. Dalam kehidupan sehari-hari material berubah fasa sering kita temui seperti minyak nabati, asam lemak, parafin dan sebagainya.

Cara kerja material berubah fasa adalah temperatur dari material berubah fasa akan meningkat ketika menyerap panas. Ketika mencapai temperatur dimana material berubah fasa akan berubah cair (titik leleh), Material berubah fasa akan menyerap panas yang cukup besar tanpa bertambah temperaturnya. Temperatur akan konstan sampai proses pelelehan berakhir. Panas yang diserap selama perubahan fasa inilah yang disebut dengan panas laten. Ketika temperatur lingkungan turun, maka material berubah fasa akan berubah menjadi padatan, ketika itulah material berubah fasa melepaskan panas laten.

2.2 Klasifikasi Material Berubah Fasa

Secara umum PCM diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelompok yaitu organik, anorganik dan *eutectic*. Pengelompokan ini didasarkan pada titik leleh dan panas peleburan laten. Namun karena tidak ada satu bahan yang dapat memenuhi seluruh sifat yang diinginkan, maka dikembangkan juga PCM

yang merupakan kombinasi antara kedua bahan tersebut (Sharma *et al*, 2009). Klasifikasi material berubah fasa dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi *Phase Change Material* (Sharma *et al*, 2009)

2.2.1 Material Berubah Fasa Organik

Material berubah fasa organik pada umumnya mempunyai rentang temperatur rendah. Selain itu rata-rata panas laten per satuan volume dan densitasnya juga rendah. Sebagian besar material berubah fasa organik mudah terbakar di alam. Adapun material berubah fasa organik dibedakan menjadi 2 yaitu :

1. Parafin

Parafin merupakan material berubah fasa organik yang memiliki 2 bentuk yaitu padat dan cair yang sering digunakan sebagai material penyimpanan energi panas. Rumus kimia dari parafin ialah C_nH_{2n+2} . Sifat termal parafin bergantung pada jumlah karbon. Parafin memiliki nomor karbon antara C_{19} sampai dengan C_{40} (Khadiran, 2016). Parafin padat ditunjukkan pada Gambar 2.2. Parafin padat memiliki temperatur leleh antara 53-59°C dan mempunyai panas laten yang cukup tinggi antara 160

kJ/kg sehingga sering dimanfaatkan sebagai penyimpanan energi termal. Nilai temperatur leleh dan panas laten parafin ditunjukkan pada Tabel 2.1. Dengan sifat itulah maka parafin digunakan sebagai penyimpan energi termal karena mudah menyerap, menyimpan dan melepaskan energi termal yang ditandai dengan perubahan fasa dari bentuk padat menjadi cair atau sebaliknya (Gasia *et al*, 2016).

Tabel 2.1 Temperatur leleh dan panas laten pada beberapa jenis parafin (Pudjiastuti, 2011)

Jumlah Atom	Titik Leleh (°C)	Panas Laten (kJ/kg)
14	5,5	228
15	10	205
16	16,7	237,1
17	21,7	213
18	28	244
19	32	222
20	36,7	246
21	40,2	200
22	44	249
23	47,5	232
24	50,6	255
25	49,4	238
26	56,3	256
27	58,8	236
28	61,6	253

Selain itu penggunaan parafin sebagai penyimpanan energi termal memiliki kelebihan dan kekurangan yaitu sebagai berikut :

a. Kelebihan

Parafin sebagai penyimpan energi memiliki kelebihan yaitu, mempunyai panas laten yang tinggi, memiliki kecenderungan

tidak mengalami proses *supercooling*, non-reaktif, tidak berbau, tidak beracun, cocok disimpan pada kontainer logam, serta cocok diaplikasikan sebagai penyimpan energi termal dengan berbagai tipe (Sarier dan Onder, 2012)

b. Kekurangan

Parafin sebagai penyimpan energi termal memiliki kekurangan yaitu konduktivitas termal yang rendah pada saat fasa padat. Masalah ini dapat diatasi dengan penambahan *fin* pada permukaan perpindahan panas atau dengan menambahkan material logam pada parafin untuk meningkatkan konduktivitas termal. Parafin juga mempunyai sifat yang mudah terbakar sehingga perancangan kontainer sebagai penyimpan parafin harus lebih diperhatikan (Sharma dan Sagara, 2005)



Gambar 2.2 Parafin Padat (Aminah, 2018)

2. Non Parafin

PCM non-parafin merupakan material PCM yang paling beragam diantara material PCM yang lain. Material PCM non-parafin secara umum di antaranya yaitu asam lemak, ester, alkohol dan glikol. PCM non-Parafin memiliki sifat fluida yang beragam ditiap jenisnya baik dari titik lelehnya, masa jenisnya, konduktivitas termalnya hingga panas latennya. Material non-parafin memiliki titik leleh yang berbeda-beda mulai dari yang terkecil yaitu $7,8^{\circ}\text{C}$ (*asam formic*) hingga yang terbesar yaitu

187°C (*asam amino benzoic*). Selain itu, material non-parafin juga memiliki panas laten yang sangat beragam mulai dari yang terendah 126 kJ/kg (*methyl brombrenzoate*) hingga yang tertinggi 259 kJ/kg (*caprylone*). Akan tetapi, PCM non-parafin memiliki kekurangan yang cukup menonjol yaitu memiliki sifat yang mudah sekali terbakar (*flammable*) sehingga riskan dalam penggunaannya sebagai thermal energy storage (Sharma dan Sagara, 2005). Titik leleh dan panas laten PCM non parafin dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah.

Tabel 2.2 Titik leleh dan panas laten non parafin (Sharma *et al*, 2009)

Material	Titik Leleh (°C)	Panas Laten (kJ/kg)
<i>Formic</i>	7,8	247
<i>Caprilic acid</i>	16,3	149
<i>Glycerine</i>	17,9	198,7
<i>a-Lactic acid</i>	26	184
<i>Methyl palmiat</i>	29	205
<i>Phenol</i>	41	120
<i>Bee wax</i>	61,8	177
<i>Gyolic acid</i>	63	109
<i>Azobenzene</i>	67,1	121
<i>Acrilic acid</i>	68	115
<i>Glutaric acid</i>	97,5	156
<i>Catechol</i>	104,3	207
<i>Quenon</i>	115	171
<i>Benzoic acid</i>	124	167
<i>Benzamide</i>	127,2	169,4
<i>Oxalate</i>	54,3	178
<i>Alpha naphtho</i>	96	163

2.2.2 Material Berubah Fasa Anorganik

Material berubah fasa anorganik memiliki densitas penyimpanan termal dan konduktivitas termal yang tinggi, tidak terlalu korosif, kompatibel dengan plastik serta dan hanya beberapa jenis yang beracun dibandingkan material berubah fasa organik. Kelemahan dari material berubah fasa anorganik adalah mengalami *supercooling*. Contoh material berubah fasa anorganik ini adalah garam hidrat dan logam.

