

## KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS ALAT PENUKAR KALOR TIPE *STAGGERED FINS* BERISI MATERIAL FASA BERUBAH DARI MINYAK KELAPA PADA PROSES PEMBEKUAN

### Muhammad Irsyad

Dosen  
Universitas Lampung  
Jurusan Teknik Mesin  
muhammad.irsyad@eng.unila.ac.id

### Amrizal

Dosen  
Universitas Lampung  
Jurusan Teknik Mesin  
amrizal@eng.unila.ac.id

### Aji Muhammad Yulian

Mahasiswa S1  
Universitas Lampung  
Jurusan Teknik Mesin  
ajimuyu@gmail.com

### M. Dyan Susila

Dosen  
Universitas Lampung  
Jurusan Teknik Mesin  
m.dyan@eng.unila.ac.id

Indonesia, located in the tropics, has a dependency on air conditioners to obtain the thermal comfort of the room. This phenomenon resulted in the electricity consumption of the building increased significantly. On the other hand, Indonesia has the potential for cold air at night that is in the range of the thermal comfort temperature of the room or lower. The potential for cold air can be exploited by using Phase Change Material (PCM). Coconut oils are commodities that are widely produced in Indonesia. These materials have good potential to be developed as PCM because they have high latent heat and the temperature of phase change matches the temperature of the cold air at night. This research used a staggered fins type heat exchanger with a total of 39 pieces, mounted zig zag with the number of lines was 11. Fins were made of hollow aluminium with a size of 1x0.5 inches with a height of 150 mm. The PCMs used were coconut oil with a mass of 1.5 kg. The temperature and velocity of entering cold air were 20°C, 1 m/s, 2 m/s and 3 m/s. This study aims to determine the ability of PCM to release thermal so that it undergoes phase changes. The results showed that low cold airflow velocity resulted in subcooling while at 3 m/s, subcooling did not occur. The most considerable cooling rate occurred at 3 m/s that was 0.16°C/min. The percentage of solid mass formed after 60 minutes for each velocity was 37.8%, 58%, and 76.2%. The most considerable amount of heat absorbed by air was 167.7 kJ. Based on this, coconut oils are very potential to be developed by observing the temperature and velocity of the enter cold air.

**Keywords:** Phase Change Material, Coconut Oil, Heat Exchanger.

## 1. PENDAHULUAN

Manusia butuh kenyamanan untuk braktifitas dan istirahat dalam sebuah ruangan. Salah satu kenyamanan ruangan yang dibutuhkan manusia adalah kenyamanan termal. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia SNI 6390:2011 adalah temperatur bola kering  $25,5^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  dan kelembaban relatif  $60\% \pm 5\%$  [1]. Kondisi Indonesia yang termasuk daerah tropis dengan temperatur rata-rata tahunan di siang hari  $30^{\circ}\text{C}$  dan ditambah dengan beban termal yang dibangkitkan dalam ruangan maka diperlukan alat pengondisian udara (*air conditioning* disingkat AC) untuk memperoleh kenyamanan termal ruangan tersebut [2]. Hal ini mengakibatkan penggunaan energi listrik bangunan meningkat, sebagai contoh pada bangunan komersial, AC berkontribusi dalam pemaikaain energi listrik sebesar 65% di Indonesia [3], Malaysia sebesar 57% [4], serta China dan USA sebesar 38% [5]. Berdasarkan hal ini upaya efisiensi penggunaan AC sangat membantu mengurangi beban pemakain listrik bangunan.

Salah satu upaya untuk efisiensi pemakaian AC adalah menggunakan material fasa berubah (*phase change material* disingkat PCM) sebagai penyimpan energi termal. PCM ini ada yang digunakan untuk mengurangi beban termal dengan menjadikan material tambahan pada dinding dan plafon, dan ada yang

digunakan pada refrigeran sekunder. Beberapa penelitian menunjukkan pengaruh positif terhadap penurunan beban termal dan konsumsi energi listrik AC diantaranya adalah: menggunakan alat penukar kalor berisi PCM dapat mengurangi beban termal puncak 41% [6], penambahan PCM jenis RT27 dan SP25 dalam bentuk microencapsulated pada dinding dapat menurunkan konsumsi energi bangunan sebesar 15% [7], dan penggunaan PCM minyak kelapa dalam panel pada dinding bagian dalam dapat menurunkan temperatur permukaan dinding bagian dalam hingga 3°C [8].

