

## Karakteristik Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Berisi Material Fasa Berubah Pada Proses Pembekuan

Muhammad Irsyad<sup>1,\*</sup>, Herry Wardono<sup>1</sup>, Amrizal<sup>1</sup>, Mardho Akmal<sup>1</sup>,  
dan Aji Muhammad Yulian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung,  
Jl. Prof. Dr. Ir. Soemantri Brojonegoro No.1, Bandar Lampung, 35145

\*E-mail korespondensi: muhammad.irsyad@eng.unila.ac.id

**Abstrak.** Penggunaan sistem sistem pengondisian udara (*air conditioning disingkat AC*) berdampak signifikan terhadap kenaikan konsumsi energi listrik bangunan. Upaya untuk meminimalkan konsumsi energi listrik AC adalah dengan meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi beban pendinginan. Temperatur lingkungan pada malam hari yang relatif rendah di Indonesia merupakan potensi yang bisa dimanfaatkan untuk membantu mendinginkan ruangan. Material fasa berubah (*phase change material disingkat PCM*) dapat digunakan dalam pemanfaatan potensi ini. PCM berfungsi sebagai material penyimpan energi termal dalam bentuk panas laten pada proses perubahan fasanya. Udara dingin pada malam hari dapat dimanfaatkan untuk proses pembekuan PCM dan pada siang hari dapat dimanfaatkan untuk mengambil energi termal dari udara ruangan yang didinginkan. Penelitian ini mengkaji karakteristik perpindahan panas pada alat penukar kalor yang berisi PCM untuk mendinginkan udara. Alat penukar kalor yang digunakan adalah jenis koil ganda dengan diameter pipa 0,018 mm, panjang pipa masing-masing adalah 6,3821 m dan 7,89647 m. PCM yang digunakan adalah minyak kelapa sebanyak 24, 988 kg. Variabel pengujian adalah kecepatan udara dingin masuk. Parameter yang diukur adalah temperatur PCM dan waktu proses perubahan fasa, serta *pressure drop* pada alat penukar kalor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan temperatur udara dingin dengan temperatur perubahan fasa maka semakin cepat proses perubahan fasa PCM. Kecenderungan yang sama juga terjadi apabila kecepatan udara dingin ditingkatkan. Aliran udara melewati bagian dalam koil mengalami rugi-rugi aliran yang berdampak pada kebutuhan fannya. Hasil-hasil penelitian secara rinci diuraikan dalam pembahasan artikel ini.

**Kata kunci:** AC, PCM, panas laten, alat penukar kalor, minyak kelapa

### PENDAHULUAN

Kenyamanan termal sangat dibutuhkan manusia dalam bekerja dan istirahat. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia, SNI 2001 kenyamanan termal untuk penghuni di Indonesia adalah pada temperatur bola kering  $25,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  dan kelembaban relatif  $60\% \pm 5\%$ . Untuk memperoleh kenyamanan termal tersebut di Indonesia yang memiliki temperatur di siang hari rata-rata melebihi temperatur kenyamanan termal tersebut dibutuhkan AC. Penggunaan peralatan ini berdampak terhadap kenaikan konsumsi energi listrik bangunan.

Indonesia memiliki temperatur lingkungan rata-rata minimum harian berkisar antara  $18 - 25^{\circ}\text{C}$ . Kondisi udara lingkungan ini terjadi pada malam dan merupakan potensi yang dapat dimanfaatkan untuk mendinginkan udara ruangan. Beberapa penelitian menggunakan metode penyimpanan energi termal menggunakan PCM untuk mendinginkan udara ruangan. Pada malam hari, udara dingin mengambil energi termal dari PCM dan pada siang hari PCM mengambil energi termal dari udara ruangan. Arkar dkk. (2007) menggunakan PCM TR 20 dengan temperatur pelelehan  $20^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ . Antony Aroul Raj dan Velraj (2011) menggunakan alat penukar kalor jenis *shell and tube* yang berisi PCM untuk mendinginkan udara. Tumpenny dkk. (2000) dan Zalba dkk. (2004) mensirkulasikan udara pada alat penukar kalor untuk mendinginkan udara ruangan.

