

Studi Eksperimental Kinerja Temperatur dan Energi Integrasi Bio-PCM Pada Chest Freezer

I Nyoman Suamir✉, I Made Rasta

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali

✉ nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstrak: *Chest freezer* pada operasionalnya memerlukan beban transien yang fluktuatif dari waktu ke waktu sesuai dengan kondisi lingkungan. Untuk mampu memenuhi kebutuhan beban pendinginan maksimum, *chest freezer* umumnya dirancang dengan kapasitas lebih besar dari beban pendinginan yang dibutuhkan. Akibatnya sistem *chest freezer* kurang efisien dan kurang handal akibat sering mati-hidup selama operasi. Oleh karena itu perlu dikembangkan sistem *chest freezer* yang dapat mengurangi siklus mati-hidupnya kompresor dan menghemat penggunaan energi fosil. Penelitian ini mengkaji teknologi refrigerasi *chest freezer* dengan siklus kompresor yang kecil dan memiliki potensi untuk diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan. Pendekatan teknologi yang diterapkan adalah teknologi *chest freezer* berbasis *vegetable oil phase change materials* (bio-PCM). Hasil investigasi menunjukkan bahwa penggunaan bio-PCM dapat menurunkan siklus kompresor dan mampu menjaga temperatur produk di bawah -15°C . Konsumsi energi teknologi *freezer* yang diusulkan relatif sama dengan *freezer* tanpa bio-PCM. Tetapi bio-PCM dapat membuat *chest freezer* sangat potensial diintegrasikan dengan sumber energi surya.

Kata kunci: *Chest freezer, bio-PCM, kinerja temperatur, kinerja energi.*

Abstract: *Chest freezers in their operations experience transient loads that fluctuate from time to time with environmental conditions. To satisfy the maximum cooling demand, chest freezers are normally oversized. This can cause inefficient operation and less reliable due to frequent on-off cycling. Therefore, a reliable and efficient energy chest freezer is essential to be developed. This study examined technology with lower on-off cycles and potential to be integrated with renewable energy sources. The technology approach was a chest freezer technology incorporated vegetable oil phase change materials (bio-PCM). The results showed that integration of bio-PCM could significantly reduce on-off cycle of the compressor and maintain the product temperature below -15°C . Energy consumption of the investigated freezer with bio-PCM consumed nearly the same energy compared to chest freezer without bio-PCM. However, the use of bio-PCM in the chest freezer makes it be highly potential to be integrated with solar energy sources.*

Keywords: *Chest freezer, bio-PCM, temperature performances, energy performances.*

I. PENDAHULUAN

Sistem refrigerasi yang salah satunya adalah *chest freezer* memegang peranan yang penting dalam rantai makanan (*food chain*), baik menjaga keamanan dan kualitas banyak makanan dan memungkinkan makanan dipasok dari produsen ke konsumen. Refrigerasi juga memiliki peran penting dalam mengurangi kerugian pasca panen. Kurang dari 10% bahan pangan yang mudah rusak didinginkan dengan sistem refrigerasi dan diperkirakan kerugian pasca panen saat ini mencapai 30% dari total produksi. Coulomb [1] dan IIR [2] melaporkan bahwa total produksi pangan global adalah 5.500 juta ton, setidaknya 33% membutuhkan pendinginan namun hanya 7% yang diawetkan melalui sistem refrigerasi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah sistem pendinginan yang tersedia pada suatu negara maka kerugian pasca panen negara tersebut lebih rendah.

Tetapi perkembangan rantai dingin (*cold chain*) sebagai bagian dari rantai pangan (*food chain*) di Indonesia masih sangat rendah. Pada tahun 2016, negara ini memiliki kapasitas *cold storage* di dalam rantai dinginnya sebesar 12,3 juta m^3 atau kurang dari 0,05 m^3 per kapita. Sebagai perbandingan kapasitas *cold storage* per kapita beberapa negara seperti UK 0,39 m^3 , USA 0,36 m^3 , Jepang 0,26 m^3 , India 0,10 m^3 , Brasil 0,08 m^3 , dan Cina 0,06 m^3 . Dengan

demikian Indonesia membutuhkan investasi yang masih sangat besar untuk sistem rantai dingin [3,4].