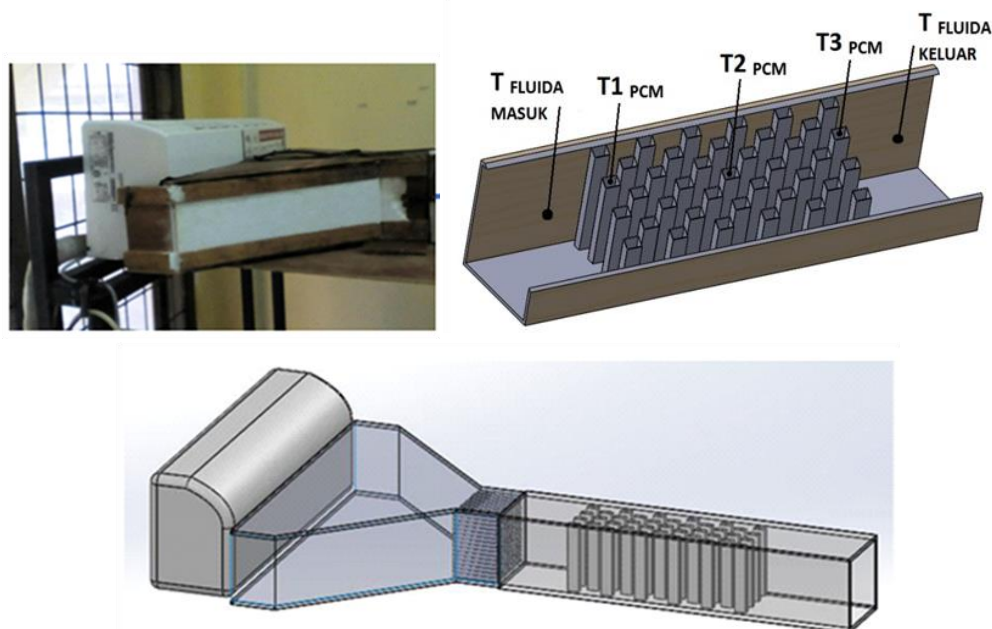
Alat penukar kalor berisi PCM untuk pendinginan ruangan telah ada yang diteliti dengan berbagai tipe seperti: penggunaan penukar panas tubular, penukar panas *shell and tube*, penukar panas *plate and frame* dan teknologi pipa panas yang diirangkum oleh Koukou [9]. Pelat PCM disusun vertikal dan paralel [10], penyimpanan energi termal jenis spiral [11], model tangki dengan PCM yang dienkapsulasi [12].

Disisi lain beberapa daerah di Indonesia memiliki temperatur udara malam hari yang lebih rendah dari temperatur kenyamanan termal manusia [13]. Kondisi ini merupakan potensi yang dapat dimanfaatkan dalam proses pelepasan energi termal PCM (*discharging*), sehingga pada siang hari dapat dimanfaatkan kembali. Pemanfaatan potensi dengan PCM ini dapat berupa panel pada dinding, partisi dan plafon, material bangunan, serta digunakan dalam alat penukar kalor. Berdasarkan hal ini perlu dilakukan penelitian karakteristik perpindahan panas pada alat penukar kalor berisi minyak kelapa untuk mengetahui kelayakan penggunaannya dalam mendinginkan ruangan dengan memanfaatkan udara malam hari.

## 2. METODE DAN BAHAN

### 2.1 Metode

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental pada alat penukar kalor tipe *staggered fins* berisi PCM untuk mengetahui karakteristik perpindahan panasnya. Skema dan foto alat uji diperlihatkan pada Gambar 1. Dalam penelitian ini ada dua hal yang dianalisa yakni laju pendinginan dan laju perpindahan panas. Parameter yang diuji adalah temperatur udara masuk dan keluar serta temperatur PCM dalam fins di tiga titik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Data ini diambil pada temperatur udara masuk sebesar 20°C dengan beberapa variasi kecepatan yakni: 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s. Laju aliran massa udara untuk masing-masing kecepatan tersebut adalah: 0,02 kg/s, 0,05 kg/s dan 0,08 kg/s. Pemilihan temperatur udara masuk sebesar 20°C adalah untuk mendekati temperatur udara lingkungan terendah yang memungkinkan terjadi di beberapa daerah di Indonesia.