1. Garam hidrat



Gambar 2.3 Garam Hidrat

Garam hidrat merupakan material berubah fasa anorganik yang sangat penting dan banyak dipelajari dalam penyimpanan termal. Garam hidrat terdiri dari campuran air dan garam, yang mana keduanya berkombinasi membentuk kristal-kristal matrik pada saat mengalami pembekuan. Garam hidrat merupakan jenis PCM yang memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan PCM lain. Kelebihan dari garam hidrat diantaranya yaitu persediannya yang melimpah sehingga mudah didapatkan. Sifat yang paling menonjol dari material berubah fasa ini adalah panas peleburan laten per satuan volume tinggi sehingga dapat menyerap panas lebih banyak tanpa mengalami perubahan temperatur. Selain itu garam hidrat juga mengalami proses perubahan fasa yang sangat cepat sehingga tidak membutuhkan waktu yang lama pada proses penyerapan dan pelepasan panas. Harga garam hidrat di pasaran

juga tidak terlalu mahal untuk pengaplikasian penyimpanan termal. Adapun bentuk dari garam hidrat dapat dilihat pada Gambar 2.3.

2. Logam

Material berubah fasa anorganik jenis logam saat ini belum menjadi perhatian dalam pemanfatannya karena memiliki massa dan *volume* yang besar. Namun jika melihat dari sisi *volume* menjadi salah satu kelebihan dari material berubah fasa anorganik jenis logam karena mempunyai panas peleburan laten per satuan *volume* yang tinggi sehingga tidak perlu ditambahkan jenis material berubah fasa lainnya. Selain itu PCM jenis logam juga memiliki nilai konduktivitas panas yang tinggi sehingga tidak diperlukan tambahan bahan pengisi yang berat. Titik leleh dan panas laten dari PCM jenis logam dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Titik leleh dan panas peleburan laten beberapa *metallic*.

Material	Titik leleh (°C)	Panas laten (KJ/Kg)
<i>Gallium-gallium</i>	29,8	-
<i>Antimony eutectic</i>	29,8	-
<i>Gallium</i>	30	80,3
<i>Cerrolow eutectic</i>	58	90,9
<i>Bi-Cd-In eutectic</i>	61	25
<i>Cerrobend eutectic</i>	70	32,6
<i>Bi-Pb-In eutectic</i>	70	29
<i>Bi-In eutectic</i>	72	25
<i>Bi-Pb-tin eutectic</i>	96	-

Setiap jenis PCM memiliki karakter yang berbeda-beda. Adapun karakter dari masing-masing PCM dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Karakteristik PCM (Kalnas *et al*, 2015)

Klasifikasi	Kelebihan	Kekurangan
Organik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tersedia secara luas dalam berbagai temperatur operasi 2. Tidak mengalami <i>supercooling</i> 3. Mempunyai panas lebur yang tinggi 4. Dapat di daur ulang 5. Tidak korosif 6. Dapat dioperasikan dengan berbagai jenis bahan 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Memiliki konduktivitas termal yang rendah 2. Memiliki perubahan <i>volume</i> yang besar 3. Mudah terbakar
Anorganik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Memiliki panas lebur yang tinggi 2. Memiliki konduktivitas termal yang tinggi 3. Memiliki perubahan volume yang rendah 4. Biaya yang murah 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mengalami <i>supercooling</i> 2. Mengalami korosi
Eutektik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Memiliki temperatur leleh yang tinggi 2. Memiliki densitas termal yang tinggi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kurangnya literatur mengenai data-data termal <i>properties</i>

2.3 Minyak Kelapa

Minyak kelapa merupakan salah satu jenis dari PCM organik. Komposisi minyak kelapa terdiri dari beberapa asam lemak (*fatty acid*) yang

mengandung zat kimia $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$, minyak kelapa sifat karakteristiknya hampir sama dengan parafin. Namun harga minyak kelapa lebih mahal harganya dari parafin (Hasnain, 1998). Material ini memiliki kemampuan stabilitas termal yang cukup tinggi karena mampu bertahan hingga 1500 pengulangan siklus pembekuan dan pencairan (Sharma, 2005). Minyak kelapa terdiri dari prosentase penyusun seperti: asam *caprylic* (C8) 9%, *Decanoic* (C10) 10%, asam *Lauric* (C12) 52%, asam *myristic* (C14) 19%, asam *palmitic* (C16) 11%, dan asam *oleic* tak tersaturasi (C18) 8% (Putri, 2015).



Gambar 2.4 Minyak Kelapa

Minyak kelapa memiliki panas spesifik saat padat sebesar $3,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ dan panas spesifik pada keadaan cair sebesar $4,1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. Minyak kelapa memiliki karakteristik fisik berubah fasa membeku pada temperatur 23°C . Temperatur berubah fasa minyak kelapa masih dapat dicapai di Indonesia karna iklimnya termasuk daerah tropis. Minyak kelapa memiliki sifat *subcooling* yang cukup rendah sehingga proses perubahan fasa padat-cair atau sebaliknya dapat terjadi secara *reversible* disekitar temperatur pencairan. Salah satu kelebihan dari minyak kelapa juga bersifat non-korosif, sehingga dapat menggunakan berbagai jenis tempat yang terbuat dari logam atau non-logam. Dan adapun kekurangan yang dimiliki dari minyak kelapa ketika diaplikasinya adalah nilai konduktivitas termal yang cukup rendah, sehingga dapat menghambat proses penyerapan dan pelepasan kalornya.

2.4 Sifat-Sifat Minyak Kelapa

Minyak kelapa sebagai material berubah fasa organik memiliki beberapa sifat seperti massa jenis, konduktivitas termal, panas spesifik, temperatur leleh dan panas laten. Beberapa sifat tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

2.4.1 Massa Jenis

Massa jenis atau densitas atau rapatan adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda. Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya. Massa jenis rata-rata setiap benda merupakan total massa dibagi dengan total volumenya. Minyak kelapa memiliki massa jenis sebesar 858 kg/m^3 .

2.4.2 Panas Spesifik

Panas spesifik yang dimiliki minyak kelapa pada fasa padat memiliki nilai $3,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. Sedangkan pada fasa cair minyak kelapa memiliki panas spesifik sebesar $4,1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

2.4.3 Panas Laten

Minyak kelapa memiliki panas laten yang cukup tinggi. Panas laten yang dimiliki minyak kelapa sebesar $103,5 \text{ kJ/kg}$. Pemanfaatan minyak kelapa sebagai penyimpanan energi panas menjadi suatu keuntungan karena minyak kelapa memiliki panas laten yang cukup tinggi. Tingginya panas laten pada parafin merupakan keuntungan sebagai thermal energy storage karena pada dasarnya material yang memiliki panas laten yang tinggi dapat menyerap dan menyimpan panas yang lebih banyak tanpa mengalami perubahan temperatur.

2.5 Aplikasi Material Berubah Fasa

Secara umum aplikasi Material berubah fasa dapat dibagi menjadi 2 (dua) kelompok utama yaitu isolator panas dan penyimpanan. Perbedaan kedua aplikasi tersebut berkaitan dengan konduktivitas panas dari bahan. Dalam beberapa hal isolator panas dibutuhkan nilai konduktivitas panas rendah,

sedangkan pada sistem penyimpanan nilai tersebut dapat menimbulkan masalah karena dapat mengeluarkan energi yang memadai tetapi tidak mempunyai kapasitas yang memadai untuk membuang energi secara cepat.