Sehubungan dengan isu lingkungan, peningkatan konsumsi produk pangan berdampak pada emisi gas rumah kaca (GRK) atau pemanasan global akibat konsumsi energi. Di Indonesia, pemerintah berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 26% (dengan kekuatan sendiri) dan 41% (dengan dukungan internasional) pada tahun 2020. Emisi gas rumah kaca dari sektor komersial diperkirakan sekitar 0,7% (3,8 juta ton CO_2) dari emisi total sebesar 540 juta ton CO_2 [5]. Teknologi refrigerasi bertanggung jawab 15% dari seluruh listrik yang dikonsumsi di dunia [1] dan sekitar 72% dampak pemanasan global dari sistem refrigerasi adalah karena konsumsi energi [6]. Mengurangi konsumsi energi sistem refrigerasi menjadi prioritas utama dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dari rantai pangan (*food chain*). Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi dan dampak lingkungan *chest freezer* pada rantai pangan adalah melalui penggunaan teknologi refrigerasi yang efisien dan teknologi energi berkelanjutan.

Aplikasi TES (*thermal energy storage*) disesuaikan berdasarkan jenis bahan PCM (*phase change material*) yang digunakan. PCM yang paling umum digunakan mencakup organik, inorganik dan campuran dari kedua

jenis bahan organik-inorganik [7]. Adapun PCM yang baik adalah bahan yang memiliki kapasitas termal tinggi dan rentang temperatur perubahan fasenya konstan [8]. PCM yang terbuat dari bahan organik saat ini menjadi pilihan yang menarik untuk berbagai aplikasi karena keunggulan-keunggulan sifat-sifat termalnya seperti misalnya parafin dan lemak jenuh seperti yang dilaporkan oleh Su *et al.* [9] dan Giro-Paloma *et al.* [10]. Parafin merupakan PCM organik yang paling populer karena memiliki super cooling yang rendah dan rentang temperatur perubahan fase yang lebar. Struktur kimia Parafin juga stabil pada saat terjadi proses perubahan fase [11]. Tetapi parafin juga memiliki kelemahan antara lain konduktivitas termal dan panas laten yang rendah, mudah terbakar dan perubahan volume yang besar pada saat terjadi perubahan fase [12].

PCM untuk aplikasi *freezer* bisa dari bahan parafin, larutan garam, atau material yang berbahan dasar air [13]. Untuk PCM dari larutan garam, titik beku dan titik leburnya dapat diturunkan dengan meningkatkan konsentrasi larutannya. Tetapi makin rendah titik leburnya maka makin korosif dan kalor latennya semakin rendah dibandingkan dengan air [14]. Sampai saat ini sudah mulai banyak diteliti penggunaan bahan minyak sayur sebagai *nucleating agents* yang dilarutkan ke dalam air dan mampu menurunkan titik beku di bawah 0°C. Minyak sayur mengandung berbagai jenis asan lemak jenuh dan ester dari minyak tersebut memiliki potensi yang baik sebagai bahan PCM organik [15]. Bahan organik dari ester minyak jagung dan berbahan dasar air juga berpotensi menjadi PCM organik untuk temperatur di bawah 0°C [16,17]. Campuran ester tersebut dilaporkan mampu menurunkan titik lebur dan titik beku air, sehingga mampu diterapkan pada aplikasi refrigerasi temperatur medium dan rendah. Disamping itu ester minyak jagung dan kedelai mampu menghilangkan super cooling dari air serta memiliki kalor laten yang masih tinggi, sehingga sangat cocok diterapkan sebagai bahan PCM organik untuk temperatur rendah seperti *chest freezer*.

Dilaporkan bahwa PCM murah berbasis larutan garam ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) dapat diterapkan pada *freezer* sebagai TES, tetapi PCM jenis ini sangat korosif dan masih ada *super-cooling* [18]. Penelitian eksperimental juga telah dilakukan oleh Azzouz *et al.* [19] pada refrigerator domestik yang diintegrasikan dengan PCM dan ditempatkan pada bagian belakang dari evaporator. Pemasangan PCM ini dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan memberikan kapasitas pendinginan dalam beberapa jam tanpa suplai listrik.

Cheralathan *et al.* [20] melakukan penelitian experimental kinerja sistem refrigerasi industri yang diintegrasikan dengan kapsul PCM yang ditempatkan pada tangki penyimpanan dimana evaporator dari sistem refrigerasi juga dipasang. Ditemukan bahwa kinerja termal dari sistem dapat ditingkatkan dengan melakukan pengisian PCM pada temperatur kondensasi yang rendah dan juga pada temperatur evaporator yang optimal. Setiap 1 K penurunan temperatur evaporator dapat menyebabkan 3-4% peningkatan konsumsi energi dan setiap 1 K

penurunan temperatur kondensasi menyebabkan turunnya konsumsi energi sampai sekitar 3%.