**Gambar 1.** Foto dan skema alat uji alat penukar kalor tipe *staggered fins*

Dari data temperatur PCM tersebut dihitung laju pendinginan rata-ratanya. Laju pendinginan dihitung persatuan luas penampang. Perhitungan laju pendinginan rata-rata menggunakan Persamaan 1. Sedangkan dari data temperatur udara masuk dan keluar diperoleh laju perpindahan panas pada alat penukar kalor dengan menggunakan Persamaan 2. Total energi yang dilepaskan oleh PCM dihitung menggunakan persamaan

kesetimbangan energi dengan asumsi tidak ada kalor yang masuk ke dalam sistem yakni energi yang diserap oleh udara sama dengan energi yang dilepaskan PCM, seperti diperlihatkan pada Persamaan 3. Data ini kemudian digunakan untuk memprediksi persentase massa padatan PCM yang terbentuk dengan menggunakan Persamaan 4.

$$\dot{T} = (T_a - T_o)/(t_a - t_o) \tag{1}$$

$$\dot{Q}_{udara} = \dot{m}C_p dT \tag{2}$$

$$Q_{udara} = Q_{PCM} \tag{3}$$

$$Q_{PCM} = (\Delta x_s)mC_{ps}dT + (\Delta x_{sl})mL + (\Delta x_l)mC_{pl}dT \tag{4}$$

Notasi yang digunakan dalam Persamaan 1 sampai Persamaan 4 adalah sebagai berikut:  $\dot{T}$  adalah Laju pendinginan ( $^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ ).  $T$  adalah Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan  $t$  adalah waktu (min) dengan notasi *subscript a* dan *o* menunjukkan kondisi akhir dan awal.  $\dot{Q}$  adalah laju perpindahan panas (Watt).  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa (kg/s).  $C_p$  adalah panas spesifik (kJ/kg.K).  $\Delta T$  adalah perbedaan temperatur (K).  $Q$  adalah total energi (kJ).  $m$  adalah massa (kg).  $\Delta x$  adalah persentase massa dengan notasi *subscript s* untuk fasa padat, *l* untuk fasa cair dan *sl* untuk perubahan fasa (%).

Alat penukar kalor yang digunakan tipe *staggered fins* memiliki 39 fin yang disusun secara zig zag dengan jumlah baris 11 pada saluran dengan ukuran penampang 100 x 150 mm. Baris ganjil berjumlah 4 fin dan baris genap berjumlah 3 fin. Fin terbuat dari aluminium hollow dengan ukuran 1x0,5 inch dengan dan tinggi 150 mm. Jumlah fin yang digunakan adalah 39 buah. Jarak celah antara fin pada baris yang sama adalah 0,5 inch dan jarak celah antar baris adalah 1 inch. Luas permukaan perpindahan panas total alat penukar kalor adalah 0,45 m<sup>2</sup>. Udara dingin berasal dari AC 1 Pk yang disambungkan ke alat uji. Kecepatan aliran diseting dengan mengatur kecepatan fan AC. Agar aliran udara seragam melewati alat penukar kalor maka dipasang *honeycomb* pada saluran masuk.

## 2.2 Bahan

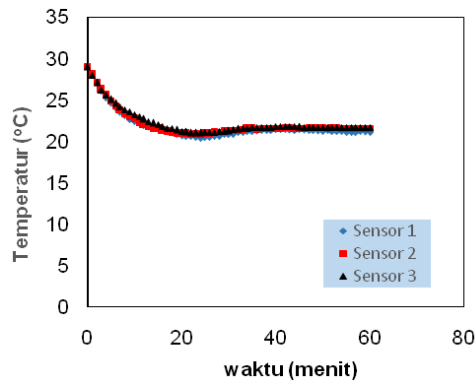
Material yang digunakan sebagai PCM adalah minyak kelapa merek Barco dengan massa 1,5 kg. Beberapa sifat minyak kelapa yang dibutuhkan dalam perhitungan dari berberbagai sumber terangkum dalam Tabel 1.