PCM sebagai penyimpan energi termal memanfaatkan panas laten pada proses perubahan fasa untuk menyerap panas maupun melepaskan panas. Energi yang diserap oleh PCM pada range temperatur perubahan fasa jauh lebih besar apabila dibandingkan dengan memanfaatkan panas sensibel. Nilai panas laten PCM yang cocok untuk pendinginan ruangan diperlihatkan pada Tabel 1.

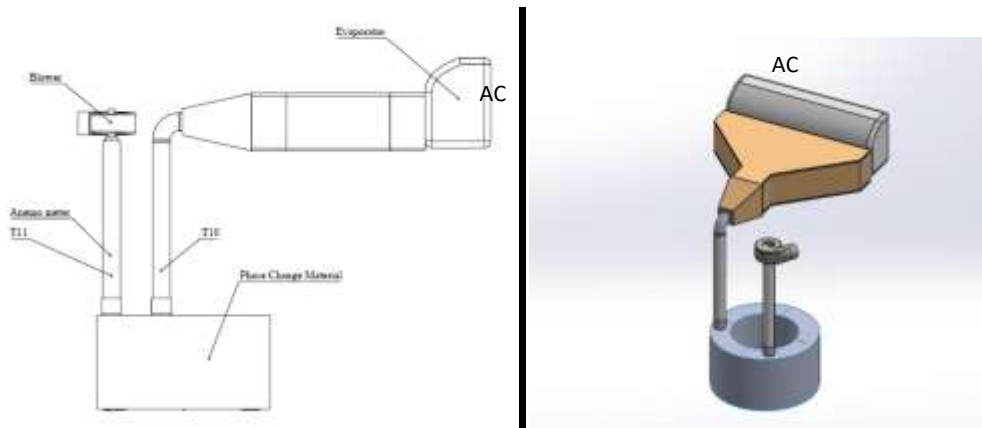
Potensi udara dingin malam hari perlu dimanfaatkan untuk membantu pendinginan ruangan dengan menggunakan alat penukar kalor yang berisi PCM. Untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas dan kinerja alat penukar kalor perlu dilakukann penelitian. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur dan laju aliran udara terhadap waktu pembekuan PCM. Data ini sangat penting untuk optimasi menggunakan udara dingin pada malam hari. Manfaat penelitian ini adalah membantu mengurangi konsumsi energi bangunan.

**Tabel 1.** Sifat termal PCM yang potensial digunakan untuk mendinginkan ruangan

| Material                     | $T_f$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $L_f$<br>(kJ/Kg) | $k$<br>(W/m.K) | Referensi                     |
|------------------------------|---------------------------------|------------------|----------------|-------------------------------|
| Paraffin C17-C18             | 20 - 22                         | 152              | -              | Dadgostar dan Shaw (2012)     |
| Paraffin C13-C24             | 22-24                           | 189              | 0,21 (s)       | Zhou, dkk. (2012)             |
| Capric-lauric acid (45%-55%) | 21                              | 143              | -              | Hawes, dkk. (1993)            |
| Dimethyl sabacate            | 21                              | 120-135          | -              | Feldman, dkk. (1986)          |
| E23                          | 23                              | 155              | 0,43           | Kenisarin dan Mahkamov (2007) |
| Minyak Kelapa                | 22-24                           | 103,2            | 0,62           | Mettaweaa dan Ead, (2013)     |

