KAJIAN *EXPERIMENTAL* PERPINDAHAN PANAS PADA *SHELL AND TUBE* BERISI *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)

(Skripsi)

Oleh

Sulton Imron

NPM 1615021001

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG

2021

ABSTRAK

KAJIAN *EXPERIMENTAL* PERPINDAHAN PANAS PADA *SHELL AND TUBE* BERISI *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)

Oleh
Sulton Imron

AC atau *air conditioner* sering kita jumpai pada setiap rumah, ruangan, atau gedung-gedung bertingkat di zaman modern ini untuk mengkondisikan udara secara cepat. Akan tetapi, AC atau *air conditioner* ini memiliki dampak negatif baik secara langsung ataupun tidak langsung seperti pemanasan global dan juga menghabiskan banyak energi. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai sistem atau alat yang mampu menghemat energi pada AC dengan cara mengurangi beban pendinginannya dan memanfaatkan energi alternatif. Solusi alternatif untuk mengurangi besarnya konsumsi energi AC yaitu dengan meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi besarnya beban pendinginan. Di Indonesia temperatur udara dingin pada malam hari dinilai memiliki potensi untuk membantu mendinginkan ruangan. Salah satunya yaitu menggunakan material berubah fasa (*phase change material* disingkat PCM). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh temperatur udara masuk dan kecepatan udara masuk terhadap perubahan temperatur (ΔT) pada *phase change material* serta laju pendinginan PCM pada *shell and tube*. Hasil dari uji pembekuan PCM menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara masuk dan penurunan temperatur udara masuk *heat exchanger* meningkatkan laju pendinginan pada PCM semakin tinggi. Hasil-hasil penelitian secara rinci terdapat dalam pembahasan skripsi ini.

Kata kunci : AC, PCM, Penyimpan Termal

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER ON SHELL AND TUBE CONTAINS PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)

By
Sulton Imron

We often encounter AC or air conditioner in every house, room, or high-rise building in this modern era to condition the air quickly. However, this AC or air conditioner has a negative impact, either directly or indirectly, such as global warming and also consumes a lot of energy. Therefore, further research is needed on systems or devices that can save energy in air conditioners by reducing the cooling load and utilizing alternative energy. An alternative solution to reduce the amount of AC energy consumption is to increase system efficiency and reduce the amount of cooling load. In Indonesia, the cold air temperature at night is considered to have the potential to help cool the room. One of them is using a phase change material (PCM abbreviated). This study aims to analyze the effect of intake air temperature and intake air velocity on temperature changes (ΔT) in the phase change material and PCM cooling rate on shell and tube. The results of the PCM freezing test showed that increasing the inlet air velocity and decreasing the temperature of the heat exchanger inlet air increased the cooling rate of the PCM. Detailed research results are contained in the discussion of this thesis.

Keywords: AC, PCM, Thermal Storage

KAJIAN *EXPERIMENTAL* PERPINDAHAN PANAS PADA *SHELL AND TUBE* BERISI *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)

Oleh

Sulton Imron

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021

Judul Skripsi	:	**KAJIAN *EXPERIMENTAL* PERPINDAHAN PANAS PADA *SHELL AND TUBE* BERISI *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)**
Nama Mahasiswa	:	Sulton Imron
Nomor Pokok Mahasiswa	:	**1615021001**
Jurusan	:	**Teknik Mesin**
Fakultas	:	**Teknik**

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1	Komisi Pembimbing 2
Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.	**Dr. Harmen, S.T., M.T.**
NIP 19711214 200012 1 001	NIP 19690620 200003 1 001

Ketua Jurusan Teknik Mesin	Kepala Program Studi S1 Teknik Mesin
Dr. Amrul, S.T., M.T.	**Novri Tanti, S.T., M.T.**
NIP 19710331 199903 1 003	NIP 19701104 199703 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

Anggota : **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 : **10 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

Sulton Imron
1615021001

RIWAYAT HIDUP

Penulis memiliki nama lengkap Sulton Imron yang biasa dipanggil dengan nama Sulton. Penulis lahir pada tanggal 03 September 1997 di Tanjung Karang. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara dari pasangan Bapak Abdul Gani dan Ibu Idawati. Penulis mengawali pendidikan di TK Kartika. Kemudian melanjutkan pendidikan jenjang sekolah dasar di SDN 1 Langkapura selama 6 tahun dan lulus pada tahun 2010. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan jenjang sekolah menengah pertama selama 3 tahun di SMPN 14 Bandar Lampung dan lulus tahun 2013. Pendidikan jenjang sekolah menengah atas penulis tempuh dalam waktu 3 tahun di SMAN 3 Bandar Lampung dan lulus pada taun 2016. Penulis melanjutkan pendidikan jenjang perguruang tinggi di Universitas Lampung pada tahun 2016 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik melalui jalus masuk SNMPTN.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota divisi kreativitas. Pada semester 6 (tahun 2018) penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Desa Gunung Katon, Lampung Utara. Pada semester 7 penulis melakukan kerja praktik di PT. Indocement Tunggal Prakarsa selama bulan Agustus 2019. Selama kerja praktik penulis melakukan observasi dan pembelajaran di lapangan di bagian *mechanical maintenance* dan membuat laporan kerja praktik Unjuk Kerja Screw Compressor KHE 75-10 Pada Temperatur Dan Tekanan Berbeda di PT. Indocement Tunggal Prakarsa. Memasuki semester 9 (tahun 2020) penulis mulai mengambil tugas akhir di laboratorium termodinamika mengambil judul skripsi “Kajian Experimental Perpindahan Panas Pada *Shell And Tube* Berisi PCM”. Selagi melakukan

penelitian tugas akhir, penulis menjadi salah satu anggota tim dalam asisten laboratorium termodinamika. Dalam melakukan penelitian tugas akhir, penulis dibimbing oleh Dr. Muhammad Irsyad, S.T.,M.T. dan Dr. Harmen, S.T., M.T.

QUOTES

“Carilah uang sebanyak-banyaknya agar dapat berbagi kepada orang yang membutuhkan”

(Sulton Imron)

“Niatkan semua karena Allah Subhannahu Wa Ta’ala”

(Sulton Imron)

“Jangan menjelaskan tentang dirimu kepada siapapun, karena yang menyukaimu tidak membutuhkan itu dan yang membencimu tidak percaya itu”

(Ali bin Abi Thalib)

“Mahkota seseorang adalah akalnya. Derajat seseorang adalah agamanya. Sedangkan, kehormatan seseorang adalah budi pekertinya”

(Umar bin Khattab)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Yang Maha Kuasa karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "KAJIAN *EXPERIMENTAL* PERPINDAHAN PANAS PADA *SHELL AND TUBE* BERISI *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM)". Sholawat serta salam semoga tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW.

Skripsi ini ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat wajib perkuliahan 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. Pelasksanaan penelitian ini dilakukan sejak bulan April 2020.

Selama pelaksanaan penelitian berlangsung penulis dibantu dan diberikan saran oleh berbagai pihak sehingga terealisasinya skripsi ini. Pada kesempatan ini penulis ingin memgucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak Abdul Gani dan Ibu Idawati yang telah mendukung dan mendoakan penulis sehingga dapat semangat dan lancar dalam menjalankan studi di Teknik Mesin Universitas Lampung.
2. Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
3. Dr. Amrul S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Ibu Novri Tanti S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.

5. Dr. Muhammad Irsyad S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 1 Tugas Akhir Skripsi yang telah membimbing dalam penyusunan skripsi.
6. Dr. Harmen S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 2 Tugas Akhir Skripsi yang telah membimbing dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak Amrizal S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembahas Tugas Akhir Skripsi penulis.
8. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas lampung yang telah mengajarkan banyak pengetahuan kepada penulis.
9. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
10. Husna Jatsiyah selaku adik penulis dan seluruh keluarga serta saudara penulis yang telah memberikan dukungan dan doa.
11. Tim Laboratorium Termodinamika
12. Teman-teman Angkatan 2016 yang telah bersama-sama studi dan berdiskusi serta memberikan motivasi, dan memberi dorongan dan semangat.
13. Semua pihak yang telah mendukung penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu, penulis ucapkan terima kasih semoga Allah SWT memberikan keberkahan.

Penulis menyadari masih terdapatnya kekurangan dalam skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak agar dapat berkembang dan menjadi lebih baik dari sebelumnya. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna dan dapat bermanfaat bagi banyak pihak dan bagi pembaca serta bagi penulis khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 4 Oktober 2021

Sulton Imron
1615021001

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI ..... **i**

DAFTAR TABEL ..... **iii**

DAFTAR GAMBAR ..... **iv**

DAFTAR SIMBOL ..... **vi**

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang 1
1.2 Tujuan 4
1.3 Batasan Masalah 4
1.4 Sistematika Penulisan 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas 6
2.1.1 Konduksi 6
2.1.2 Konveksi 7
2.1.3 Radiasi 8
2.2 Alat Penukar Kalor 8
2.2.1 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor 9
2.2.2 *Shell and Tube Heat Exchanger* 10
2.2.3 *Desain Tube* 12
2.3 Metode Penyimpanan Energi 14
2.4 Penyimpanan Energi Termal 14
2.4.1 Panas Sensibel 15
2.4.2 Panas Laten 16
2.5 *Phase Change Materials* (PCM) 19
2.6 Klasifikasi *Phase Change Materials* 19
2.6.1 Parafin 19
2.6.2 Non Parafin 21
2.7 Sifat-sifat Parafin 25
2.7.1 Masa Jenis 25
2.7.2 Panas Spesifik 26
2.7.3 Konduktifitas Termal 26
2.7.4 Panas Laten 27

2.7.5 Temperatur Leleh 27
2.8 Sifat–sifat Minyak Kelapa 28
2.9 Pengaplikasian PCM 30
2.10 Metode Peningkatan Laju Perpindahan Kalor PCM 31

BAB III METODOLOGI PENELITIAN
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 33
3.1.1 Tempat penelitian 33
3.1.2 Waktu Penelitian 33
3.2 Alat dan Bahan Penelitian 34
3.2.1 *Shell And Tube* 34
3.2.2 *Air Conditioner* 35
3.2.3 *Blower* 35
3.2.4 Anemometer 36
3.2.5 *Thermo Recorder* 36
3.2.6 Termokopel 37
3.2.7 Minyak Barco 37
3.3 Prosedur Pengujian 38
3.4 Variabel Pengujian 38
3.5 Pengolahan Data Perhitungan 39
3.4.1 Perhitungan untuk panas yang dilepas oleh PCM 39
3.4.2 Perhitungan untuk panas yang diserap udara 39
3.6 Pengaplikasian Alat Pengujian 40
3.5.1 Skema Proses Pendinginan 40
3.5.2 Pengaplikasian Alat Setelah Dibuat 41
3.7 Diagram Alir Penelitian 41

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Pengaruh Temperatur Udara Masuk Terhadap Laju Pendinginan PCM 42
4.2 Pengaruh Laju Aliran Udara terhadap Laju Pendinginan PCM 48
4.3 Pengaruh Kecepatan Udara Masuk Terhadap Laju Perpindahan Panas Yang Diserap Udara 52
4.4 Kesetimbangan Energi 55