Penggunaan material berubah fasa untuk penyimpan panas pada bangunan merupakan aplikasi pertama yang dapat dijelaskan. Aplikasi pertama ini dijelaskan di literatur untuk penggunaan sebagai pemanas dan pendingin pada bangunan. Aplikasi material berubah fasa untuk bangunan sangat berguna, karena kemampuannya untuk membuat variasi suhu yang halus, sangat menjanjikan (Zalba, 2003).

Tabel 2. 5 Aplikasi material berubah fasa (Pudjiastuti, 2011)

No.	Aplikasi
1	Penyimpan panas dari energi matahari
2	Penyimpan pasif pada <i>bioclimstic building</i>
3	Pendingin pada bank es
4	Pemanas dan sanitasi air panas dalam ruang dengan peralatan komputer atau elektrik
5	Perlindungan panas pada makanan selama transportasi
6	Green house
7	Perlindungan panas untuk elektronik
8	Aplikasi medis (Transpor darah, vaksin)
9	Pendingin mesin

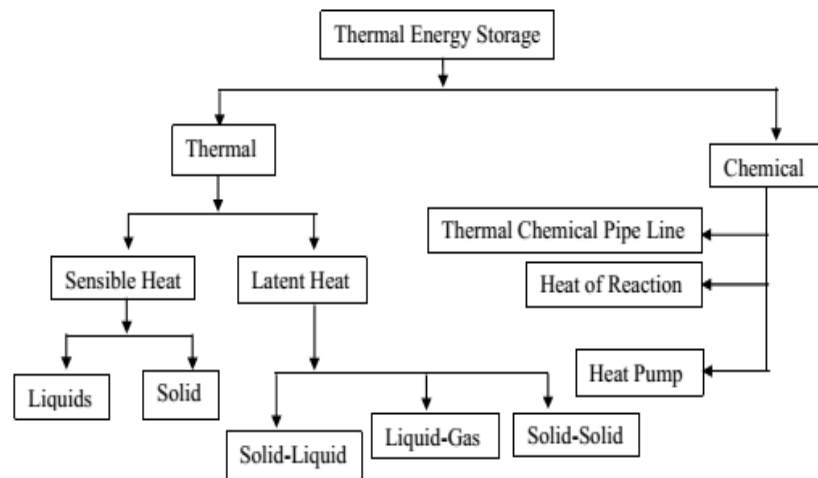
Pada Tabel 2.5 diatas menunjukan aplikasi yang bisa diterapkan menggunakan material berubah fasa. Aplikasi material berubah fasa dalam bangunan mempunyai dua tujuan yaitu memanfaatkan sumber panas alam yaitu energi panas matahari sebagai pemanasan atau dingin malam untuk pendinginan. Pada dasarnya ada tiga cara untuk menggunakan material berubah fasa sebagai pemanas atau pendingin bangunan, yaitu: material berubah fasa dalam dinding bangunan, dalam komponen bangunan lain selain dinding seperti genting, dan dalam unit pemanas atau pendingin. Penggunaan

material berubah fasa untuk menyerap udara dingin sudah dikembangkan untuk *air conditioning (AC)* dimana dingin diambil dari udara pada malam hari dan dikeluarkan pada saat yang paling panas di siang hari. Konsep ini dikenal sebagai pendinginan bebas. Aplikasi lain material berubah fasa pada bangunan adalah *refrigerator thermoelectric*.

Jika produk makanan ditransportasikan, suhu makanan tersebut harus dijaga di atas suhu tertentu atau bila produk beku harus dihindari *defrosting*. Situasi yang sama berlaku untuk aplikasi medis. Kedua aplikasi tersebut sangat pas dengan menggunakan PCM sebab PCM mempunyai kemampuan untuk melepaskan Panas dan dingin dalam rentang yang hanya beberapa derajat. Komponen elektronik cenderung mengalami kerusakan sangat cepat jika dioperasikan pada suhu di atas suhu kritisnya. Aplikasi PCM untuk produk ini sangat menjanjikan terutama karena PCM dapat beraksi secara pasif tanpa memerlukan sumber energi tambahan. Aplikasi yang lain adalah pada mesin *engine* dan mesin-mesin hidraulik seperti kendaraan bermotor. Dalam aplikasi ini pelepasan panas dengan cairan pendingin karena mesin sedang jalan. Ketika mesin berhenti, panas dilepaskan dan dapat digunakan untuk pemanas awal pada mesin saat baru menyala.

Cold storage juga banyak dikembangkan untuk aplikasi-aplikasi lain seperti mendinginkan sayuran, *pre-cooling* udara masuk pada turbin gas, atau menjaga suhu dalam ruangan yang berisi peralatan komputer atau elektrik. Demikian juga penggunaan *PCM* untuk menghemat energi pada *green house* telah banyak dipelajari.

2.6 Penyimpanan Energi Termal



Gambar 2.5 Klasifikasi penyimpanan energi termal (Sharma *et al*, 2009)

Pemanfaatan energi baru terbarukan saat ini banyak di teliti oleh manusia di seluruh belahan dunia. Ketersediaan akan energi fosil semakin hari persediaan akan semakin berkurang dan pada waktunya nanti penggunaan energi fosil akan tergantikan oleh energi baru terbarukan. Energi surya merupakan salah satu energi baru terbarukan yang paling banyak digunakan sebagai energi penghasil listrik maupun pemanas air (Buddhi D, 1977). Pemanfaatan energi surya tidak serta-merta tanpa ada masalah dari penggunaannya. Masalah yang sering dihadapi ialah sifat radiasi dari energi surya yang intermiten. Besarnya radiasi yang ditimbulkan dipengaruhi oleh waktu, kondisi cuaca dan posisi. Sehingga timbul lah teknologi yang sangat yang sering disebut dengan *Thermal Energy Storage* (Penyimpanan Energi Termal) dengan memanfaatkan material berubah fasa yang mampu menyimpan energi termal dalam bentuk panas maupun dingin. Penyimpanan energi termal dapat diklasifikasikan sebagai penyimpanan energi dalam bentuk panas sensibel, panas laten dan termokimia. Material berubah fasa memiliki keuntungan yaitu menyimpan panas dalam kapasitas besar dengan *volume* material yang kecil, penyerapan dan pengeluaran energi panas terjadi pada temperatur yang konstan (Buddhi D, 1977)

Dalam sistem penyimpanan energi sebagai panas laten, salah satu peran paling penting yaitu material penyimpan panas itu sendiri. Penggunaan material berubah fasa sebagai material penyimpan panas sering digunakan ialah parafin, garam hidrat, dan senyawa organik (Abhat, 1981). Tetapi material berubah fasa seperti parafin dan garam hidrat memiliki kelemahan yaitu nilai konduktivitas termal yang rendah sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama dalam proses pembekuan dan pelelehannya.