**Tabel 1:** Sifat-sifat minyak kepala.

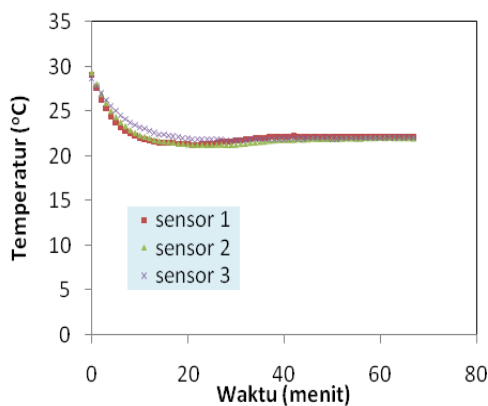
NO.	SIFAT MATERIAL	NILAI	SATUAN	REFERENSI
1	Kerapatan	916	kg/m <sup>3</sup>	14
2	Viskositas	27,4	mm <sup>2</sup> /s	16
3	Panas spesifik (cair)	2,35	kJ/kg.K	17
4	Panas spesifik (padat)	3,23	kJ/kg.K	17
5	Panas laten	103,25	kJ/kg	15
6	Konduktivitas termal	0,321	W/m.K	17
7	Temperatur pelelehan	22 -24	$^{\circ}\text{C}$	15
8	Temperatur pembekuan	18 - 20	$^{\circ}\text{C}$	18

## 3. HASIL DAN DISKUSI

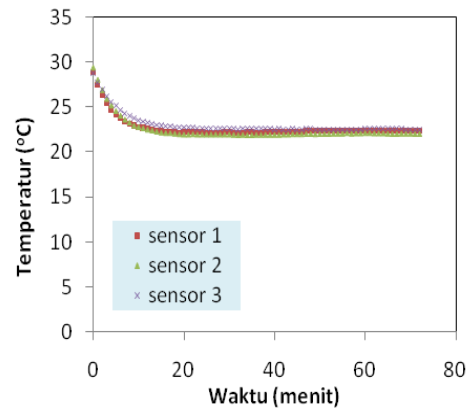
Hasil pengujian alat penukar kalor dengan temperatur udara masuk 20 $^{\circ}\text{C}$  untuk masing-masing titik pengujian temperatur dengan variasi kecepatan aliran udara yakni: 1 m/s, 2 m/s dan 3 m/s dibuat dalam bentuk grafik hubungan antara temperatur PCM terhadap waktu, seperti diperlihatkan pada Gambar 2. PCM yang ditempatkan pada baris pertama pada alat penukar kalor lebih dahulu mengalami perubahan temperatur dibandingkan dengan posisi setelahnya. Temperatur PCM setelah 60 menit untuk ketiga titik hampir sama yakni 22 $\pm$ 0,22 $^{\circ}\text{C}$ . Ini menunjukkan bahwa temperatur PCM yang berada disetiap fin dari baris pertama sampai baris ke sebelas tidak jauh beda dan dapat mencapai temperatur perubahan fasa dalam waktu 60 menit. Pada saat temperatur PCM telah mendekati 22 $^{\circ}\text{C}$  penurunan temperatur PCM sangat kecil sekali. Hal ini terjadi selain karena perubahan fasa juga akibat perbedaan temperatur udara dingin dengan PCM sudah kecil yakni  $\pm$  2 $^{\circ}\text{C}$ .