BAB V SIMPULAN DAN SARAN
5.1 Simpulan 60
5.2 Saran 60

DAFTAR PUSTAKA 62

LAMPIRAN 64

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

1. Karakteristik Parafin (sharma, 2009) 20
2. Aplikasi PCM.....30
3. Jadwal Rencana Kegiatan Penelitian 34
4. Variasi Pengujian Proses Pembekuan 38
5. Hasil perhitungan pada temperatur rata-rata udara masuk 14,13°C 55

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

1. Perpindahan panas secara konduksi pada sebuah dinding dengan ketebalan Δx dan penampang A (Cengel, 2006) 7
2. Kondensor (Haryadi, 2012) 9
3. Konstruksi *Shell And Tube* 11
4. Desain U-*tube* (Yudha, 2018) 12
5. Desain *Fix Tube Seet* (Yudha, 2018) 13
6. Desain *Floating Head* (Yudha, 2018) 13
7. Tipikal perubahan PCM pada diagram tekanan terhadap temperatur (Wu, S. 2010) 16
8. Tipikal perubahan PCM pada diagram tekanan terhadap volume (Wu, S. 2010) 16
9. Asam Lemak 23
10. PCM Garam Hidrat (Tisa, 2016). 24
11. Minyak Barco 29
12. *Shell and Tube* 34
13. *Air Conditioner* (AC) 35
14. *Blower* 35
15. Anemometer 36
16. *Thermo Recorder* 36
17. *Thermo Couple* 37
18. Minyak Barco 37

19. Skema proses pendinginan 40

20. Pengaplikasian Alat Setelah Dibuat 41

21. Diagram Alir Penelitian 41

22. Laju pendinginan PCM dengan kecepatan 6 m/s 42

23. Laju pendinginan PCM dengan kecepatan udara 5 m/s 43

24. Laju pendinginan PCM dengan kecepatan udara 4 m/s 44

25. Kondisi PCM pada suhu 19,7 °C dengan udara masuk HE 14,13 °C kecepatan udara 6 m/s 46

26. Kondisi PCM pada suhu 20,8 °C dengan udara masuk HE 14,13 °C Kecepatan Udara 5 m/s 47

27. Laju pendinginan PCM untuk berbagai kecepatan udara masuk HE dengan temperatur rata-rata udara masuk HE 15,96 °C.....48

28. Laju pendinginan PCM untuk berbagai kecepatan udara masuk HE dengan temperatur rata-rata udara masuk HE 16,71 °C.....49

29. Laju pendinginan PCM untuk berbagai kecepatan udara masuk HE dengan temperatur rata-rata udara masuk HE 17,07 °C.....50

30. Pengaruh kecepatan udara masuk terhadap laju perpindahan panas yang diserap udara 53

31. Energi yang dilepas PCM dan energi yang diserap oleh udara pada kecepatan 6 m/s 56

32. Energi yang dilepas PCM dan energi yang diserap oleh udara pada kecepatan 5 m/s 56

33. Energi yang dilepaskan PCM dan energi yang diserap oleh udara pada kecepatan 4 m/s 57

DAFTAR SIMBOL

k = Konduktivitas Termal Material (W/m.K)

h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m^2.K)

A = Luas Penampang Material (m^2)

ΔT = Perbedaan Temperatur (K,°C)

T = Temperatur (K,°C)

Δx = Ketebalan Material (m)

Cpl = Panas Spesifik Saat Keadaan Liquid (kJ/kg.K)

Cps = Panas Spesifik Saat Keadaan Solid (kJ/kg.K)

m = Massa PCM (kg)

Q_{sensibel} = Panas Sensibel Yang Tersimpan (kJ)

Q_{laten} = Panas Laten Yang Tesimpan (kJ)

ΔX = Fraksi beku (%)

L_{pcm} = Kalor lebur (kJ/kg)

ρ = Massa Jenis (kg/m^3)

ṁ = Laju Aliran Massa (kg/s)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kalor atau panas umumnya merupakan suatu bentuk perpindahan energi dari atau ke suatu benda yang menyebabkan benda tersebut mengalami perubahan temperatur. Kalor berbeda dengan temperatur, karena temperatur adalah sifat fluida yang diukur dalam derajat (°C, K, °F, R). Kalor merupakan bentuk energi yang dapat ditransfer dari satu sistem ke sistem lainnya akibat dari perbedaan temperatur (Cengel, 2006).

Kalor utamanya diperoleh dari energi panas radiasi matahari, tersedia untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia dan makhluk lainnya di muka bumi. Sayangnya energi ini masih mempunyai kelemahan dalam penggunaanya, yaitu hanya tersedia pada siang hari, maka bila ingin menggunakan pada malam hari, energi tersebut harus disimpan melalui penyimpan kalor atau menggunakan alat penukar panas, pada siang hari energi dapat disimpan dan pada malam hari energi dilepaskan, sehingga penggunaan energi panas matahari dapat pada siang dan malam hari.

Alat penyimpan kalor sangat berguna pada zaman modern ini dikarenakan mampu menjawab tentang bagaimana penghematan sebuah energi. Selain itu juga dapat lebih efisien dan efektif dalam penggunaan peralatan dan mengurangi polusi udara. Alat penyimpan kalor ini juga memiliki keuntungan lebih ekonomis dalam hal biaya operasional, terutama bila harga listrik bervariasi terhadap waktu. Misalnya harga listrik lebih murah pada tengah malam dibanding waktu lainnya. AC atau *air conditioner* sering kita jumpai pada setiap rumah, ruangan, atau gedung-gedung bertingkat di zaman modern

ini untuk mengkondisikan udara secara cepat. Akan tetapi, AC atau *air conditioner* ini memiliki dampak negatif baik secara langsung ataupun tidak langsung seperti pemanasan global dan juga menghabiskan banyak energi. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai sistem atau alat yang mampu menghemat energi pada AC dengan cara mengurangi beban pendinginannya dan memanfaatkan energi alternatif.

Salah satu alternatif untuk menghemat energi yaitu dengan cara memanfaatkan temperatur lingkungan pada malam hari yang suhunya relatif rendah di Indonesia dan dibantu dengan PCM sebagai medianya untuk membantu mengkondisikan udara ruangan. PCM itu sendiri mampu melepaskan dan menyerap panas mendekati suhu konstan dan dapat juga menyimpan energi dan mengontrol suhu (Wang, 2008).

Penggunaan *Phase Change Material* (PCM) sebagai material penyimpan kalor laten merupakan salah satu metode yang perlu dipertimbangkan, karena dengan menyimpan bentuk kalor laten mampu menyimpan energi panas lebih banyak dibanding menyimpan dalam bentuk sensibel. PCM adalah material yang mempunyai kemampuan untuk melepaskan energi panas yang tinggi dan dalam waktu yang cukup lama tanpa perubahan suhu (Meng, 2008).

PCM dapat melepaskan dan menyerap panas mendekati suhu konstan dan dapat juga menyimpan energi dan mengontrol suhu (Wang, 2008). PCM itu sendiri dapat berasal dari sumber material organik seperti asam lemak, paraffin hingga gula alkohol. Selain material organik, material anorganik seperti garam-garam hidrasi juga dapat digunakan sebagai PCM.Material lain yang dapat digunakan adalah biomaterial seperti asam lemak dari hewan dan minyak-minyak tumbuhan yang memenuhi syarat penggunaan PCM seperti aman digunakan, tidak beracun, harga terjangkau, tidak sulit untuk memperolehnya.

Menurut Zhou, D (2011) *free cooling* adalah sebuah konsep pengembangan untuk aplikasi pengkondisian udara. Dalam hal ini pendinginan didapat dari udara lingkungan pada malam hari dan melepaskan udara dingin pada waktu

siang hari. Hal ini terjadi karena pada malam hari, udara luar melewati sistem penyimpanan panas *thermal* laten untuk mendinginkan PCM, kemudian pada siang hari udara dingin yang tersimpan didalam PCM akan mendinginkan ruangan begitupun seterusnya.

Untuk pengkondisian udara pada malam hari dan siang hari maka diperlukan alat penyimpan kalor atau *thermal storage* salah satu jenisnya adalah tipe *shell and tube*. Penyimpan kalor tipe *shell and tube* sangat menarik perhatian karena bentuknya sederhana, sehingga sering diteliti untuk menunjukkan karakteristiknya, diantaranya perubahan temperatur pada PCM selama proses peleburan (Hamdani et al, 2018).

Beberapa PCM yang cocok untuk menyerap panas pada siang hari dan melepas panas pada malam hari di Indonesia dalam hal ini PCM parafin dan minyak kelapa. Parafin adalah PCM yang memiliki range temperatur titik lebur 5,5 °C – 75,9 °C sesuai dengan nomor atom karbonnya. Kalor laten minimum 228 kJ/kg – 269 kJ/kg sesuai dengan nomor atomnya (Sharma, 2009).

Minyak kelapa juga memiliki potensi karena memiliki temperatur perubahan fasa pada temperatur sebesar 23 °C. Minyak kelapa merk barco memiliki kalor laten sebesar 103,5 kJ/kg dan kalor jenis minyak kelapa memiliki *laten heat fusion* sebesar 249 kJ/kg, panas spesifik saat padat sebesar 3,2 kJ/kg°C dan panas spesifik pada keadaan cair sebesar 4,1 kJ/kg°C (Fransisco, 2020). Sehingga sesuai sebagai bahan penyimpan energi termal pada *shell and tube*. Untuk mengetahui kemampuan PCM dalam melepas panas sampai berubah fasa pada *shell and tube* yang digunakan sebagai penyimpan panas atau *thermal storage*, maka saya mengambil judul kajian *experimental* perpindahan panas pada *shell and tube* berisi *phase change material* (PCM).

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh temperatur udara masuk dan kecepatan udara masuk terhadap penurunan temperatur minyak kelapa.
2. Menganalisa pengaruh temperatur udara masuk dan kecepatan udara terhadap laju pendinginan minyak kelapa.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan lebih terfokus dan dapat mencapai tujuan yang telah ditetapkan, berikut beberapa batasan masalah dari penelitian ini :

1. Ukuran dari alat penukar panas jenis *shell and tube* yakni panjang *shell* 1 meter, diameter *shell* 30 cm dengan panjang *tube* 1 meter, diameter *tube* 20 mm, dan jumlah *tube* 20.
2. Temperatur masuk udara untuk proses pendinginan yang digunakan yakni pada 18°C, 20°C, dan 22°C.
3. Variasi kecepatan udara yang digunakan pada proses pembekuan adalah 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s.
4. Dimensi ruangan 3,38 m x 2,49 m x 2,97 m
5. Menggunakan minyak kelapa barco cair pada bagian *shell*, dan udara pada bagian *tube*.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan oleh penulis dalam penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Berisi uraian latar belakang, tujuan dan batasan masalah dalam penulisan laporan serta sistematika yang digunakan penulis dalam menyusun laporannya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori-teori dasar atau literatur yang menjadi pedoman atau acuan yang berhubungan dengan penelitian ini.