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental dengan melakukan pengujian pada alat penukar kalor yang berisi PCM. PCM yang digunakan adalah minyak Kelapa. Jumlah PCM yang digunakan adalah 24,988 kg. Alat penukar kalor yang digunakan adalah jenis *double coil*. Material coil adalah tembaga dengan diameter 0,018 m. Panjang masing-masing koil adalah 6,3821 m dan 7,89647 m. Jumlah lingkaran kedua koil ini adalah 5 buah. Wadah yang diisi PCM adalah rongga antara dua silinder dengan tinggi 0,27 m cm dan masing-masing silinder berdiameter 0,31 m dan 0,5 m. Skema peralatan diperlihatkan pada Gambar 1. Dalam pengujian parameter yang divariasikan adalah kecepatan aliran udara dingin masuk alat penukar kalor. Parameter diukur selain yang di atas adalah temperatur udara keluar, temperatur dalam PCM, dan beda tekanan pada alat penukar kalor. Alat ukur temperatur menggunakan termometer data logger Lutron tipe BTM 4208 SD. Termokopel yang digunakan tipe K. Sedangkan kecepatan aliran udara diukur menggunakan anemometer merek Lutron tipe 22SD. Material PCM yang digunakan adalah minyak kelapa merek Barco. Udara dingin dihasilkan oleh AC split 1 Pk. Evaporator AC dihubungkan dengan saluran uji, Untuk mempercepat aliran udara dingin dipasang blower pada bagian setelah alat penukar kalor.



**Gambar 1.** Skema alat uji

Posisi pemasangan termokopel pada PCM diperlihatkan pada Gambar 2. Temperatur dititik satu disimbolkan dengan T1 berada pada dalam PCM dengan posisi antara dinding silinder dalam dengan coil dalam. Untuk T2, T3, T5, dan T6 berada pada permukaan koil dalam dan koil luar. T4 berada antara koil dalam dan koil luar, sedangkan T7 berada diantara koil luar dengan silinder luar. Kesemua titik ini sejajar dan berada pada lingkaran koil ketiga dari atas. T8 berada antara koil dalam dan koil luar pada lingkaran koil pertama, sedangkan T9 berada antara koil dalam dan koil luar pada lingkaran koil kelima. Temperatur udara masuk disimbolkan dengan T10, terletak pada sisi masuk alat penukar kalor. Sedangkan T11 merupakan temperatur udara keluar ditempatkan pada sisi keluar alat penukar kalor.

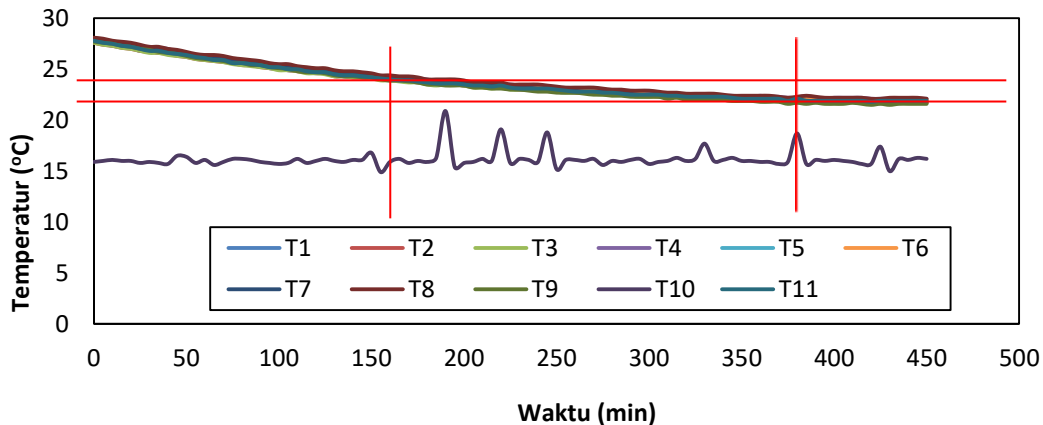


**Gambar 2.** Alat penukar kalor jenis koil dan posisi penempatan termokopel

Data temperatur di beberapa titik pada PCM digunakan untuk menganalisis proses perpindahan panas dari PCM ke udara dinding yang dialirkan dalam koil dan waktu pembekuannya. Dari data temperatur untuk beberapa kecepatan aliran akan peroleh pengaruh kecepatan aliran udara dingin terhadap perpindahan panas dan waktu pembekuan.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hubungan antara temperatur PCM terhadap waktu untuk masing-masing titik pengujian, seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Gambar ini memperlihatkan hasil pengujian untuk kecepatan dan temperatur udara dingin masing-masing sebesar 3m/s dan 16°C. Penurunan temperatur PCM pada setiap titik pengujian tidak jauh berbeda sehingga garis temperatur masing-masing titik hampir sama. Penurunan temperatur PCM dari 28°C menjadi 24°C membutuhkan waktu 180 menit, sedangkan proses perubahan fasa dari temperatur 24°C – menjadi 22°C membutuhkan waktu lebih lama yakni 205 menit. Proses penyerapan dengan memanfaatkan panas laten lebih besar dibandingkan dengan tanpa perubahan fasa.