Oleh karena itu untuk mengatasi masalah tersebut dilakukan berbagai penelitian untuk mengidentifikasi konsep-konsep peningkatan laju perpindahan panas, salah satu caranya dengan menggunakan pengaduk, atau mengalirkan *slurry* dalam alat penukar panas. Tetapi metode ini akan meningkatkan biaya pembuatan alat penukar kalor dan menambah kompleksnya pembuatan alat penyimpanan energi termal. Energi panas dapat disimpan dalam bentuk panas sensibel dan panas laten atau gabungan panas sensibel dan panas laten. Pada penyimpanan panas sensibel energi panas yang disimpan dengan menaikkan temperatur suatu medium padat atau cair dengan menggunakan kapasitas panas yang dimiliki bahan. Penyimpanan suatu energi pada sebuah material dalam bentuk panas sensibel, panas laten dan termokimia atau kombinasi antara ketiganya biasa disebut dengan penyimpanan energi termal atau *thermal energy storage* (Kumar dan Shukia, 2015). Adapun penyimpanan panas dapat berupa :

2.6.1 Panas Sensibel

Panas sensibel merupakan energi panas yang dapat ditransferkan dalam bentuk perubahan temperatur. Jumlah energi panas yang tersimpan dalam bentuk panas sensibel dapat dihitung dengan :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT = m \cdot C_p (T_f - T_i) \dots \dots \dots (1)$$

Dilihat dari persamaan (1) diatas bahwa jumlah energi panas yang tersimpan dalam bentuk panas sensibel bergantung pada massa, nilai

panas spesifik dari bahan yang digunakan untuk menyimpan energi energi panas dan perubahan suhu.

2.6.2 Panas Laten

Panas laten merupakan energi panas yang dapat ditransferkan adalah dalam bentuk perubahan fasa dari suatu material. Pada prinsipnya penyimpanan panas laten adalah menyimpan panas dengan memanfaatkan panas laten dari bahan. Panas laten merupakan jumlah panas yang diserap atau dilepaskan selama perubahan fasa. Panas laten dibedakan menjadi dua yaitu, panas laten fusi dan panas laten penguapan. Panas laten fusi merupakan jumlah panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase padat ke fase cair material atau sebaliknya. Jumlah energi panas laten dalam suatu material dapat dihitung dengan :

$$Q_{total} = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_{pl} \cdot dT + \Delta x m L + \int_{T_2}^{T_3} m \cdot C_{ps} \cdot dT \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

m = masa PCM (kg)

C_{pl} = panas spesifik PCM fasa cair (kJ/kg.°C)

C_{ps} = panas spesifik PCM fasa padat (kJ/kg.°C)

L = panas laten PCM (kJ/kg)

Δx = pesentase padatan PCM yang terbentuk

2.7 Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses berpindahnya energi kalor atau panas (*heat*) karena adanya perbedaan temperatur. Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk meramalkan laju perpindahan panas terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan panas dapat

didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.7.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi pada suatu media padat, atau pada media fluida yang diam. Konduksi terjadi akibat adanya perbedaan temperatur antara permukaan yang satu dengan permukaan yang lain pada media tersebut. Konsep yang ada pada konduksi merupakan suatu aktivitas atomik dan molekuler. Sehingga peristiwa yang terjadi pada konduksi adalah perpindahan energi dari partikel yang lebih energetik (molekul yang lebih berenergi atau bertemperatur tinggi) menuju partikel yang kurang energetik (molekul yang kurang berenergi atau bertemperatur lebih rendah), akibat adanya interaksi antara partikel-partikel tersebut. Persamaan laju konduksi dikenal dengan Hukum Fourier (*Fourier Law of Heat Conduction*) tentang konduksi, yang persamaan matematikanya dituliskan sebagai berikut:

$$q_{kond} = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

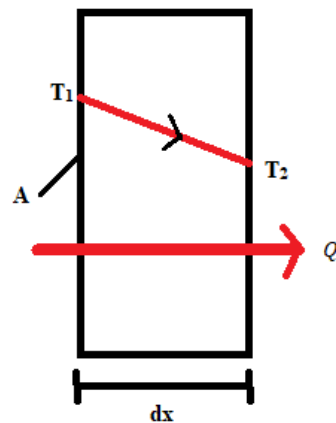
q_{kond} = Laju perpindahan panas konduksi (W)

$-k$ = Konduktivitas termal bahan (W/m.K)

A = Luas penampang tegak lurus terhadap arah aliran panas (m^2)

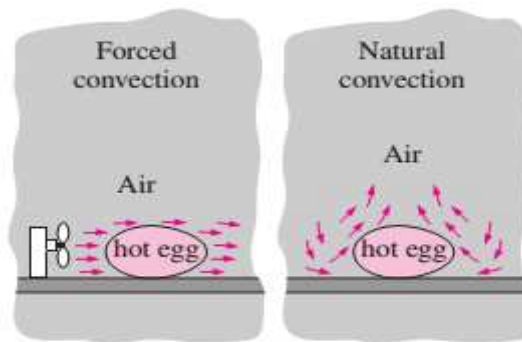
dT/dx = Gardien temperatur pada penampang tersebut (K/m)

Tanda (-) diselipkan agar memenuhi hukum Thermodinamika II, yang menyebutkan bahwa, panas dari media bertemperatur lebih tinggi akan bergerak menuju media yang bertemperatur lebih rendah.



Gambar 2.6 Proses Perpindahan Panas Secara Konduksi

2.7.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi



Gambar 2.7 Perpindahan Panas Konveksi (Cengel, 2003).

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin pendinginan dari secangkir kopi dll. Menurut cara menggerakkan 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 suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa / 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*).

Perpindahan panas konveksi bebas dan paksa dapat dilihat pada Gambar 2.7.

Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan

$$q = -hA (T_w - T_\infty) \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

- q = Laju Perpindahan Panas (kj/s atau W)
- $-h$ = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m².°C)
- A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (m²)
- T_w = Temperatur Dinding (°C, K)
- T_∞ = Temperatur Lingkungan (°C, K)

Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+). Persamaan (4) mendefinisikan tahanan panas terhadap konveksi. Koefisien perpindah panas permukaan h , bukanlah suatu sifat zat, akan tetapi menyatakan besarnya laju perpindah panas didaerah dekat pada permukaan itu.

2.7.3 Perpindahan Panas Secara Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah proses di mana panas mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan jika terdapat ruang hampa di antara benda-benda tersebut. Energi radiasi dikeluarkan oleh benda karena temperatur yang dipindahkan melalui ruang antara, dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila energi radiasi menimpa suatu bahan, maka sebagian radiasi dipantulkan sebagian diserap dan sebagian diteruskan. Sedangkan besarnya energi :

$$Q_{Radiasi} = \sigma A T^4 \dots\dots\dots(5)$$

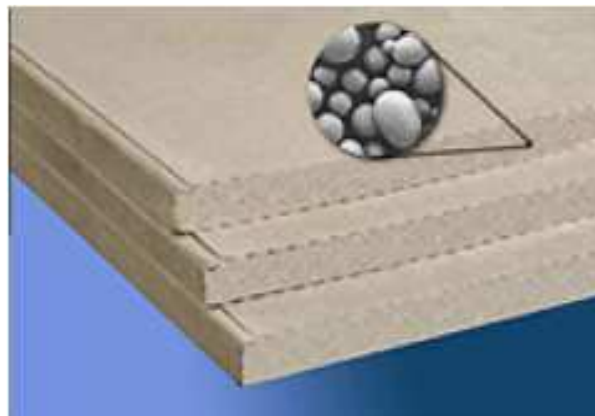
Keterangan :

$Q_{Radiasi}$	= Laju Perpindahan Panas (W)
σ	= Konstanta Boltzman ($5,669.10^{-8}$ W/m ² K ⁴)
A	= Luas Permukaan Benda (m ²)
T	= Suhu Absolut Benda (°C)

2.8 Metode Penggunaan PCM Sebagai Penyimpanan Energi Termal

PCM pada sebuah bangunan dapat diterapkan dengan beberapa metode penggabungan langsung (*direct incorporation*), metode pencelupan (*immertion*) dan metode enkapsulasi (*encapsulation*).