III. METODE PENELITIAN

Berisi mengenai waktu dan tempat, alur atau tahapan, serta metode - metode yang digunakan oleh penulis dalam pelaksanaan penelitian.

IV. DATA dan PEMBAHASAN

Berisikan data-data yang diperolah dari hasil penelitian yang telah dilakukan beserta pembahasan pengaruh berbagai parameter yang pada penelitian ini.

V. PENUTUP

Berisikan simpulan dari hasil penelitian yang diperoleh serta saran yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

Berisi sumber dan referensi yang digunakan oleh penulis dalam menyusun laporan penelitian ini.

LAMPIRAN

Berisi data pelengkap seperti gambar, dan beberapa data pendukung untuk menunjang kredibilitas laporan penelitian ini.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

Proses perpindahan panas yang sebenarnya terjadi adalah sangat rumit dan memerlukan pengkajian yang cukup sulit. Oleh karena itu dilakukan berbagai cara penyederhanaan dalam peninjauan proses tersebut yaitu dengan jalan memperhatikan hal-hal yang kurang berpengaruh terhadap proses keseluruhan. Dengan dasar penyederhanaan tersebut perpindahan panas dapat dibedakan atas tiga jenis yaitu konveksi, konduksi dan radiasi. Uraian pembahasan adalah sebagai begai berikut:

2.1.1 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan energi dari partikel dengan energi yang lebih besar ke energi yang lebih kecil yang letaknya berdekatan. Konduksi bisa tejadi pada benda padat, cair maupun gas. Laju perpindahan panas konduksi melalui perantara atau media yang bergantung pada ukuran perantara, ketebalan perantara, material perantara dan perbedaan temperatur antara medianya dirumuskan pada Persamaan 1 sebagai berikut :

$$Q_{konduksi} = -k\, A_S \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

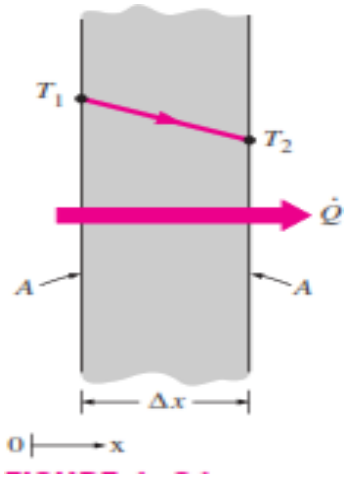
Dimana :

k = Konduktivitas termal material

A_S = Luas Penampang Material

ΔT = Perbedaan Temperatur

Δx = Ketebalan Material



Gambar 1. Perpindahan panas secara konduksi pada sebuah dinding dengan ketebalan Δx dan penampang A (Cengel, 2006)

2.1.2 Konveksi

Perpindahan panas konveksi merupakan perpindahan panas terjadi di antara permukaan sebuah benda padat dengan fluida yang mengalir menyentuh permukaan tadi. Misalnya dinding pipa logam yang menjadi panas atau dingin akibat fluida panas atau dingin yang mengalir di dalamnya. Hal ini bisa dikatakan bahwa perpindahan panas dapat terjadi pada kedua fluida dengan temperatur yang berbeda dengan pembatas berupa dinding padat yang dirumuskan dengan Persamaan 2 sebagai berikut.

$$Q_{konveksi} = h\, A_s \frac{Ts}{T\infty} \quad \text{.....(2)}$$

Dimana :

h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi

A_s = Permukaan Benda

Ts = Temperatur Benda

T∞ = Temperatur Lingkungan

2.1.3 Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh materi dalam bentuk gelombang elektromagnetik sebagai akibat dari perubahan konfigurasi elektronik dari atom atau molekul. Tidak seperti halnya konduksi atau konveksi, pada radiasi tidak memerlukan suatu media untuk mentransfer energi tersebut. Transfer energi pada radiasi adalah yang tercepat yaitu pada kecepatan cahaya dan tidak mengalami redaman dalam ruang hampa dirumuskan dengan Persamaan 3 sebagai berikut.

$$q_r = \varepsilon . \sigma . A . (\Delta T^4)$$

$$q_r = \varepsilon . \sigma . A . (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{.....(3)}$$

Dimana: q_r : Laju perpindahan panas radiasi W

A : Luas penampang bidang m^2

T : Temperatur ^oC

σ : Konstanta Stefan-Boltzman $W/_{m^2K^4}$

ε : Emisivitas bahan (benda putih:0) (benda hitam:1)

Nilai emisivitas memiliki rentang (0< σ <1), hal ini merupakan perbandingan emisivitas sebuah permukaan benda terhadap benda hitam. Benda hitam atau *blackboby* sendiri adalah benda yang memiliki emisivitas terbesar yaitu 1.

2.2 Alat Penukar Kalor

Penukar kalor adalah sebuah perangkat atau media tempat berlangsungnya proses perpindahan panas. Pada alat penukar kalor sejumlah tertentu energi panas mengalami proses perpindahan dari suatu aliran fluida panas ke aliran fluida lainnya yang temperaturnya lebih rendah. Proses perpindahan kalor tersebut berlangsung melalui perantaraan suatu permukaan dinding atau media pemisah dengan bentuk dan bahan yang beragam. Jenis dan ukuran alat penukar kalor sangatlah beragam dan masing-masing dirancang untuk memenuhi kebutuhan yang tertentu.

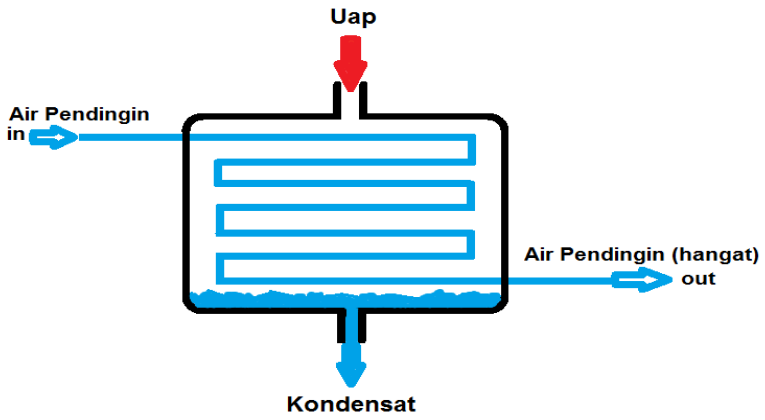
Seperti namanya, penukar panas adalah perangkat di mana dua cairan mengalami pertukaran panas tanpa pencampuran. Penukar panas banyak digunakan diberbagai industri, dan dalam berbagai desain.Bentuk paling sederhana dari penukar panas adalah *double tube heat exchanger*, terdiri dari dua pipa konsentrik dengan diameter berbeda. Satu cairan mengalir di pipa bagian dalam, dan yang lain di ruang annular antara dua pipa, hal ini fluida panas dapat dengan cepat melepas panas kepada fluida yang lebih dingin dikarenakan fluida panas langsung berkontak pada dinding yang memisahkan antar kedua fluida.

2.2.1 Jenis-jenis Alat Penukar Kalor

Pada sistem termal yang berfungsi untuk menghasilkan aliran uap air, aliran uap air dihasilkan dari proses pemanasan permukaan bagian luar *tube* oleh gas pembakaran. Pada bagian dalam *tube* disirkulasikan aliran air yang menyerap sejumlah energi panas yang berasal dari aliran gas panas melalui perantaraan permukaan dinding *tube*.dalam aplikasinya ada beberpa jenis alat penukar kalor yang dipergunakan yakni sebagai berikut:

1. Kondensor

   Kondensor adalah alat yang berfungsi menukar panas yang digunakan untuk mendinginkan fluida sampai terjadi perubahan fase dari fase uap menjadi fase cair seperti terlihat pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Kondensor (Haryadi, 2012)

2. *Chiller*

   Chiller adalah alat penukar panas yang menggunakan sistem pendingin untuk melepaskan panas ke lingkungan. Chiller juga dapat dikategorikan sebagai mesin pendingin pilihan untuk mengkondisikan fasilitas industri dan fasilitas umum. Temperatur pendingin di dalam *chiller* jauh lebih rendah dibandingkan dengan pendinginan yang dilakukan oleh pendingin air. Media pendingin yang digunakan antara lain freon.

3. *Heater*

   Heater merupakan alat penukar kalor yang bertujuan memanaskan (menaikkan suhu) suatu fluida proses dengan menggunakan media pemanas. Media pemanas yang biasa digunakan antara lain uap atau fluida panas lain serta ada juga yang bersumber tenaga listrik. *Heater* dengan energi listrik ini biasa digunakan pada pemanas air, penanak nasi, serta pada kompor yang menggunakan energi listrik.

4. *Evaporator*

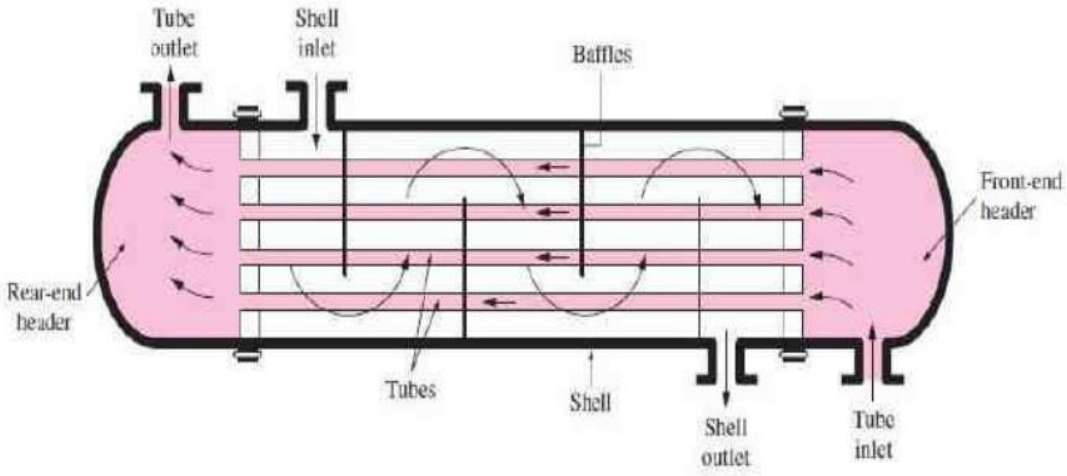
   Evaporator adalah alat penukar panas yang digunakan untuk menguapkan cairan yang ada pada larutan sehingga diperoleh larutan yang lebih pekat (*mother liquor*). Jenis alat penukar panas ini biasanya banyak digunakakn pada sisitem refrigerasi dimana fluida *refrigerant* dialirkan pada pipa yang berada pada *evaporator* selanjutnya dihembuskan udara untuk dapat menyerap udara dari ruangan.