a. Kecepatan 1 m/s

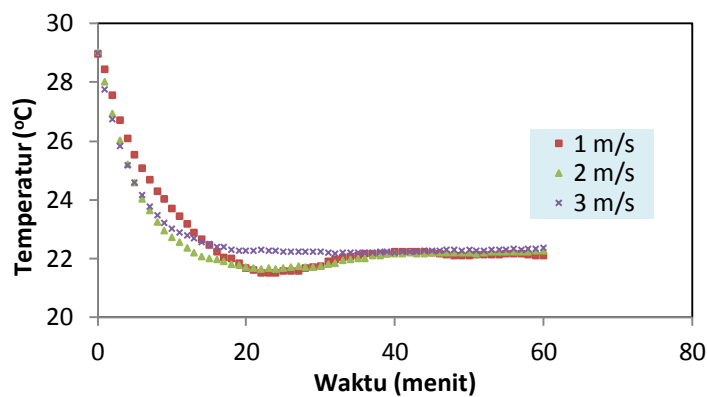


b. Kecepatan 2 m/s



c. Kecepatan 3 m/s

**Gambar 2:** Temperatur PCM dalam alat penukar kalor dengan temperatur udara masuk 20°C



**Gambar 3:** Pengaruh kecepatan aliran udara masuk pada temperatur 20°C terhadap proses pendinginan PCM minyak kelapa

Pada proses pendinginan ini, kecepatan aliran udara dingin mempengaruhi proses pembekuan PCM minyak kelapa, seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Perbedaan yang signifikan terlihat pada saat temperatur PCM memasuki temperatur perubahan fasa. Aliran udara dengan kecepatan 1 m/s dan 2 m/s mengalami *subcooling*, sedangkan pada kecepatan 3 m/s tidak terjadi. Proses *subcooling* terlihat pada saat temperatur mencapai temperatur perubahan fasa, PCM tetap dalam kondisi cair dan temperatur terus berkurang dan setelah mencapai temperatur minimumnya temperatur kembali naik. Pada saat temperatur kembali mencapai temperatur perubahan fasa maka terjadi proses pembekuan PCM dan temperatur PCM relatif konstan. Besarnya *subcooling* yang terjadi pada kecepatan udara pendinginan 1 m/s adalah 0,76°C. Sedangkan pada kecepatan aliran udara pendinginan 2 m/s *subcooling* relatif lebih kecil yakni 0,55°C. Dari Gambar 3 ini memperlihatkan *subcooling* semakin besar terjadi apabila kecepatan aliran udara dingin semakin kecil. Hasil perhitungan laju pendinginan untuk masing-masing kecepatan aliran udara dingin menggunakan Persamaan 1 adalah: 0,138°C/min untuk kecepatan 1 m/s, 0,157°C/min untuk kecepatan 2 m/s, dan 0,161°C/min untuk kecepatan 3

m/s. Bertambahnya kecepatan aliran udara dingin berdampak terhadap peningkatan laju perpindahan panas PCM. Semakin tinggi laju perpindahan panas maka proses pembentukan inti (*nucleation*) akan semakin cepat sehingga proses pembekuan mulai terjadi. Fluida yang bersentuhan dengan dinding akan cepat mencapai temperatur pembekuan sehingga terjadi pembentukan inti. Partikel padat yang terbentuk akan turun ke bawah dan fluida lain yang bersentuhan dengan dinding akan mengalami pembentukan inti. Adanya pergerakan molekul dan partikel padat dalam fluida juga membantu pembentukan inti. Proses yang terjadi ini dapat mengurangi *subcooling* yang terjadi. Keuntungan tidak ada *subcooling* adalah proses pembekuan langsung terjadi pada saat temperatur mencapai temperatur perubahan fasanya, sehingga waktu yang dibutuhkan lebih singkat dan perbedaan temperatur PCM dengan temperatur udara pendinginannya masih relatif besar sehingga memungkinkan untuk mengambil energi termal sehingga terjadi perubahan fasa.

Energi yang dibutuhkan pada proses pendinginan untuk masing-masing kecepatan dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan 2 adalah: 106,74 kJ untuk kecepatan 1 m/s, 136,5 kJ untuk kecepatan 2 m/s dan 167,7 kJ untuk kecepatan 3 m/s. Peningkatan kecepatan aliran udara memperbesar kemampuan perpindahan panasnya. Berdasarkan data panas laten pada Tabel 1, maka energi yang dibutuhkan untuk perbuahan fasa minyak kelapa dari cair menjadi padat dengan jumlah 1,5 kg adalah 154,3 kJ. Analisis energi yang dilepaskan PCM menggunakan persamaan kesetimbangan energi dengan asumsi tidak ada kalor yang keluar dari sistem. Dengan menggunakan metode ini dan Persamaan 4 dapat memprediksi konsentrasi massa padatan PCM yang terbentuk. Dari hasil perhitungan diperoleh konstansi massa padatan yang terbentuk pada kecepatan 1m/s adalah 37,8%, kecepatan 2 m/s adalah 58% dan pada kecepatan 3 m/s adalah 76,2%.

#### 4. KESIMPULAN

Perbedaan temperatur PCM setiap baris pada proses pendinginan tidak signifikan. Kecepatan aliran udara dingin yang rendah mengakibatkan terjadinya subcooling dan pada kecepatan 3m/s subcooling tidak terjadi. Laju pendinginan terbesar terjadi pada kecepatan 3m/s yakni 0,16°C/min. Persentase massa padat yang terbentuk setelah 60 menit untuk masing-masing kecepatan adalah: 37,8%, 58% dan 76,2%. Jumlah kalor terbesar yang diserap oleh udara adalah 167,7kJ. Berdasarkan hal ini minyak kelapa sangat potensial untuk dikembangkan dengan memerhatikan temperatur dan kecepatan udara dingin masuk.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih pada LPPM Universitas Lampung yang telah mendanai penelitian ini dalam skim Penelitian Unggulan DIPA BLU tahun 2019