2.8.1 Metode Penggabungan Langsung (*Direct Incorporation*)



Gambar 2.8 Penggunaan PCM dengan metode *direct incorporation* (Zhou *et al*, 2011)

Metode penggabungan langsung dapat dilakukan dengan mencampurkan PCM dengan bahan-bahan bangunan seperti semen, *gypsum* dan *wallboard* secara langsung dimana kandungan dari PCM yang dicampur dengan bahan bangunan berbeda-beda bergantung dari material bangunannya. Metode penggabungan langsung dapat dilihat pada Gambar 2.8 diatas yaitu PCM *micronal* dari BSAF yang dicampur dengan *gypsum wallboard*.

2.8.2 Metode Pencelupan

Metode pencelupan yaitu dilakukan dengan cara mencelupkan bahan bangunan atau material seperti bata, gypsum dan kayu pada PCM panas, dengan menggunakan metode ini secara langsung PCM panas tersebut masuk ke dalam pori-pori bahan bangunan, sehingga pada saat penggunaan material sebagai bahan bangunan, material tersebut sudah mengandung PCM (Soares *et al*, 2012).

2.8.3 Metode Enkapsulasi (*Encapsulation*)



Gambar 2.9 Penggunaan PCM dengan metode enkapsulasi (Soares *et al*, 2012)

Penggunaan metode enkapsulasi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu metode makro-enkapsulasi dan metode mikro-enkapsulasi. Pada metode makro-enkapsulasi dilakukan dengan memasukkan PCM pada sebuah *storage* baik itu berbentuk kotak, silinder maupun bola, selanjutnya tabung tersebut dipadukan pada bangunan. Sedangkan metode mikro-enkapsulasi yaitu metode yang dilakukan dengan cara memadukan PCM pada sebuah bangunan secara langsung kemudian dilapisi dengan material yang tipis (Cabeza *et al*, 2011). Penggunaan metode enkapsulasi dapat dilihat pada Gambar 2.9.

2.9 Metode Peningkatan Laju Perpindahan Kalor PCM

Pemanfaatan PCM sebagai penyimpan energi termal telah banyak dilakukan walaupun nilai konduktivitas termalnya terbilang rendah. Sebagai contoh, parafin dengan konduktivitas termal 0,2 W/m.K sedangkan garam hidrat memiliki konduktivitas termal 0,5 W/m.k. Rendahnya konduktivitas termal PCM memperpanjang waktu yang diperlukan untuk menyerap dan melepaskan panas, misalnya pada saat proses menyerap panas pada siang hari dan melepaskan panas pada malam hari. Rendahnya nilai konduktivitas termal PCM menyebabkan proses penyerapan dan pelepasan panas tidak sempurna sehingga perlu adanya inovasi untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM, sehingga waktu yang diperlukan untuk menyerap dan melepaskan panas menjadi cepat.

Pada umumnya teknik yang digunakan untuk mempercepat perpindahan panas pada PCM ada dua macam yaitu menambah luas area permukaan perpindahan panas dan meningkatkan konduktivitas termal PCM. Peningkatan konduktivitas termal PCM dapat dilakukan dengan mencampurkan PCM secara langsung dengan material yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi seperti serat karbon dan grafit. (Liu dan Yang, 2017) telah melakukan penelitian mengenai peningkatan laju perpindahan panas dengan meningkatkan konduktivitas termal PCM parafin dengan menggunakan campuran grafit. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan grafit sebanyak 9% pada parafin dapat meningkatkan konduktivitas termal PCM hingga 2 kali lipat lebih tinggi dari parafin murni. Selain itu cara yang digunakan untuk mempercepat laju perpindahan panas pada PCM juga dapat dilakukan dengan penambahan luas area permukaan perpindahan panas. Teknik ini dapat dilakukan dengan cara memadukan PCM dengan *meta foam*, selain itu dapat juga menambahkan *fin* pada permukaan perpindahan panas (Pomianowski *et al*, 2013).

Penambahan luas area permukaan dengan *metal foam* pernah dilakukan oleh (Beyne *et al*, 2017) menunjukkan bahwa penelitiannya mengenai perpaduan

anatar metal foam dan PCM dapat mengurangi waktu proses pelepasan termal atau proses pembekuan lebih cepat 28%. Peningkatan nilai laju perpindahan panas PCM dengan cara memperluas area permukaan pada pipa coil dapat meningkatkan performa perpindahan panas hingga 100%, sehingga ketika proses pelepasan dan penyerapan termal pada PCM menjadi lebih cepat (Kukulka *et al*, 2015)

2.10 *Passive Cooling*

Material berubah fasa memiliki salah satu kegunaan yaitu berfungsi sebagai pendingin pasif (*passive cooling*), dengan sistem kerjanya menyeimbangkan suhu dan kelembaban secara alami dengan memanfaatkan aliran energi. Aliran energi pendingin pasif ini seperti konduksi, konveksi, dan radiasi tanpa menggunakan alat listrik (alamiah). Pendingin pasif bisa digunakan untuk menjaga temperatur bangunan dari panas. Teknik *passive cooling* dikelompokan seperti:

2.10.1 *Solar Shading*

Teknik *solar shading* sistem kerjanya menghambat masuknya radiasi cahaya matahari yang dapat masuk kedalam bangunan. Agar tidak terjadi pemanasan udara didalam bangunan, dapat diantisipasi dengan menggunakan jendela atau desain atap yang dapat memantulkan cahaya matahari.

2.10.2 *Air Ventilation*

Penggunaan ventilasi udara untuk membuat aliran panas dalam ruangan bertukar dengan temperatur rendah diluar bangunan. Aliran udara dalam ruangan mengkonveksi panas sehingga suhu dalam ruangan tetap terjaga.

2.10.3 *Insulation*

Isolasi berfungsi untuk menjaga ruangan dari masuknya panas maupun keluarnya panas. Antara desain *interior* dan *exterior* dipasang isolasi agar transfer panas dari dalam keluar bangunan sedikit.

2.10.4 Evaporative Cooling

Jadi udara yang diluar didinginkan dengan menguapkan air sebelum memasuki bangunan. Cara ini menggunakan prinsip bahwa panas dari udara digunakan untuk menguapkan air. Udara panas dialirkan melewati air dan akan menyerap panas sehingga suhu udara menjadi lebih rendah. Air yang digunakan dapat berupa kolam atau semprotan air kealiran udara.