2.2.2 *Shell and Tube Heat Exchanger*

Heat exchanger adalah alat yang berfungsi untuk memindahkan panas antara dua atau lebih fluida dengan suhu yang berbeda. *Shell and tube* adalah salah satu jenis *heat exchanger* yang paling banyak digunakan, dan umumnya dirancang khusus untuk kondisi kapasitas dan operasi apapun, dari vakum hingga tekanan tinggi lebih dari 15.000 psig (100 MPa), dari kondisi kriogenik hingga suhu tinggi 2000°F (1100°C),

fouling berat, cairan kental, erosi, korosi, toksisitas, multikomponen, getaran, dll. Selain itu *shell and tube* dapat dibangun dengan berbagai macam jenis material logam (tembaga, paduan, monel, nikel, aluminium, karbon / *stainless steel*, dll) dan non logam (grafit, kaca dan Teflon, dll) (Yudha, 2018).

Shell and tube banyak digunakan sebagai *heat exchanger* pada proses minyak dan gas, petrokimia dan industri kimia; sebagai pemanas air umpan boiler, alat *heat exchanger* perubahan fasa (misalnya reboilers dan kondensor), *evaporator*, *generator* uap dan pendingin oli di pembangkit listrik, dalam beberapa aplikasi pendingin dan pendingin udara. Pada aplikasinya *shell and tube heat exchanger* banyak digunakan pada dunia industri dikarenakan sistem penyerapan panas yang lebih efektif dimana fluida panas dapat langsung berkontak dengan fluida dingin secara langsung.



Gambar 3. Konstruksi *Shell And Tube*

Komponen:

1. *Shell* : merupakan badan dari *heat exchanger* , tempat bundel pipa dimasukkan. Dapat terbuat dari pipa yang berdiameter besar atau plat logam yang dirol.

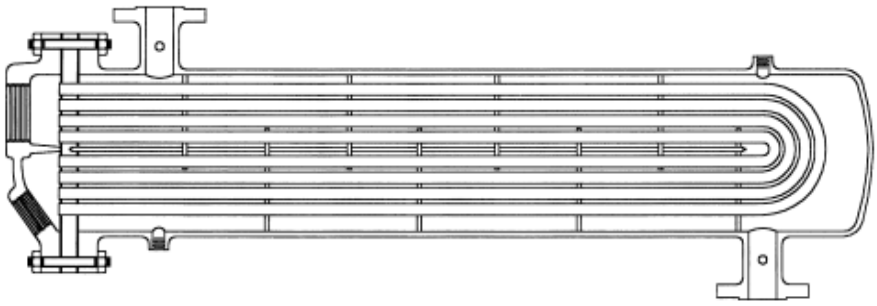
2. *Tube* (Pipa) : merupakan tempat pemisah antara dua fluida yang menjadi media perpindahan panas dan sekaligus sebagai penghantar panas.
3. *Baffles* : berguna untuk membuat jenis aliran menjadi turbulen sehingga mempercepat proses perpindahan panas. Selain itu juga membuat waktu tinggal fluida lebih lama sehingga perpindahan panas terjadi lebih efektif.
4. *Channel Cover* : tutup yang dapat dibuka saat pemeriksaan atau perawatan
5. *Tubesheet* : tempat menyanga *tube* agar terbentuk bundel.

2.2.3 *Desain Tube*

Terdapat tiga jenis desain *tube*, yaitu U-*tube*, *fixed tube sheet*, dan *floating hea*d. Tujuan desain adalah untuk mengakomodasi ekpansi termal, proses pembersihan yang mudah, atau biaya konstruksi yang rendah, adalah sebagai berikut (Yudha, 2018).

1. U-*tube*

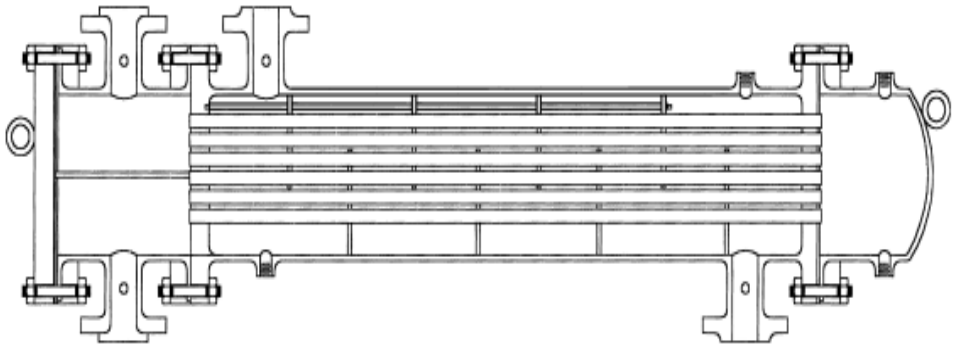
   U-*tube* mempunyai biaya kontruksi yang rendah karena hanya memerlukan satu *tube sheet*. Tetapi sisi *tube* tidak dapat dibersihkan secara mekanikal karena lekukan U pada sisi *tube*, sehingga fluida yang mengalir pada sisi *tube* biasanya fluida yang bersih. U-*tube* juga digunakan bila diperlukan ekpansi termal yang tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Desain U-*tube* (Yudha, 2018)

2. *Fix Tube Sheet*

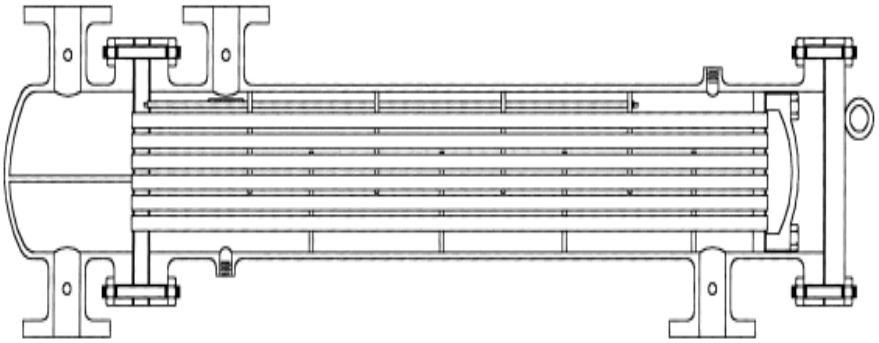
   Fixed tube sheet, adalah yang paling banyak digunakan, pada desain jenis ini sisi depan dan belakang *shell* dilas langsung terhadap *tube sheet* sehingga bundel *tube* tidak dapat dibersihkan. Jenis ini biasa digunakan dalam kondisi fluida yang mengalir di sisi *shell* bersih, dan pembongkaran bundel *tube* tidak diperlukan seperti yang terlihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Desain *Fix Tube Seet* (Yudha, 2018)

3. *Floating Head*

   Pada jenis *floating head* terdapat satu *tube sheet* yang tetap biasa pada bagian depan dan *tube sheet* satunya dapat mengapung bebas untuk mengakomodasi ekpansi termal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Desain *Floating Head* (Yudha, 2018)

2.3 Metode Penyimpanan Energi

Ada beberapa metode untuk penyimpanan energi termal yakni; *mechanical storage, electrical storage, thermal energy storage*. *Mechanical Energy Storage* merupakan sistem penyimpanan energi mekanikal termasuk penyimpanan energi gravitasi atau *pumped hydropower storage* (PHPS), *compressed air energy storage* (CAES), dan roda gaya. Teknologi yang digunakan pada PHPS dan CAES biasa digunakan untuk peralatan penyimpanan energi skala besar walaupun roda gaya sangat cocok digunakan untuk penyimpanan skala menengah.

Electrical Storage merupakan penyimpanan energi dengan baterai adalah salah satu opsi untuk penyimpanan energi listrik. Baterai diisi, yang dihubungkan dengan sumber arus listrik dan ketika sudah penuh lalu pengisian dilepaskan. Energi kimia disimpan dan dikonversikan ke energi listrik. Penyimpanan energi listrik dihasilkan oleh PLTU, PLTA, PLTG, dan pembangkit tenaga sel surya. Kebanyakan jenis baterai yang digunakan zaman sekarang adalah penyimpanan baterai dengan baterai timbal dan Ni-Cd.

Thermal Energy Storage merupakan penyimpanan energi termal yang disimpan pada sebuah material berubah fasa sebagai panas sensibel, panas laten, dan termokimia maupun gabungan dari 3 jenis kombinasi yang disebutkan diatas (Sharma dkk, 2007).

2.4 Penyimpanan Energi Termal

Penyimpanan energi termal adalah penyimpanan dari suatu energi yang didapatkan dari luar kemudian disimpan dalam suatu tempat yang dijadikan sebagai penyimpanan energi termal. Sistem penyimpanan termal sering digunakan sebagai pemanas dan pendingin karena dari segi performa sangat baik dan banyak digunakan pada proses-proses industri. penyimpanan energi

termal dibagi menjadi 2 bagian besar, penyimpanan secara *thermal* dan penyimpanan secara *chemical*.

Thermal terpecah menjadi 2 lagi yaitu panas sensibel dan panas laten. Panas laten yaitu panas yang diperlukan per satuan massa zat pada titik didihnya sehingga terjadi perubahan wujud sedangkan panas sensibel yaitu panas yang menyebabkan terjadinya kenaikan/penurunan temperatur, tetapi fasa tidak berubah. Panas sensibel berupa fasa cair dan padat. Panas laten berupa fasa padat ke cair, fasa cair ke gas, dan fasa padat tetap padat. Pada penyimpanan *chemical* dibagi menjadi *thermal chemical pipe line*, *heat of reaction*, dan *heat pump*.

Densitas penyimpanan energi yang tinggi dan kapasitas tenaga yang tinggi pula digunakan untuk mengisi dan melepaskan karakteristik dari berbagai energi penyimpanan. Energi penyimpanan juga sebagai salah satu energi terbarukan dan dikenal ada 3 metode dari energi penyimpanan termal yaitu panas sensibel, panas laten dan penyimpanan panas kimia.