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI 6390:2011, *Konservasi Energi Sistem Tata Udara Pada Bangunan Gedung*, Jakarta, Badan Standarisasi Nasional (BSN) 2011.
- [2] BPS, *Statistik Indonesia 2015*, Jakarta, Badan Pusat Statistik, 2015.
- [3] YOSHIDA, K., *Study on Energy Efficiency Conservation and Efficiency Improvement in The Republic Indonesia*, In final report Japan International Cooperation Agency (JICA), 2009.
- [4] SAIDUR, R., "Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings", *Energy Policy*, v. 37, n. 10, pp. 4104–4113, Oct. 2009.
- [5] XIA, J., HONG, T., SHEN, Q., FENG, W., YANG, L., IM, P., LU, A., dan BHANDARI, M., "Comparison of building energy use data between the United States and China", *Energy and Buildings*, v. 78, pp. 165 – 175, 2014.
- [6] MOROVAT, N., ATHIENITIS, A.K., CANDANEDO, J.A., DERMARDIROS, V., "Simulation and performance analysis of an active PCM-heat exchanger intended for building operation optimization", *Energy & Buildings*, v. 199, pp. 47–61, Sept. 2019.
- [7] CASTELL, A., MARTORELL, I., MEDRANO, M., PEREZ, G., dan CABEZA, L.F., "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling", *Energy and Buildings*, v. 42, n. 4, pp. 534 – 540, Apr. 2010.
- [8] IRSYAD, M., PASEK, A.D., INDARTONO, Y.S., PRATOMO, A.W., "Heat transfer characteristics of building walls using phase change material", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, v. 60, 012028, pp. 1-6, 2017.
- [9] KOUKOUA, M.K., VRACHOPOULOSA, M.G., TACHOSA, N.S., DOGKASA, G., LYMPERISB, K., dan STATHOPOULOSC, V., "Experimental and computational investigation of a latent heat energy storage system with a staggered heat exchanger for various phase change materials", *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 7, pp. 87–98, Sept. 2018.

- [10] BROUSSEAU, P., dan LACROIX, M., “Study of the thermal performance of a multi-layer PCM storage unit”, *Energy Conversion Management*, v. 37, n. 5, pp. 599–609, May 1996.
- [11] BANASZEK, J., DOMANSKI, R., REBOW, M., dan EL-SAGIER, F., “Numerical analysis of the paraffin wax-air spiral thermal energy storage unit”, *Applied Thermal Engineering*, v. 20, n.4, pp. 323–354, March 2000.
- [12] ISMAIL, K.A.R., dan HENRIQUEZ, J.R., “Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system”, *Applied Thermal Engineering*, v. 22, n. 15, pp. 1705–1716, Oct. 2002.
- [13] IRSYAD, M., dan HARMEN, “Potensi Material Fasa Berubah untuk Aplikasi Penyejuk Ruangan di Indonesia”, In: *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Material, Sistem Manufaktur, dan Energi*, pp. 108112, Makassar, Nov. 2016.
- [14] MBULU, B.C.P., WARDANA, I.N.G., dan Siswanto, E., “Produksi Hidrogen dari Campuran Air dan Minyak Kelapa Murni (VCO) Melalui Porous Media Tembaga Menggunakan Prinsip Hydrogen Reformer”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 7, n. 2, pp. 87 – 93, Agust. 2016
- [15] METTAWEE, E.S., dan EAD, A.I., “Energy Saving in Building with Latent Heat Storage”, *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, v. 5, n.1, pp. 21 – 30, 2013
- [16] BERLAMEN, J.G., dan SUNIL, J., “Enhancement of Kinematic viscosity of coconut oil”, *International Journal of Engineering Development and Research*, v. 6, n. 3, pp. 430 – 432, 2018.
- [17] SILALAH, A.O., SUKMAWATI, N., SUTJAHJA, I.M., KURNIA, D., dan WONORAHARDJO, S., “Thermophysical Parameters of Organic PCM Coconut Oil from T-History Method and Its Potential as Thermal Energy Storage in Indonesia”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*, v. 214, 012034, pp. 1-8, 2017.
- [18] PUTRI, W.A., FAHMI, Z., SUTJAHJ, I.M., KURNIA, D., dan WONORAHARDJO, S., “Thermophysical parameters of coconut oil and its potential application as the thermal energy storage system in Indonesia”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 739, n.1, 012065, pp. 1-6, 2016.