Gambar 3. Temperatur PCM pada proses pendinginan dengan kecepatan udara 3m/s.

Analisis energi menggunakan persamaan kesetimbangan energi antara energi yang diserap udara dan energi yang dilepaskan PCM dengan asumsi adiabatik karena sudah diisolasi dengan baik. Energi persatuan waktu yang diserap udara dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Daya yang diserap oleh udara pada temperatur perubahan fasa minyak kelapa 24°C – 22°C dengan kerapatan udara 1,293 kg/m<sup>3</sup> dan panas spesifik ( $C_p$ ) 1,0035 kJ/kg adalah 0,05 kW. Energi yang diserap selama waktu perubahan fasa sebesar 205 menit adalah 616,97 kJ. Apabila dihitung energi yang diserap oleh PCM minyak kelapa berdasarkan kesetimbangan energi ini dengan menggunakan Persamaan 1 untuk panas sensibel dan Persamaan 2 untuk panas laten ( $L_f$ ) maka diperoleh massa yang beku adalah 20,7%. Secara fisik mendukung hasil perhitungan ini, terlihat sebagian PCM yang sudah membeku melekat didinding koil dan sebagian masih ada yang cair, seperti diperlihatkan pada Gambar 4.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$Q = m \cdot L_f \quad (2)$$

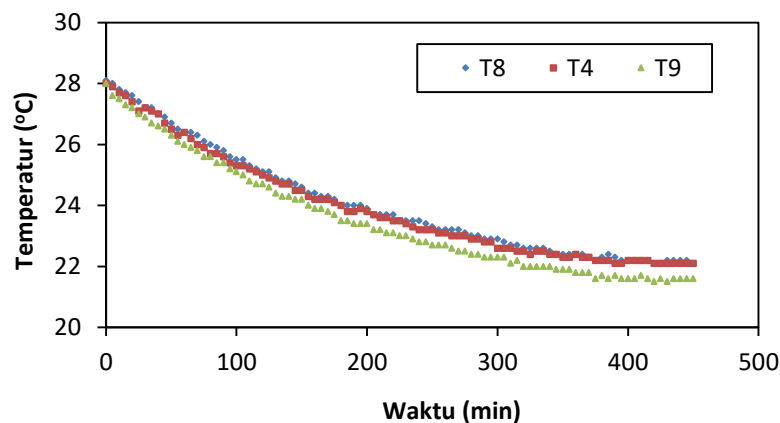


Gambar 4. Pembekuan PCM minyak kelapa pada dinding koil

Proses penurunan temperatur PCM dalam wadah silinder diawali dari permukaan dinding koil dan pada bagian atas. PCM yang sudah berkurang temperatur bergerak ke bawah. Hal ini disebabkan karena densitas PCM meningkat dengan turunnya temperatur. Pada Gambar 5 terlihat temperatur pada bagian bawah memiliki kecenderungan lebih rendah dibandingkan bagian tengah dan bagian atas,