2.4.1 Panas Sensibel

Densitas penyimpanan energi dalam penyimpanan ditentukan oleh kapasitas panas dari media penyimpanan dan perubahan temperatur material. Perubahan temperatur (ΔT) tergantung kepada aplikasi dan keterbatasan panas bahan penyimpanan dan tempat penyimpanan. Panas sensibel dituliskan dengan rumus seperti pada Persamaan 2.4 (Atul, 2009).

$$Q_{sensibel} = \int_1^2 m\, cp\, dT \text{……..……} (4)$$

Dimana :

$Q_{sensibel}$ = Panas sensibel yang tersimpan

C_p = Panas spesifik material

ΔT = Perubahan temperatur

2.4.2 Panas Laten

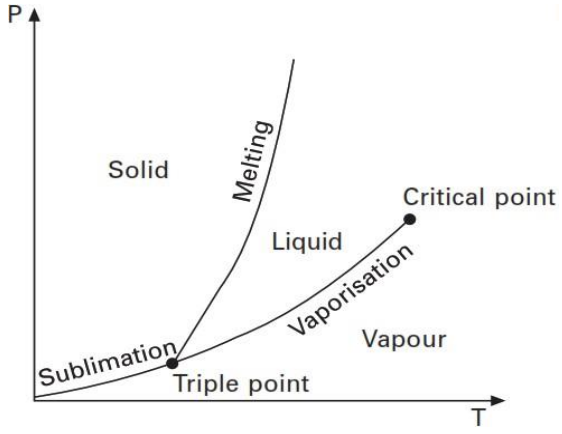
Pengertian lain penyimpanan energi menggunakan material berubah fasa. Densitas energi bisa ditingkatkan menggunakan PCM, mempunyai perubahan fasa dengan jarak temperatur dari penyimpanan. Berdasarkan temperatur panas disimpan dalam PCM dan dituliskan dengan rumus seperti pada Persamaan 2.5 (Atul, 2009).

$$Q_{laten} = m_{pcm}.\Delta X.L_{pcm} \text{.....(5)}$$

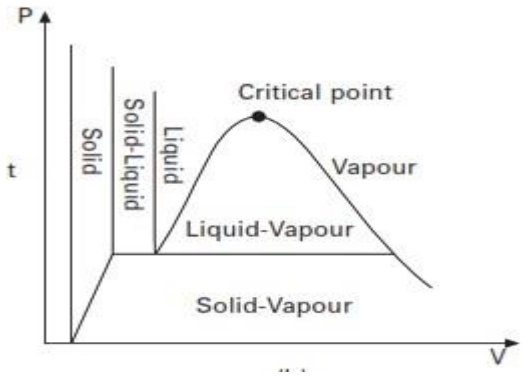
Dimana :

Q_{laten} = Panas sensibel dan panas laten yang tersimpan

L_{pcm} = Laten PCM



Gambar 7. Tipikal perubahan PCM pada diagram tekanan terhadap temperatur (Wu, S. 2010)



Gambar 8. Tipikal perubahan PCM pada diagram tekanan terhadap volume (Wu, S. 2010)

Gambar 7 menjelaskan kenaikan pada temperatur tertentu menyebabkan PCM terjadi sublimasi sehingga menuju proses *triple point*. Pada temperatur yang lebih rendah PCM berfasa padat, dengan dinaikkannya temperatur PCM yang berfasa padat terjadi proses peleburan menjadi fasa cair. Temperatur kemudian dinaikkan kembali hingga titik kritis sehingga PCM terjadi proses penguapan. Setelah melalui titik kritis PCM berubah fasa menjadi uap. *Melting point* yaitu suhu di mana terjadinya perubahan zat padat menjadi cair dibawah tekanan 1 atmosfer atau keadaan dimana terjadinya keseimbangan antara fase padat dengan fase cair lainnya pada suatu zat. Hal itu terjadi karena panas diberikan ke zat padatan, dapat menyebabkan suhu meningkat sampai titik leleh tercapai. Panas yang lebih tinggi akan menyebabkan perubahan padatan menjadi cairan tanpa perubahan suhu (*melting point*).

Perubahan fasa bisa terjadi pada fasa padat ke cair atau cair ke gas. Namun demikian perubahan cair ke gas disebabkan oleh perubahan volume yang besar atau membutuhkan tekanan yang besar untuk menyimpanan material dalam fasa gas. Penyimpanan energi termal panas laten mempunyai densitas penyimpanan energi yang tinggi per unit satuan massa dalam proses quasi isothermal. Artinya dalam aplikasi tertentu yang lebih spesifik dimana interval atau jarak temperatur sangat penting, contohnya perpindahan sensivitas temperatur produk, menggunakan PCM sangat menguntungkan karena bisa disimpan di material pada temperatur konstan sesuai dengan fasa transisi dari temperatur PCM. Ada beberapa persyaratan dalam pemilihan penyimpanan energi panas laten, yaitu :

1. Karakteristik Termal

   Ada 3 syarat yang harus dipenuhi dalam karakteristik termal yaitu kecocokan temperatur fasa perubahan, panas laten yang tinggi, dan mempunyai perpindahan panas yang baik. Pemilihan PCM untuk aplikasi khusus, temperatur operasi dari pemanasan ataupun pendinginan seharusnya disesuaikan dengan temperatur transisi dari PCM itu sendiri. Panas laten dari PCM sebisa mungkin harus tinggi,

khususnya pada basis volumterik untuk meminimalisir ukuran penyimpanan panas. Konduktivitas termal juga mendukung pengisian dan pelepasan sewaktu penyimpanan energi bekerja.

2. Karakteristik Fisik

   Adapun karakteristik fisik dari penyimpanan energi termal adalah keseimbangan fasa yang baik, densitas yang tinggi, perubahan volume yang kecil, dan tekanan uap rendah. Stabilitas fasa selama titik pembekuan akan membantu mengatur penyimpanan panas dan densitas sangat dibutuhkan untuk sebuah ukuran kecil dalam penyimpanan. Perubahan volume yang kecil dalam perubahan fasa dan tekanan uap yang kecil pada suhu operasi berguna untuk mengurangi masalah penahanan.

3. Karakteristik Kinetik

   Adapun karakteristik kinetik dari penyimpanan energi termal adalah tidak ada proses *supercooling*, dan Tingkat pengkristalan yang cukup baik. *Supercooling* adalah salah satu kesulitan dalam yang dihadapi dalam pengembangan PCM, terutama untuk garam hidrat. *Supercooling* yang lebih dari beberapa derajat saja akan berpengaruh pada proses penyimpanan energi panas.

4. Karakteristik Kimia

   Adapun karakteristik kimia dari penyimpanan energi termal adalah stabilitas kimia jangka panjang, sesuai dengan bentuk material, tidak beracun, dan tidak mudah terbakar. PCM bisa terjadi degradasi kehilangan air, dekomposisi kimia, atau ketidak sesuaian dengan bentuk materialnya sehingga PCM aman untuk digunakan.

5. Faktor Ekonomis

   Adapun faktor ekonomis dari penyimpanan energi termal dari suatu material atau bahan sangatlah penting baik itu dari segi ketersediaan dan harga yang murah. Harga murah dan ketersediaan dalam skala besar dari material berubah fasa sangat penting (Eduard, Prim.2012).

2.5 *Phase Change Materials* (PCM)

Phase change material (PCM) merupakan material berubah fasa yang mempunyai kemampuan melepaskan energi panas yang sangat tinggi dan menyimpan panas laten dalam jangka waktu yang cukup lama dan tanpa perubahan suhu (Meng, 2008). Perpindahan energi panas dapat berlangsung pada saat bahan berubah bentuk dari cair ke padat dan sebaliknya.hal ini disebut perubahan fasa. PCM sering ditemui dalam kehidupan sehari-hari misalnya asam lemak, minyak nabati, garam hidrat dan parafin. Setiap PCM mempunyai titik leleh dan energi panas laten yang berbeda dalam penggunaannya sebagai *thermal energy storage* (TES) harus disesuaikan dengan aplikasinya (Pudjiastuti, 2011).

Keuntungan PCM sebagai *thermal energy storage* (TES) yaitu dapat mengurangi konsumsi energi dalam sebuah bangunan. karena PCM dapat mengurangi beban termal ruangan pada sebuah bangunan sehingga penggunaan mesin pendingin dapat dikurangi dan dapat mengurangi fluktuasi temperatur ruangan yang tinggi dan kenyamanan termal terpenuhi.

2.6 Klasifikasi *Phase Change Materials*

Secara luas *phase change material* (PCM) diklasifikasikan menjadi 2 kelompok besar yaitu *phase change material* organik dan *phase change material* anorganik. *Phase change materials* (PCM) organik adalah material penyimpan panas dengan panas laten rata-rata per satuan volume dan densitas yang rendah. *Phase change material organik* menjadi 2 kelompok yaitu paraffin dan non paraffin.

2.6.1 Parafin

Parafin adalah material berubah fasa organik yang tersusun dari campuran bagian besar rantai lurus n-alkana CH_3-(CH_2)-CH_3. Kristalisasi dari rantai (CH_3)- melepaskan sejumlah panas laten. Titik

leleh dan panas laten meningkat dengan semakin panjangnya rantai. Kualitas paraffin sebagai bahan penyimpan panas peleburan dikarenakan rentang suhunya yang cukup luas. Karakteristik parafin yaitu mempunyai jarak titik beku yang besar sekitar 20 ^{o}C sampai 70 ^{o}C dengan rata-rata panas fusi pada bangungan sebesar 170 MJ/m^{3}, nilainya setengah dari garam hidrat. Namun, parafin tidak mempunyai sifat *supercooling*, tidak bersifat korosif, sifat kimia yang stabil, tidak berfasa memisah, dan harganya murah. *Supercooling* merupakan suatu keadaan yang dialami oleh suatu zat cair yang mengalami penurunan suhu secara drastis sampai dibawah titik bekunya yang tidak diimbangi dengan pelepasan kalor (Souayfane, F.2016).

Tabel 1. Karakteristik Parafin (sharma, 2009)

Nomor atom karbon	Titik lebur (^{o}C)	Panas laten (kJ/kg)	Golongan
14	5,5	228	I
15	10	205	II
16	16,7	237,1	I
17	21,7	213	II
18	28	244	I
19	32	222	II
20	36,7	246	I
21	40,2	200	II
22	44	249	II
23	47,5	232	II
24	50,6	255	II
25	49,4	238	II
26	56,3	256	II
27	58,8	236	II
28	61,6	253	II
29	63,4	240	II
30	65,4	251	II
31	68	242	II
32	69,5	170	II
33	73,9	268	II
34	75,9	269	II

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

1. Kelebihan

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

2. Kekurangan

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

2.6.2 Non Parafin

Organik non parafin terbuat dari asam lemak, ester, dan alkohol. Sifatnya sangat mudah terbakar dan tidak bisa terkena paparan temperatur yang tinggi, dan mudah teroksidasi. Kelebihannya ialah

material organik mudah diproduksi, mempunyai sifat pendinginan tanpa *supercooling*, dan tidak berisifat toksin. 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 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).

1. Asam Lemak

   Formula kimia dari asam lemak adalah $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ dan mempunyai panas fusi relatif tinggi. Asam lemak mempunyai banyak keuntungan dibandingkan PCM lainnya. Kelebihannya adalah sifat kimia yang stabil, titik pencairan yang kongruen, dan tidak beracun dan yang paling utama adalah mempunyai perubahan volume yang rendah ketika berubah fasa dengan titik lebur yang rendah. Asam lemak didapat dari sayur-sayuran dan hewan (Konuklu, Y.2018). Adapun bentuk asam lemak dapat terlihat pada Gambar 9 sebagai berikut.

Gambar 9. Asam Lemak

2. Garam Hidrat

Garam hidrat merupakan salah satu jenis PCM inorganik yang terdiri dari campuran air dan garam, yang mana keduanya berkombinasi membentuk krital-krital matrik pada saat mengalami pembekuan. Garam hidrat merupakan jenis PCM yang memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan PCM lain. Salah satu kelebihan garam hidrat yaitu persediaannya yang melimpah sehingga mudah didapatkan.