2.10.5 Earth Coupling

Teknik ini menggunakan prinsip tanah sebagai media untuk menyerap panas. Ada dua cara yaitu dengan menggunakan terowongan udara dalam tanah dan dengan menggunakan tanah sebagai media untuk menahan panas (M. Arif, 2012)

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk menguji pendinginan ruangan dengan menggunakan material berubah fasa di dalam sebuah alat penukar kalor. Material berubah fasa yang digunakan pada penelitian ini adalah minyak kelapa, karena minyak kelapa merupakan material berubah fasa yang mudah di dapatkan di pasaran. Dalam penelitian ini alat utama yang digunakan dalam pengujian adalah penukar kalor tipe *shell and tube*. *Shell and tube* dipilih karena tipe ini merupakan salah satu alat penukar kalor dengan efektivitas terbaik karena dengan luasnya permukaan untuk terjadinya perpindahan panas pada permukaan *tube*. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data secara eksperimental sehingga dibutuhkan waktu dan tempat untuk melaksanakan pengujian. Adapaun waktu dan tempat pelaksanaan pengujian sebagai berikut.

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Pengambilan data penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung. Adapun pelaksanaannya dilakukan dari bulan November 2020 sampai dengan bulan April 2021.

3.2 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1 yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian

Kegiatan	Sept				Okt				Nov				Des				Jan				Feb				Mar				Apr				Mei			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 Studi Literatur	■	■	■	■																																
2 Persiapan Bahan Baku					■	■	■	■																												
3 Persiapan Alat Uji									■	■	■	■	■	■	■	■																				
4 Pengujian																	■	■	■	■	■	■	■	■												
5 Analisa Data																													■	■	■	■				
6 Penulisan Laporan																																	■	■	■	■

3.2.1 Studi Literatur

Pada penelitian ini dalam tahap studi literatur menyangkup beberapa hal diantaranya mengenai teori perpindahan panas, penyimpanan kalor, material berubah fasa, jenis-jenis material berubah fasa, pengaplikasian material berubah fasa, dan alat penukar kalor tipe *shell and tube*.

3.2.2 Persiapan

Adapun persiapan yang dilakukan dalam melakukan penelitian ini sebagai berikut :

1. Persiapan bahan baku

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini ialah material berubah fasa (PCM) jenis minyak kelapa. Persiapan meliputi mengukur jumlah volume minyak kelapa yang dibutuhkan dalam pengujian.

2. Persiapan alat uji

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *heat exchanger tipe shell and tube*

3.2.3 Pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan dengan dua proses yaitu pembekuan dan pelelehan PCM. Pada bagian ini yang akan dibahas ialah proses pelelehan minyak kelapa yang akan diberikan dua parameter pengujian yaitu temperatur udara masuk alat penukar kalor dan kecepatan udara masuk alat penukar kalor. Untuk temperatur udara masuk alat penukar yang digunakan ialah temperatur lingkungan ruangan pada rentang 30-31°C dengan kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s.

3.2.4 Analisis Data

Data-data pengujian yang didapatkan berupa temperatur masuk dan keluar alat penukar kalor serta temperatur PCM selanjutnya dilakukan perhitungan sehingga didapatkan analisis data yang sesuai dengan teori dasar penelitian.

3.2.5 Penulisan Laporan

Penulisan laporan adalah tahapan akhir dari penelitian. Penulisan laporan bertujuan untuk menunjukkan hasil penelitian yang telah dilakukan. Skema penulisan laporan terdiri dari pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, serta penutup.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

3.3.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian sebagai berikut :

1. Sistem pendingin

Sistem pendingin bertujuan sebagai sumber penghasil fluida udara pendingin PCM. Pada pendingin inilah dapat diatur temperatur udara masuk sebagai parameter pengujian. Sistem pendingin menggunakan mesin LG terlihat seperti Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Air Conditioner

2. *Heat Exchanger tipe shell and tube.*

Shell and tube digunakan sebagai alat pengujian ini, dimana pada bagian *shell* akan diisi oleh PCM jenis minyak kelapa, dimensi shell dengan diameter 30 cm dan panjang *shell* 100 cm. Di dalam *shell* terdapat pula rongga kosong berupa kumpulan *tube* dengan diameter 2 cm sebanyak 20 *tube*. *Tube* ini nantinya yang akan dilewati udara dingin dari mesin pendingin udara untuk menerima kalor dari PCM. Dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Shell and Tube*

3. *Tempertature recorder*

Temperature recorder berfungsi sebagai perekam hasil uji berupa temperatur pada titik yang telah di tentukan. *Temperatur recorder* yang digunakan merek Lutron BTM-4208SD. Selain itu pada *temperatur recorder* ini juga dilengkapi 12 lubang termokopel yang dapat mengukur temperatur $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam rentang waktu sampai 3600 detik seperti terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Temperature Recorder* dan Termokopel

4. *Blower*



Gambar 3.4 *Blower*

Pada penelitian ini *blower* digunakan sebagai alat untuk mengalirkan udara ke dalam alat penukar kalor serta

digunakan sebagai pengatur variasi kecepatan udara. Blower yang digunakan bermerek nankai dengan ukuran 2,5” dengan putaran 3000 rpm. Blower yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.4.

5. Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang melewati alat penukar kalor. Anemometer yang digunakan pada penelitian ini ialah Extech 45170 seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Anemometer

6. Minyak Kelapa

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini ialah minyak kelapa. Minyak Kelapa yang digunakan pada penelitian ini bermerek barco seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Minyak Kelapa

3.4 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data merupakan hal yang paling utama dalam melakukan pengujian. Metode pengambilan data pada pengujian ini sebagai berikut :