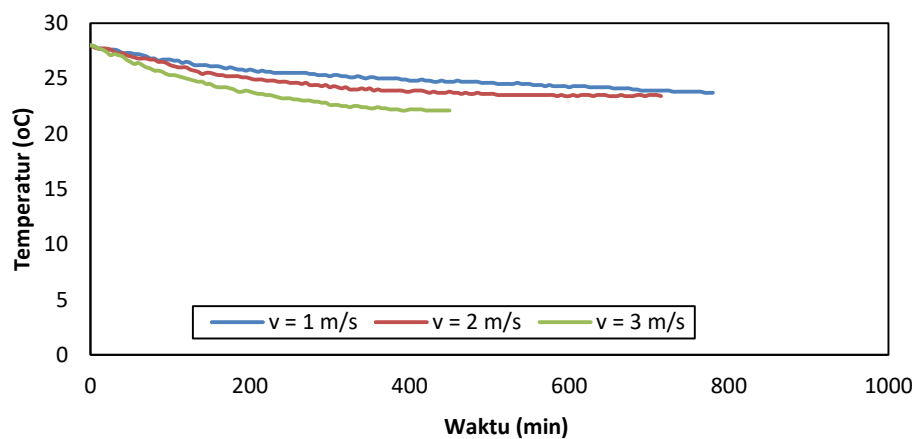
Perubahan kecepatan aliran udara dingin mempengaruhi waktu perubahan fasa PCM, seperti diperlihatkan pada Gambar 6. Grafik ini menunjukkan hasil pengujian untuk satu titik pengujian pada bagian tengah PCM yakni titik 6 dengan temperatur udara dingin masuk 18°C. Semakin cepat aliran udara maka semakin cepat penurunan temperatur dan waktu perubahan fasa. Ini menunjukkan terjadi peningkatan laju perpindahan panas. Berdasarkan hasil pengujian ini 3 m/s masih memungkinkan untuk diaplikasikan di udara lingkungan. Sedangkan kecepatan 2 m/s dan 1 m/s tidak

memungkinkan diaplikasikan karena membutuhkan waktu lebih dari 12 jam belum melewati temperatur perubahan fasa.



**Gambar 5.** Perbandingan temperatur PCM pada bagian atas, tengah dan bawah

Penurunan tekanan pada alat penukar untuk kecepatan 3 m/s adalah 392,4 Pa. Penurunan tekanan akibat rugi-rugi gesekan pada pipa dengan panjang 6,3821 m dan 7,89647 m dengan diameter 0,018 m. Bentuk lingkaran dengan jumlah masing masing 5 buah juga berkontribusi terhadap penurunan tekanan. Data penurunan tekanan ini berguna untuk menghitung energi blower minimum yang dibutuhkan.



**Gambar 6.** Pengaruh kecepatan aliran udara dingin terhadap waktu perubahan fasa.

### KESIMPULAN

Proses pembekuan PCM minyak kelapa pada alat penukar kalor dimulai dari bagian terdekat dengan permukaan dinding koil. PCM dengan temperatur lebih rendah bergerak kebawah karean densitasnya lebih tinggi. 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 belum penurunan temperatur belum melewati temperatur perubahan fasa.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membiayai penelitian ini pada skim Hibah Penelitian Berbasis DIPA FT Kelompok Senior tahun 2018.

### DAFTAR PUSTAKA

Antony Aroul Raj, V., Velraj, R. (2011) Heat transfer and pressure drop studies on a PCM-heat exchanger module for free cooling applications, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1573–1582.



- Arkar, C., Medved, S. (2007) Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system, *Solar Energy*, 81, 1078–1087.
- Dadgostar, N. and Shaw, J.M., 2012. A predictive correlation for the constant-pressure specific heat capacity of pure and ill-defined liquid hydrocarbons. *Fluid Phase Equilibria*, 313 211–226.
- Environmental Process Limited. Available from: (<http://www.pcmproducts.net/>).
- Feldman, D. Shapiro, M.M. Banu, D., 1986. Organic phase change materials for thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 13 1–10.
- Hawes, D.W. Feldman, D. Banu, D., 1993. Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings*, 20 77–86.
- Kenisarin, M. dan Mahkamov, K., 2007. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 1913–1965
- Mettaweea, E.S. dan Ead, A.I., 2013. Energy Saving in Building with Latent Heat Storage, *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, 5 21 – 30.
- Turnpenny, J.R., Etheridge, D.W., Reay, D.A. (2000) Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings: part I: testing and theoretical modelling, *Applied Thermal Engineering*, 20, 11, 1019–1037.
- Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F. (2004) Free-cooling of buildings with phase change materials, *International Journal of Refrigeration*, 27, 8, 839–849.
- Zhou, D. et al., 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92 593–605.