Garam hidrat memiliki nilai ekonomis yang rendah sehingga terjangkau oleh semua kalangan. Dari segi termofisiknya garam hidrat memiliki nilai panas laten yang tinggi sehingga dapat menyerap panas lebih banyak tanpa mengalami perubahan temperatur. Tidak hanya itu, garam hidrat juga mengalami proses perubahan fasa yang cepat sehingga tidak membutuhkan waktu yang lama pada proses penyerapan dan pelepasan panas. Hal ini disebabkan karena garam hidrat memiliki nilai konduktifitas termal yang tinggi. Adapun bentuk dari garam hidrat dapat dilihat pada Gambar 2.10.

Gambar 10. PCM Garam Hidrat (Tisa, 2016).

Garam hidrat memiliki beberapa kekurangan sebagai *thermal energy storage*. Salah satunya yaitu sifat garam yang mudah mengendap sehingga dapat mengurangi fungsi utama sebagai *thermal energy storage* karena menurunkan daya penyerapan dan pelepasan panas. Selain itu, garam hidrat menunjukkan adanya *supercooling* pada saat pelepasan panas. akibatnya, garam hidrat hanya dapat digunakan di tempat-tempat tertentu dan tidak dapat digunakan secara luas. Tidak hanya itu, garam hidrat juga memiliki sifat yang korosif terhadap logam yang mana kebanyakan sistem yang digunakan dalam *heat storage* adalah logam sehingga penggunaan garam hidrat sebagai *thermal energy storage* perlu disesuaikan dengan sistemnya sebelum diaplikasikan.

3. Gula Alkohol

   Gula alkohol (alditol, polialkohol, glisitol, polihidrik alkohol) dengan rumus kimia $(CHOH)_nCH_2OH$ adalah substansi yang umum ditemukan pada makan dan sayuran. Material ini mempunyai entalpi PCM yang baik, fasa berubah temperatur. Perubahan temperatur fasanya berkisar antara 90^oC sampai 190^oC dan mempunyai panas laten antara 190 sampai 350 kJ/kg.

4. Ester

   Ester didapat dari sintesis asam karbosilik. Asam lemak ester dapat berubah fasa pada temperatur yang rendah tanpa

supercooling. Kebanyakan material ester digunakan dalam industri sebagai polimer dan bahan kosmetik (Sharma,A.2009).

5. Minyak kelapa

   Minyak kelapa adalah PCM non parafin dengan rumus kimiawi $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ dengan prosentase jumlah atau komposisi: asam caprylic (C_8) 9%, Decanonic (C_{10}) 10%, asam Lauryc (C_{12}) 52%, asam myristic (C_{14}) 19%, asam palmitic (C16) 11%, dan asam oleic tak tersaturasi (C18) 8% . Minyak kelapa memiliki karakteristik fisis temperatur melting sebesar 26°C. Kalor laten minyak kelapa sebesar 103,5 kJ/kg dan kalor jenis minyak kelapa sebesar 2100 J/Kg°C . Sehingga sesuai sebagai bahan penyimpan energi termal pada bangunan di lingkungan tropis dan berpotensi untuk digunakan sebagai penyejuk udara ruang.

   Selain itu minyak kelapa juga memiliki subcooling yang sangat rendah sehingga proses transisi fase padat-cair atau sebaliknya dapat terjadi secara reversible di sekitar temperatur melting dan bersifat non-korosif (Widya, 2015).

2.7 Sifat-sifat Parafin

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

2.7.1 Masa Jenis

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

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

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

2.7.2 Panas Spesifik

Parafin memiliki panas spesifik yang cukup tinggi dan cocok digunakan sebagai penyimpanan energi termal. Pada saat fasa padat parafin memiliki panas spesifik 3.78 $J.g^{-1}.K^{-1}$ sedangkan pada saat fasa cair parafin memiliki panas spesifik lebih besar yaitu 2.95 $J.g^{-1}.K^{-1}$. Artinya, jika parafin digunakan sebagai penyimpanan energi termal maka jumlah panas pada bangunan yang dapat diserap oleh parafin cukup besar sesuai dengan jumlah masa parafin yang digunakan. Adapun kelemahanya adalah waktu yang diperlukan untuk melepaskan panas menjadi lebih lama. Hal ini disebabkan karena panas spesifik pada saat fasa cair lebih besar dari pada saat fasa padat (Fischer, 2006).

2.7.3 Konduktifitas Termal

Parafin memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah. Nilai konduktivitas termal parafin yaitu 0,232 W/m.K. Rendahnya nilai konduktivitas termal parafin mengakibatkan rendahnya laju perpindahan kalor pada saat proses penyerapan maupun pelepasan kalor. Akibatnya, waktu yang dibutuhkan untuk melelehkan parafin dari fasa padat menjadi cair dan membekukan parafin dari fasa cair menjadi padat menjadi lebih lama. Akan tetapi rendahnya konduktivitas termal pada parafin dapat ditingkatkan dengan

mencampurkan material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi pada parafin seperti *metal foam*.

2.7.4 Panas Laten

Parafin merupakan PCM yang memiliki panas laten yang cukup tinggi. Nilai panas laten pada parafin berbeda-beda tergantung dari jumlah ikatan karbonnya. Tingginya panas laten pada parafin merupakan keuntungan sebagai *thermal energy storage* karena pada dasarnya material yang memiliki panas laten yang tinggi dapat menyerap dan menyimpan panas yang lebih banyak tanpa mengalami perubahan temperatur. Beberapa panas laten parafin berdasarkan jumlah ikatan karbon yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 1.

2.7.5 Temperatur Leleh

Parafin memiliki temperatur leleh yang berbeda-beda bergantung pada jumlah ikatan atom karbonnya. Parafin dengan atom karbon C_5-C_{15} merupakan parafin fasa cair sedangkan $>C_{15}$ merupakan parafin fasa padat. Semakin banyak jumlah ikatan karbon pada parafin maka temperatur lelehnya semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena jumlah ikatan atom karbon yang banyak memiliki rantai karbon yang semakin panjang dan membentuk molekul yang lurus dan beraturan. Akibatnya, persinggungan antara molekul-molekul semakin luas dan gaya tarik menarik antar molekul semakin kuat sehingga diperlukan energi yang besar yang dapat dicapai pada temperatur tinggi untuk mengalahkan gaya-gaya tersebut. Beberapa temperatur leleh pada parafin berdasarkan jumlah ikatan karbonnya dapat dilihat pada Tabel 1.

2.8 Sifat–sifat Minyak Kelapa

Minyak kelapa murni atau bahasa ilmiahnya *virgin coconut oil* (VCO) adalah minyak yang berasal dari sari pati kelapa, diproses secara higienis tanpa sentuhan api secara langsung dan bahan kimia tambahan sehingga kandungan yang penting dalam minyak tetap dapat dipertahankan. Komponen utama dari VCO sekitar 92% adalah asam lemak jenuh, diantaranya asam laurat (48,74%), asam miristat (16,31%), asam kaprilat (10,91%), asam kaprat (8,10%) dan asam kaproat (1,25%).

Minyak kelapa murni tidak mudah tengik karena kandungan asam lemak jenuhnya tinggi sehingga proses oksidasi tidak mudah terjadi. Apabila kualitas VCO rendah maka proses ketengikan akan berjalan lebih cepat. Hal ini disebabkan oleh pengaruh oksigen, keberadaan air, dan mikroba yang akan mengurangi kandungan asam lemak yang berada dalam VCO menjadi komponen lain. Secara fisik, VCO harus berwarna jernih. Hal ini menunjukan bahwa di dalamnya tidak tercampur oleh bahan dan kotoran lain. Apabila didalamnya masih terdapat kandungan air, biasanya akan ada gumpalan berwarna putih. Keberadaan air ini akan mempercepat proses ketengikan. Selain itu, gumpalan tersebut kemungkinan juga merupakan komponen blondo yang tidak tersaring semuanya.

VCO memiliki karakteristik fisika dan kimia. Sifat fisika dan kimia minyak kelapa meliputi kandungan air, asam lemak bebas, warna, bilangan iod, bilangan penyabunan, dan bilangan peroksida. Minyak kelapa murni (VCO) mempunyai banyak manfaat terutama dalam bidang kesehatan diantaranya merupakan anti bakteri, menjaga kesehatan jantung, membantu mencegah penyakit osteoporosis, diabetes, lever, serta dapat menurunkan berat badan, dan memelihara kesehatan kulit. Minyak kelapa berdasarkan kandungan asam lemak digolongkan kedalam minyak asam laurat karena kandungan asam lauratnya paling besar jika dibandingkan dengan asam lemak lainnya. Berdasarkan tingkat ketidak jenuhannya yang dinyatakan dengan bilangan Iod (*Iodine Valu*e), maka minyak kelapa dapat dimasukan kedalam golongan non *drying oils* karena bilangan minyak berkisar 7,5-10,5 (Salirawati, 2007).

Gambar 11. Minyak Barco

minyak kelapa bermerek barco seperti pada Gambar 11 diatas yang digunakan dalam penelitian ini, minyak kelapa memiliki kalor laten sebesar 103,5 kJ/kg, panas spesifik saat padat sebesar 3,2 kJ/kg°C dan panas spesifik pada keadaan cair sebesar 4,1 kJ/kg°C. Minyak kelapa karakteristik fisik berubah fasa membeku pada temperatur 23°C. Temperatur berubah fasa minyak kelapa masih bisa dicapai di Indonesia karna termasuk daerah tropis. Minyak kelapa memiliki sifat *subcooling* yang cukup rendah sehingga proses perubahan fasa padat ke cair atau sebaliknya dapat terjadi secara reversible disekitar temperatur pencairan. Minyak kelapa juga bersifat non-korosif, sehingga dapat menggunakan berbagai jenis tempat yang terbuat dari logam atau non-logam. Kekurangan dari minyak kelapa ketika diaplikasinya konduktivitas termal yang cukup rendah, sehingga dapat menghambat proses penyerapanan dan pelepasan kalonya (Fransisco, 2020).

Proses pembekuan PCM minyak kelapa pada alat penukar kalor waktu perubahan fasa lebih lama dibandingkan dengan penurunan temperatur pada fasa cair. Pada temperatur perubahan fasa yakni 24°C – 22°C diperoleh persentase minyak kelapa yang beku adalah 20,7%. Peningkatan kecepatan aliran udara dingin dapat mempercepat waktu perubahan fasa PCM. Kecepatan 1 m/s dan 2 m/s tidak direkomendasikan dalam aplikasi alat penukar kalor berisi PCM minyak kelapa ini dengan menggunakan udara

lingkungan sebagai media pendingin karena sampai 12 jam temperatur belum melewati temperatur perubahan fasa (Irsyad, 2018).

2.9 Pengaplikasian PCM

PCM sudah banyak di aplikasikan seperti yang terlihat pada Tabel 2.3 sebagai berikut. Pengaplikasian PCM dibagi 2 (dua) kelompok utama yaitu perlindungan pada panas dan penyimpanan energi panas. Konduktifitas panas dari bahan yang membedakan kedua aplikasi tersebut. Konduktivitas panas rendah dibutuhkan untuk beberapa hal perlindungan panas, sedangkan pada sistem penyimpanan nilai tersebut dapat menimbulkan masalah karena dapat mengeluarkan energi memadai tetapi tidak mempunyai kapasitas yang memadai untuk membuang energi tersebut.