3.4.1 Pembekuan

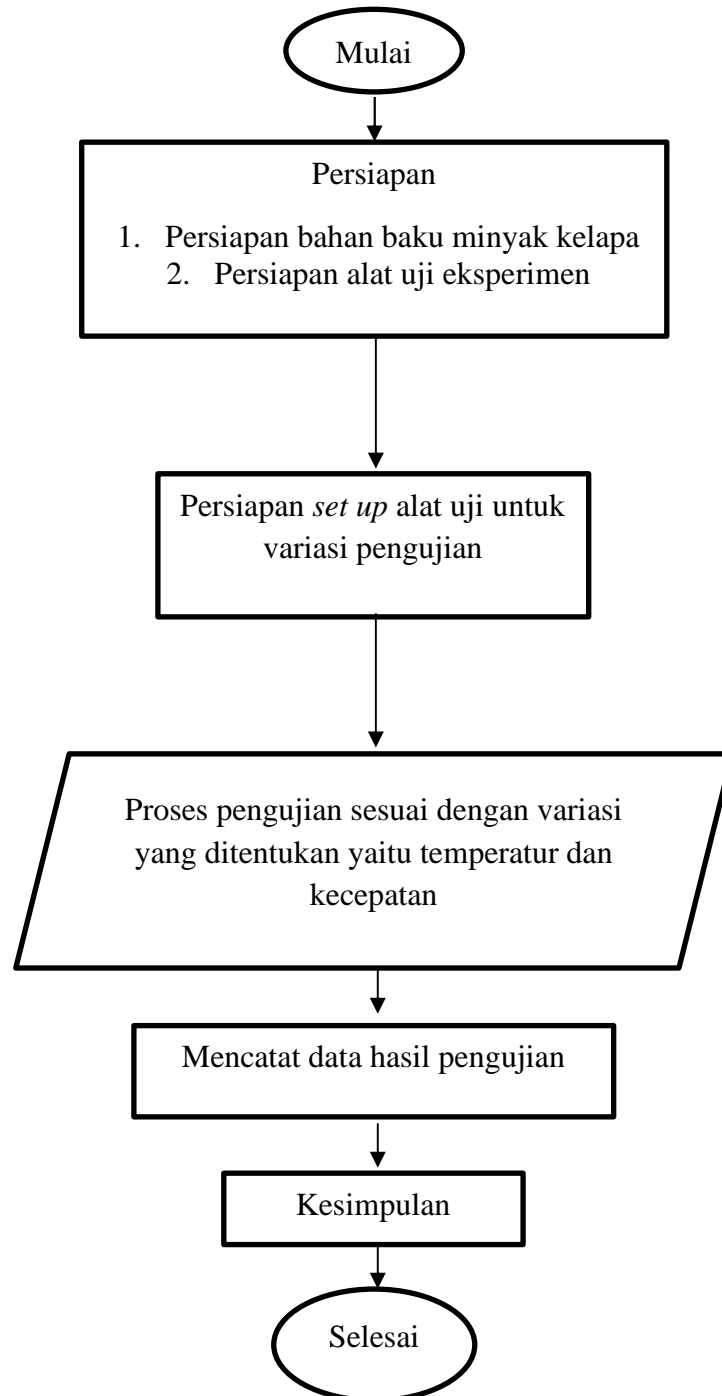
1. Menyiapkan alat yang akan digunakan seperti *air conditioner*, alat penukar kalor, *temperature record*, termokopel, dan *blower*, dan anemometer.
2. Mengukur *volume* PCM yang akan dimasukkan kedalam alat penukar kalor.
3. Memasukkan minyak kelapa yang telah dihitung *volume* yang dibutuhkan kedalam alat penukar kalor.
4. Memasang termokopel pada titik yang di tentukan di alat penukar kalor dan menyambungkannya ke termorekorder.
5. Menghubungkan kabel *air conditioner* dan *blower* pada stop kontak listrik.
6. Menghidupkan *air conditioner* dan *blower* dengan menekan saklar ON/OFF.
7. Mengatur temperatur setting AC dan kecepatan udara yang telah ditentukan tiap pengujian.
8. *Record* data temperatur pada *temperature recorder*.
9. Mengulangi langkah 6-8 dengan parameter pengujian yang telah ditentukan.

3.4.2 Pelelehan

1. Memasang termokopel pada titik yang di tentukan di alat penukar kalor dan menyambungkannya ke *temperature recorder*.
2. Menghubungkan kabel *blower* pada stop kontak listrik.
3. Menghidupkan *blower* dengan menekan saklar ON/OFF.
4. Mengatur kecepatan udara yang telah ditentukan tiap pengujian.

5. *Record* data temperatur pada termorekorder.
6. Mengulangi langkah 3-5 dengan parameter pengujian yang telah ditentukan

3.5 Alur Pengambilan Data



3.6 Variabel Pengujian

Pengujian perpindahan panas pada material berubah fasa berupa minyak kelapa di dalam *heat Exchanger* tipe *shell and tube* sebagai pendinginan udara memiliki 2 proses yaitu pembekuan dan pelelehan. diberikan variabel guna mengetahui hasil yang terbaik dalam proses perubahan fasa. Untuk proses pelelehan minyak kelapa variabel yang diberikan ialah kecepatan udara masuk alat penukar kalor dan temperatur udara masuk alat penukar kalor. Temperatur udara masuk alat penukar kalor yang digunakan ialah pada temperatur 30-31°C dan untuk kecepatan udara masuk yaitu 4 m/s, 5 m/s dan 6 m/s.

3.7 Pengolahan Data Perhitungan

Dalam penulisan hasil penelitian ada perhitungan-perhitungan yang dilakukan untuk menganalisis hasil penelitian. Dalam penelitian aplikasi material berubah fasa dari minyak kelapa di dalam alat penukar kalor tipe *shell and tube* ini hal utama yang menjadi fokus perhitungan adalah jumlah energi yang diserap/dilepas oleh minyak kelapa maupun udara dan laju perpindahan panas.

3.7.1 Menghitung Energi pada PCM

$$Q_{total} = \int_{T_1}^{T_{\infty}} m \cdot C_{pl} \cdot dT + \Delta x m L + \int_{T_{\infty}}^{T_2} m \cdot C_{ps} dT \dots\dots(6)$$

Keterangan :

- m = massa PCM (kg)
- C_{pl} = panas spesifik PCM fasa cair (kJ/kg.°C)
- C_{ps} = panas spesifik PCM fasa padat (kJ/kg.°C)
- L = panas laten PCM (kJ/kg)
- Δx = pesentase padatan PCM yang terbentuk

$$m = \rho \cdot V \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan :

m = massa PCM (kg)

ρ = massa jenis (kg/m³)

V = volum (m³)

3.7.2 Menghitung Laju Perpindahan pada Udara

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan :

\dot{q} = Laju perpindahan panas (kJ/s)

C_p = Panas Spesifik (kJ/kg.k)

ΔT = Perubahan temperatur (°C)

$$\dot{m} = \rho \cdot q \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan :

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

ρ = Massa jenis (kg/m³)

q = Debit (m³/s)

$$q = v \cdot A \dots \dots \dots (10)$$

Keterangan :

q = debit (m³/s)

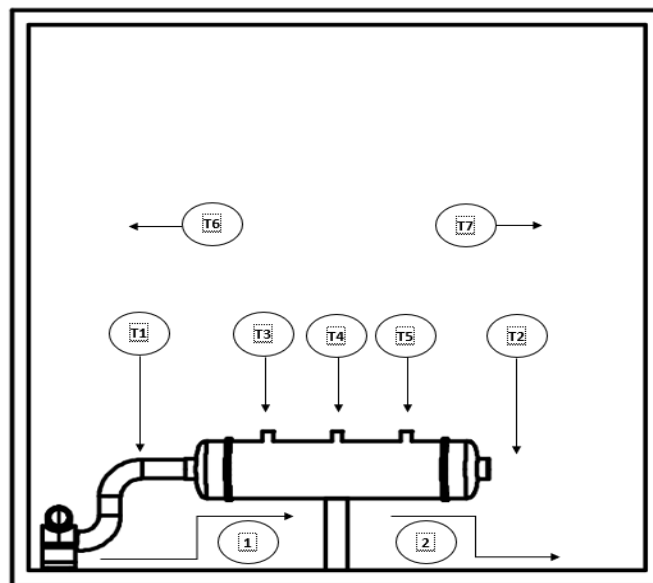
v = kecepatan fluida (m/s)