Tabel 2. Aplikasi PCM

No	Aplikasi
1	Penyimpan panas dari energi matahari
2	Penyimpan pasif pada *bioclimstic building*
3	Pendingin pada bank es
4	Pemanas dan sanitasi air panas dalam ruang dengan peralatan komputer atau elektrik
5	Transportasi, es krim, makanan produk agro, produk susu
6	Green House
7	Perlindungan panas untuk elektronik
8	Aplikasi medis (transpor darah, vaksin)
9	Pendingin Mesin

Penggunaan PCM untuk penyimpan panas pada bangunan merupakan aplikasi pertama yang dipelajari, bersamaan dengan tangki penyimpan. Aplikasi pertama dari PCM ini dijelaskan di literatur untuk penggunaan sebagai pemanas dan pendingin pada bangunan. Hal yang sangat penting dalam aplikasi PCM pada bangunan adalah faktor keamanan. Satu hal yang menjadi kelemahan adalah memiliki berat termal rendah. Mereka juga cenderung mengalami fluktuasi yang tinggi sehingga memerlukan pemanasan dan pendinginan yang tinggi. Aplikasi PCM untuk bangunan, karena

kemampuannya untuk membuat variasi suhu yang halus, sangat menjanjikan (Mehling 2002) Aplikasi PCM dalam bangunan dapat mempunyai dua tujuan yaitu memanfaatkam sumber panas alam yaitu energi panas matahari pemanasan atau dingin malam untuk pendinginan serta memanfaatkan sumber panas atau dingin.

Pada dasarnya ada tiga cara untuk menggunakan PCM sebagai pemanas atau pendingin bangunan, yaitu: PCM dalam dinding bangunan, PCM dalam komponen bangunan lain selain dinding, dan PCM dalam unit pemanas atau pendingin. Penggunaan PCM untuk melepaskan 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 PCM pada bangunan adalah *refrigerator thermoelectric*.

2.10 Metode Peningkatan Laju Perpindahan Kalor PCM

Kebanyakan PCM yang digunakan sebagai penyimpan energi termal memiliki konduktivitas termal yang rendah. Sebagai contoh, parafin memiliki 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 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 lebih cepat. Secara umum, teknik yang digunakan untuk mempercepat perpindahan kalor pada PCM ada dua macam yaitu meningkatkan konduktivitas termal PCM dan menambah luas area permukaan perpindahan kalor.

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

Penelitian mengenai penambahan luas area permukaan dengan *metal foam* pernah dilakukan sebelumnya. (Beyne et al, 2017) menunjukkan bahwa penelitiannya mengenai perpaduan antara *mental foam* dan PCM dapat mengurangi waktu proses pelepasan termal atau proses pembekuan lebih cepat hingga 28%. Peningkatan laju perpindahan kalor PCM dengan memperluas area permukaan pada pipa coil dapat meningakatkan performa perpindahan kalor hingga 100%, sehingga proses penyerapan dan pelepasan termal pada PCM menjadi lebih cepat (Kukulka et al, 2015).

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kajian *experimental* untuk mengetahui perpindahan panas pada alat penukar kalor jenis *shell and tube* berupa perubahan temperatur (ΔT) pada *Phase Change Material* serta laju perpindahan panas atau laju pendinginan PCM pada *shell and tube*. Bahan yang digunakan adalah plat aluminium yang berukuran panjang 1 m dan diameter 30 cm dibentuk silinder untuk *shell*, dan aluminium berdiameter 20 mm dan panjang 1 m sebagai *tube*. Alat tersebut divariasikan temperatur masuk serta kecepatan udaranya untuk mengetahui laju perpindahan panas, dan perubahan temperaturnya.

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun penelitian ini dilakukan pada waktu dan tempat yang akan dilaksanakan sebagai berikut :

3.1.1 Tempat penelitian

Pembuatan alat dan pengujian untuk pengambilan data pada penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dijadwalkan dilakukan pada bulan April 2020 hingga Oktober 2020 dengan jadwal tersusun sebagai berikut :

Tabel 3. Jadwal Rencana Kegiatan Penelitian

Kegiatan		Apr		Mei		Jun		Jul		Agu		Sep		Okt	
1	Studi Literatur														
2	Perancangan dan Pembuatan alat Pengujian														
3	Pengujian														
4	Analisis Data Pengujian														
5	Pembuatan Laporan Akhir														

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada saat proses penelitian *shell and tube* adalah sebagai berikut :

3.2.1 *Shell And Tube*

Shell and Tube pada penelitian ini adalah dimana material yang digunakan untuk *shell* adalah plat sepanjang 1 meter dan lebar 1 meter ditekuk membentuk silinder dengan diameter lingkaran 30 cm. *Tube* yang digunakan menggunakan material aluminium diameter ukuran 20 mm, panjang 1 meter, dan jumlah *tube* sebanyak 20 terlihat pada Gambar 12 sebagai berikut.

Gambar 12. *Shell and Tube*

3.2.2 *Air Conditioner*

Dalam penelitian ini *Air Conditioner* sangat diperlukan dikarenakan bertujuan sebagai sumber penghasil udara pendingin untuk membantu menurunkan temperatur pada PCM. Sistem pendingin yang digunakan adalah mesin LG air conditioner 1 PK atau 9200 btu/h terlihat pada Gambar 13 sebagai berikut.

Gambar 13. *Air Conditioner* (AC)

3.2.3 *Blower*

Penelitian ini menggunakan *blower* sebagai alat yang digunakan untuk mengalirkan udara ke dalam alat penukar kalor. *Blower* yang digunakan bermerk NRT-PRO dengan ukuran 2,5” dengan putaran 3000-3600 rpm seperti terlihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.

Gambar 14. *Blower*

3.2.4 Anemometer

Pada penelitian ini anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan udara pada inlet masukan pada alat penukar panas. Anemometer yang digunakan memiliki merk Extech 45170 yang mampu mengukur kecepatan angin, kelembaban, temperatur, dan intensitas cahaya seperti pada Gambar 15.

Gambar 15. Anemometer

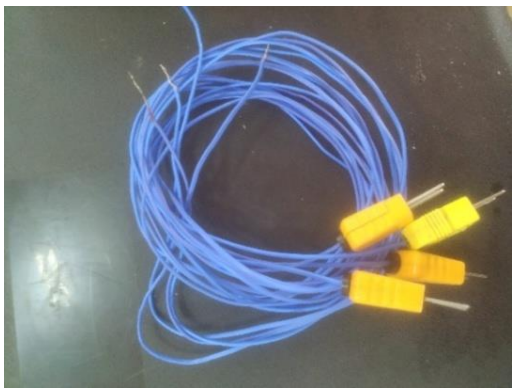
3.2.5 *Thermo Recorder*

Dalam penelitian ini *Thermo Recorder* sangat diperlukan untuk melakukan sebuah pengujian dikarenakan *Thermo Recorder* merupakan alat yang digunakan untuk membaca dan merekam temperatur pada interval waktu tertentu terlihat pada Gambar 16.

Gambar 16. *Thermo Recorder*

3.2.6 Termokopel

Dalam penelitian ini juga *Thermo Couple* tidak kalah penting dengan *Thermo Recorder* dikarenakan *Thermo Couple* merupakan salah satu komponen yang digunakan sebagai sensor pembaca pada *Thermo Recorder*. Pada *thermo couple* ini terkadang mengalami beberapa masalah seperti pembacaan temperatur yang tidak akurat, keerorran yang terjadi sehingga tidak terbaca, dan lain-lain. Jika terjadi permasalahan pada thermo couple tersebut maka kita harus menggantinya dengan yang baru terlihat pada Gambar 17 berikut.



Gambar 17. *Thermo Couple*

3.2.7 Minyak Barco

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak kelapa. Minyak kelapa yang digunakan bermerk barco seperti terlihat pada Gambar 18.

Gambar 18. Minyak Barco

3.3 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan pada *Shell and Tube* ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan Alat dan Bahan pengujian.
2. Mengisi PCM berupa minyak kelapa barco pada bagian *shell*.
3. Mengkondisikan kecepatan udara pada bagian *tube* menggunakan variasi temperatur setting AC untuk proses pendinginan PCM berupa minyak kelapa barco.
4. Mengkondisikan kecepatan udara pada bagian *tube* menggunakan blower pada saar proses pemanasan atau pelelehan PCM berupa minyak kelapa barco.
5. Pengukuran temperatur fluida masuk (Tin).
6. Pengukuran temperatur pada PCM.
7. Pengukuran temperatur fluida keluar (Tout).
8. Mulai merekam temperatur atau pengambilan data.

3.4 Variabel Pengujian

Adapun variabel pengujian pada penelitian ini yaitu dapat dilihat pada Tabel 4 dengan waktu pengujian selama 220 menit sebagai berikut :

Tabel 4. Variasi Pengujian Proses Pembekuan

Temperatur Setting AC	Kecepatan Udara	Temperatur Masuk HE	Temperatur PCM awal	Temperatur PCM akhir
18 °C	6 m/s			
	5 m/s			
	4 m/s			
20 °C	6 m/s			
	5 m/s			
	4 m/s			
22 °C	6 m/s			
	5 m/s			
	4 m/s			

3.5 Pengolahan Data Perhitungan

Pada pengolahan data ini dilakukan perhitungan setelah mendapat hasil dari penelitian yang dilakukan untuk dianalisis. Adapun pehitungan yang saya gunakan adalah sebagai berikut :

3.4.1 Perhitungan untuk panas yang dilepas oleh PCM

Pada perhitungan energi yang dilepas PCM digunakan massa PCM sebesar 61,776 kg, nilai kalor laten minyak kelapa merk barco sebesar 103,5 kJ/kg dan panas spesifik atau C_p yang digunakan adalah 4,1 kJ/kg °C pada saat minyak dalam kondisi cair atau dengan kata lain tidak membeku dan 3,2 kJ/kg °C pada saat kondisi minyak membeku (Fransisco,2020). Adapun rumus yang digunakan untuk perhitungan sebagai berikut

$$Q_{(0)} = m.Cpl.\Delta T + 0 + 0 \quad \text{.....(6)}$$

$$Q_{(1)} = (1 - \Delta X_0)\, m.Cpl.\Delta T + \Delta X_0\, m.L + 0 \quad \text{.....(7)}$$

$$Q_{(2)} = (1 - \Delta X_1) m.Cpl.\Delta T + (\Delta X_1 - \Delta X_0) m.L + \Delta X_0 m.Cps.\Delta T \quad \text{.....(8)}$$

Dimana pada Persamaan 6 yang hanya memanfaatkan [kalor sensibel], Persamaan 7 saat terjadi proses [$\text{sensibel}_{\text{cair}}$ + laten], dan Persamaan 8 saat terjadi proses [$\text{sensibel}_{\text{cair}}$ + laten + $\text{sensibel}_{\text{padat}}$].

3.4.2 Perhitungan untuk panas yang diserap udara

Pada perhitungan energi yang diserap oleh udara, rho udara yang digunakan adalah sebesar 1,225 kg/m^3, kecepatan sesuai variasi yaitu 6 m/s, 5 m/s, dan 4 m/s. maka didapat laju aliran massa yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\dot{m} = \rho.V.A \quad \text{.....(9)}$$

Setelah mendapat laju aliran massa selanjutnya menghitung jumlah kalor yang diserap udara dimana C_p udara yang digunakan adalah sebesar 1,0035 kJ/kg °C. Adapun rumus untuk mencari kalor yang diserap udara adalah sebagai berikut :

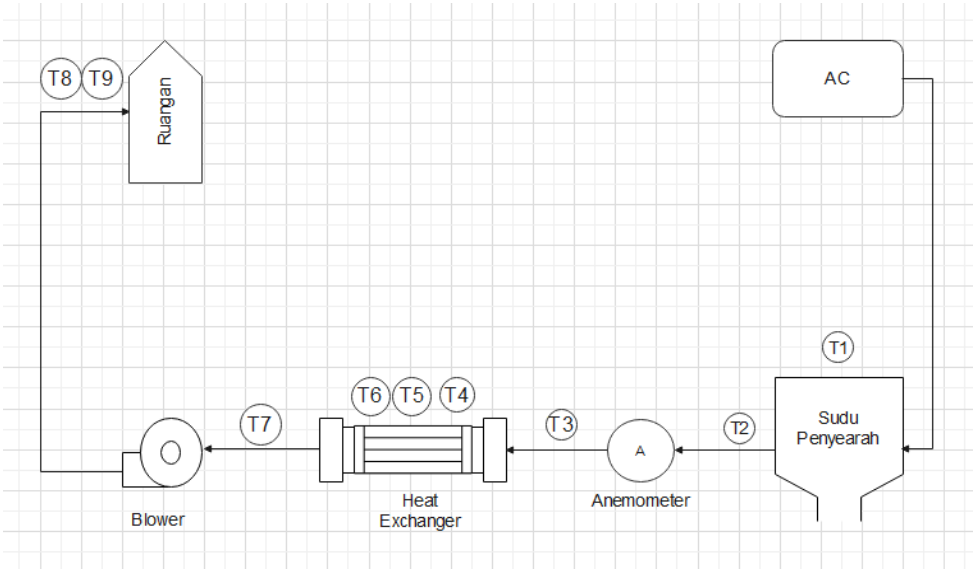
$$Q = \dot{m}\, C_p\, \Delta T \quad \text{.....(10)}$$

3.6 Pengaplikasian Alat Pengujian

Adapun skema pengujian pada proses pendinginan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.5.1 Skema Proses Pendinginan

Adapun skema pada proses pendinginan yang dilakukan pada penelitian ini dapat terlihat pada Gambar 3.8 dimana T adalah titik-titik yang digunakan sebagai tempat untuk mengukur temperatur pada alat yang kami gunakan dalam penelitian menggunakan *thermo couple*, setelah *thermo couple* terpasang sesuai dengan titik-titik yang telah ditentukan kemudian didapatkan data-data dari setiap masing-masing titik-titik yang dipasang *thermo couple*. Setelah data-data yang diinginkan didapat maka dilakukan perhitungan yang nantinya akan digunakan untuk mencapai tujuan dari penelitian.

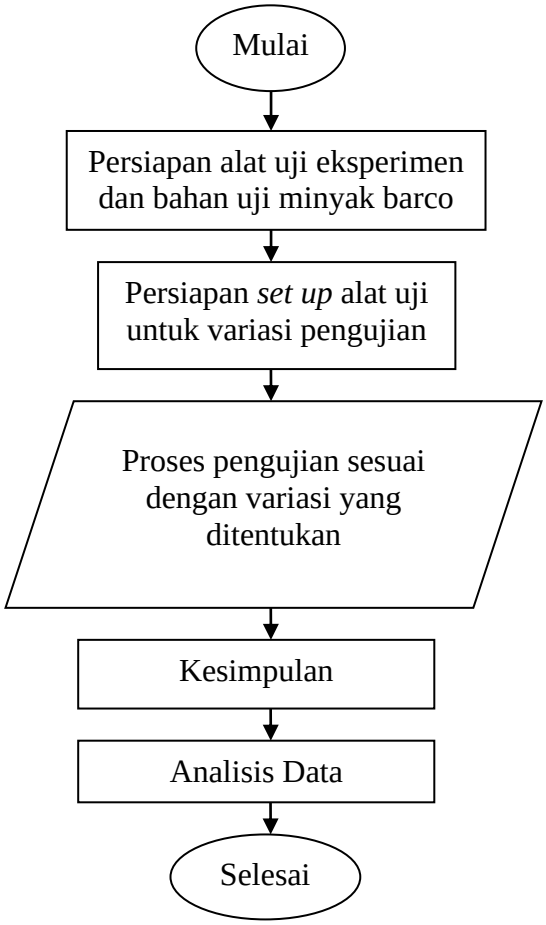


Gambar 19. Skema proses pendinginan

3.5.2 Pengaplikasian Alat Setelah Dibuat

Gambar 20. Pengaplikasian Alat Setelah Dibuat

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 21. Diagram Alir Penelitian

BAB V
SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari proses pengujian pembekuan minyak kelapa pada *heat exchanger* adalah sebagai berikut :

1. Pada proses pembekuan semakin rendah temperatur udara masuk dan peningkatan kecepatan udara masuk *heat exchanger* menyebabkan ΔT atau perbedaan temperatur pada PCM semakin besar sehingga penurunan temperatur pada PCM semakin rendah.
2. Laju pendinginan dipengaruhi oleh temperatur udara masuk dan kecepatan udara masuk *heat exchanger*, semakin rendah temperatur udara masuk dan kecepatan udara masuk pada *heat exchanger* maka penurunan temperatur semakin besar sehingga nilai laju pendinginan pun akan semakin besar. Laju pendinginan paling besar yaitu 0,037 °C/menit pada PCM dengan temperatur rata-rata udara masuk 14,13°C, kecepatan udara sebesar 6 m/s dengan ΔT atau perbedaan temperaturnya sebesar 8,1°C dalam waktu 220 menit dan energi yang dilepas PCM adalah sebesar 2062,5 kJ pada alat penukar kalor tipe *shell and tube*.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat saya berikan untuk mengoptimalkan karakteristik perpindahan kalor pada PCM di dalam alat penukar kalor adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan kecepatan udara atau laju udara sehingga laju aliran massa udara yang melewati alat penukar kalor nilainya akan lebih besar dan karakteristik perpindahan kalornya lebih optimal.
2. Disarankan waktu pada proses pengujian lebih lama dilakukan agar PCM mengalami penurunan temperatur yang lebih optimal dan karakteristik perpindahan kalor pun akan lebih optimal.
3. Disarankan untuk penelitian selanjutnya temperatur masuk alat penukar panas atau *heat exchanger* disesuaikan dengan kondisi di Indonesia agar pengaplikasiannya lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

Atul, Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. 2009. *Review On Thermal Energy Storage With Phase Change Materials And Aplications*. Renewbel And Sustainable Energy Review 13

Beyne, W., Bagci, O., Huisseune, H., Caniere, H., Danneels, J., Daenens, D. and Paepe, M De. 2017. Experimental investigation of solidification in metal foam enhanced phase change material. *Materials Science and Engineering* 251 (2017) 012112.

Cengel, Yunus A, and Michael A Boles. 2006. "thermodynamics an engineering approach" fifth edition.

Dwikiswantoro, Yudha. 2018. "optimisasi pada desain ulang *shell and tube heat exchanger* menggunakan *helical baffle* di pt. pjb up paiton probolinggo".Tugasakhir program study S1 TeknikFisika. Bandung.

Fischer, U.R. 2006. Thermal conductivity and melting point measurements on paraffin zeolite mixtures. Brandenburg University of Technology Cottbus, PF 101344, 03013 Cottbus Germany.

Fransisco, Tri May. 2020. "Kajian Termal Material Berubah Fasa Untuk Aplikasi Ruangan Sejuk". Universitas Lampung

Hamdani, S.Rizal, M. Riza, and T.M.I Mahlia. 2018. Mechanical properties of concrete containing beeswax/dammar gum as phase change material for thermal energy storage : 521-529.

Haryadi dan Ali Mahmudi. 2012. Buku Bahan Ajar "Perpindahan panas". Bandung. Politeknik Negeri Bandung

Inouye, Kuramitsu. 1934. The relation between tensile strength and density of paraffin wax at various temperatures. The University of British Columbia :Columbia.

Irsyad, Muhammad, dkk. 2018. Karakteristik Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Berisi Material Fasa Berubah Pada Proses Pembekuan Vol 1. Bandar Lampung

Konuklu,Y. Sahan,N. Paksoy,H. 2018. Latent heat storage system. *Elsevier*. 397-434.

Kukulka, David J. and Fuller, Kevin G. 2015. Development of enhanced heat transfer tubes. *Chemical Engineering Traonsactins*. 21, 985-990.

Liu, Zhang-Peng. and Yang, Rui. 2017. Synergistically-enhanced thermal conductivity of shape-stabilized phase change materials by expanded graphite and carbon nanotube. *Applied Sciences*. Department of Chemical Engineering. Tsinghua University. Beijing.

Meng, Q. and Jinlian Hu.2008.A poly(ethylene glycol)-based smart phase change material. Solar Energy Materials and Solar Cells92:1260-1268.

Pomianowski, Michal., Heiselberga, Per. and Zhang, Yinping. 2013. Review of thermal energy storage technologies based on pcm application in buildings. *Energy and Buildings* 67(2013)56–69.

Pudjiastuti, Wiwik. 2011. *Jenis-Jenis Bahan Berubah Fasa dan Aplikasinya.* Balai Besar Kimia dan Kemasan, Kementerian Perindustrian. Jakarta Timur

Sarier, N., and Onder, E. 2012. Organic phase change material and their textile application: an overview. *Thermochimica acta* 540(2012) 7-60.

Sharma, S.D., and Sagara, K. 2005. Laten heat storage material and system: a review. *International journal green energy*. 2: 1-56,2005.

Sharma,A., Tyagi,V.V., Chen,C.R. dan Buddhi,D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change material and applications. *Renewable and sustainable energy reviews, 13*, 318-345

Tisa, Sujail. 2016. Global Salt Hydrates Market Analysis 2016-2021. *Egypt BusinessDirectory*.Diunduhdihttps://www.egyptbusiness.com/Ticker/details/1639-Global-Salt-Hydrates-Market-Analysis- 2016-2021/60679 pada tanggal 26 November 2018 pukul 18.10 WIB.

W.U, S. 2010. Heat energy storage and cooling in buildings. Woodhead publishing limited. 101-126.

Wang, W., X.Yang, Y.Fang, J. Ding. 2008.Preparation and performance of form stable polyethylenen glycol/silicon dioxide composites as solid-liquid phase change materials.Applied Energy87 (5): 1529-1534.

Widya Arisya Putri, I. M. Sutjahja, D. Kurnia, S. Wonorahardjo. 2015. Potensi Minyak Kelapa sebagai Media Penyimpan Kalor 978-602-19655-8-0