A = luas penampang pipa (m²)

3.8 Instalasi Alat Pengujian



Gambar 3.7 Instalasi pengujian



Gambar 3.8 Skema pengujian

Keterangan :

- T1 = Temperatur udara masuk
- T2 = Temperatur udara keluar
- T3, T4 dan T5 = Temperatur minyak kelapa
- T6 dan T7 = Temperatur ruangan

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan pengujian pembekuan dan pelelehan minyak kelapa di dalam *heat exchanger* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk proses pelelehan semakin tinggi temperatur udara masuk maka kenaikan temperatur minyak kelapa semakin besar, untuk kecepatan udaranya pun sama semakin tinggi kecepatan udara masuknya semakin besar kenaikan temperatur PCM karena laju aliran massa udara akan semakin besar sehingga perubahan temperatur yang didapatkan semakin besar.
2. Nilai laju perpindahan panas udara dipengaruhi oleh kecepatan udara sehingga semakin tinggi kecepatan udara maka nilai laju aliran massa udara semakin besar, hal ini menyebabkan pada pengujian variasi kecepatan 6 m/s dan temperatur awal minyak kelapa 21,2°C memiliki nilai laju perpindahan panas terbesar dibandingkan dengan variasi lain dengan nilai sebesar 0.34 kJ/s
3. Pada variasi kecepatan udara masuk 6 m/s dan temperatur awal PCM 21,2°C memiliki penurunan temperatur ruangan terbesar dengan nilai 1,8°C. Sedangkan pada variasi kecepatan udara masuk 4 m/s dengan temperatur awal PCM 23,3°C memiliki penurunan temperatur terkecil yakni sebesar 1,1°C. Kecepatan udara masuk yang tinggi menyebabkan nilai laju aliran massa yang besar pula sehingga energi yang diserap PCM akan semakin besar.

5.2 Saran

Agar hasil penelitian yang didapatkan lebih baik dari sebelumnya maka dapat diberikan saran-saran untuk kedepannya sebagai berikut :

1. Sebaiknya dalam merencanakan hasil penurunan temperatur ruangan yang lebih besar penggunaan minyak kelapa pun harus lebih banyak sebagai *thermal energy storage* karena semakin banyak jumlah *volume* minyak kelapa yang digunakan maka semakin besar kemampuan dalam menyimpan energi.
2. Dalam merancang alat penukar kalor selanjutnya disarankan memperbanyak saluran *tube* sehingga area perpindahan panas semakin luas maka laju perpindahan panas semakin besar dan energi yang tersimpan pada minyak kelapa semakin besar pula

DAFTAR PUSTAKA

- Abhat A. 1981. Performance studies of a finned heat pipe latent heat thermal energy storage system. Sun, NY: Pergamon Press
- Aminah, N. S., Mulijani, S., Sudirman, S., & Ridwan, R. (2018). Penentuan Daya Serap dan Karakterisasi Parafin dalam Perlakuan Penjerapan Minyak Jelantah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 5(3), 61-68.
- Beyne, W., Bağci, O., Huisseune, H., Canière, H., Danneels, J., Daenens, D., & De Paepe, M. 2017. Experimental investigation of solidification in metal foam enhanced phase change material. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 251, No. 1, p. 012112). IOP Publishing.
- Buddhi D. 1977. Thermal performance of a shell and tube PCM storage heat exchanger for industrial waste heat recovery. Presented at solar world congress Taejon: Korea.
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., de Graci, A. and Fernandez, A.I. 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1675–1695.
- Gasia, Jaume., Miro, Laia., Gracia, Alvaro de., Barreneche, Camila. and Cabeza, Luisa F. 2016. Experimental evaluation of a paraffin as phase change material for thermal energy storage in laboratory equipment and in a shelland-tube heat exchanger. *Applied Sciences*. Universitat de Lleida: Spain.
- Irsyad, M., Amrizal, A., Yulian, A. M., & Susila, M. D. (2020). Karakteristik Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Tipe Staggered Fins Berisi Material Fasa Berubah Dari Minyak Kelapa Pada Proses Pembekuan. *Rekayasa Mesin*, 11(2), 159-164.

- Jati, A. W. N., Satwiko, P., Purwijantiningih, E., & Leksono, S. B. 2010. Pengembangan Atap Organik Tropis Untuk Menghemat Energi Penyejukan Udara dan Menghindari Pemanasan Lingkungan. In *National Seminar & Workshop* (p. 51).
- Kalnas, Simen Edsjo. and Jelle, Bjorn Petter. (2015). Phase change materials and products for building applications: a state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*. 94(Supplement C), 150-176.
- Kumar, A. and Shukla, S.K. 2015. A review on thermal energy storage unit for solar thermal power plant application. *Energy Procedia* 74 (2015) 462 – 469.
- Lippsmeier, G (1980) *Tropenbau Building in the Tropics*. German : Callway
- Muchlis, M., & Permana, A. D. (2003). Proyeksi Kebutuhan Listrik PLN Tahun 2003 sd 2020. *Pengembangan Sistem Kelistrikan dalam Menunjang Pembangunan Nasional Jangka Panjang*, Jakarta.
- Pudjiastuti, Wiwik. 2011. Jenis-jenis bahan berubah fasa dan aplikasinya. Balai Besar Kimia dan Kemasan, Kementerian Perindustrian. Jakarta Timur.
- Putri, W. A., Sutjahja, I. M., Kurnia, D., & Wonorahardjo, S. (2015). Potensi minyak kelapa sebagai media penyimpan kalor laten (studi kasus: analisa lepasan kalor pada proses solidifikasi). *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains 2015*, 53-56.
- Sarier, N., & Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: an overview. *Thermochimica acta*, 540, 7-60.
- Santoso, A. D., & Salim, M. A. (2019). Penghematan Listrik Rumah Tangga dalam Menunjang Kestabilan Energi Nasional dan Kelestarian Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(2), 263-270.
- Sharma, S.D., and Sagara, K. 2005. Latent heat storage material and system: a review. *International journal green energy*. 2: 1-56,2005.

- Sharma A, V.V. Tyagi, C.R. Chen D. Buddhi. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy*.
- Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P. 2012. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings* 59 (2013) 82–103.
- Sugini. (2004). Pemaknaan Istilah-Istilah Kualitas Kenyamanan Thermal Ruang Dalam Kaitan Dengan Variabel Iklim Ruang. *Jurnal LOGIKA*, Vol. 1, No. 2, Juli 2004, ISSN: 1410-2315.
- Wahid, A. (2014). Analisis Kapasitas dan Kebutuhan Daya Listrik untuk Menghemat Penggunaan Energi Listrik di Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 2(1).
- Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H. 2003, Review On Thermal Energy Storage With Phase Change Material Heat Transfer Analysis and Applications. *ATE* 23(04): 251-283. PII:S1359-4311(02)00192-8
- Zhou, D., Zhao, C.Y., Tian, Y. 2011. Review on thermal energy storage with phase change materials (pcms) in building applications. *Applied Energy* 92 (2012) 593–605