Investigasi aplikasi PCM pada *freezer* komersial sudah dilakukan oleh Oró *et al.* [21] dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja termal dari *freezer* pada saat pintu dibuka dan pada saat listriknya padam. PCM yang digunakan adalah PCM berbasis larutan garam sehingga PCM ditempatkan pada sebuah panel dari bahan *stainless steel* yang ditempatkan di dalam *freezer*. Penggunaan PCM dapat mempertahankan temperatur produk pada tingkat aman lebih lama dibandingkan *freezer* tanpa PCM. Akhir-akhir ini, penelitian aplikasi PCM berbasis larutan garam pada *chest freezer* juga sudah dilakukan dengan menempatkan PCM pada dinding evaporator [22]. PCM dikemas dalam dua model, yaitu pertama dengan model kantong PCM yang ditempelkan pada sebuah pelat aluminium kemudian pelat dan PCM bersama-sama ditempelkan pada dinding *freezer*, kedua dengan model penempatan pada *honey comb* aluminium. Dilaporkan bahwa penempatan PCM dengan model kantong aluminium dapat mengurangi ruang untuk produk, konsumsi energi meningkat tapi siklus *on/off* kompresor jauh berkurang. Sedangkan untuk model *honey comb* dapat menghemat energi sebesar 2%, siklus *on/off* kompresor juga berkurang. Kinerja *chest freezer* dengan PCM sangat sensitive terhadap setting dari thermostat.

Penelitian-penelitian pada aplikasi *freezer* komersial yang ada saat ini, umumnya menggunakan PCM yang berbasis garam yang sangat korosif. Artikel ini melaporkan hasil investigasi dari integrasi bio-PCM berbasis air dan ester minyak jagung yang tidak korosif dan pengaruhnya terhadap kinerja termal dan energi dari *chest freezer*.

II. METODE PENELITIAN

A. Chest Freezer

Chest freezer yang digunakan pada penelitian ini adalah *chest freezer* yang sudah ada di pasaran lokal dengan kapasitas 100 Liter dan menggunakan refrigeran ramah lingkungan yaitu refrigeran hidrokarbon R-600a. Konsumsi daya dari *chest freezer* setara dengan 1/10 PK (sekitar 60-75 W). Adapun *chest freezer* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 1.

Chest freezer tipe ini memiliki kompresor hermetik tipe piston sehingga mampu bekerja dengan *temperature lift* yang relative tinggi sesuai dengan kebutuhan *freezer* pada umumnya. Kondensornya menggunakan konsep perpindahan panas *natural flow* dengan memasang pipa kondensor pada bagian luar dinding *freezer* tepat di sisi dalam pelat luar *freezer*. Kondensor di samping membuang panas juga berfungsi mencegah adanya kondensasi pada dinding luar *freezer*. Evaporatornya juga menggunakan konsep perpindahan panas konveksi natural dengan menempatkan pipa evaporator menempel dengan pelat bagian dalam dari dinding *freezer*. Antara pipa evaporator dan pipa kondensor diinjeksi dengan *polyurethane foam* dengan ketebalan sekitar 70 mm. *Polyurethane foam* ini berfungsi sebagai isolator yang meminimal-kan beban transmisi dari dinding *freezer* akibat perbedaan temperatur kondensor dan evaporator.

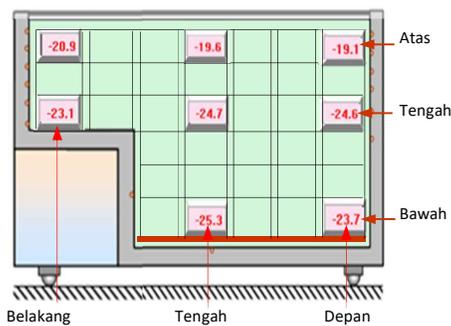


Gambar 1. Chest freezer yang disiapkan untuk penelitian.

B. Pembebanan Chest Freezer

Untuk penempatan beban dari produk di dalam chest freezer dan sensor alat ukur pada penelitian eksperimental ini mengacu kepada standar [23]. Posisi penempatan produk dan pengukurannya dapat dilihat pada Gambar 2. Pengukuran temperatur produk pada berbagai posisi bertujuan untuk mendapatkan kinerja temperatur dari sistem chest freezer.

Pandangan samping



Gambar 2. Penempatan produk dan sistem pengukuran di dalam chest freezer.



Gambar 3. Paket PCM yang siap diintegrasikan ke dalam chest freezer.



Gambar 4. Sistem instrumentasi dan data logging.



Chest freezer tanpa bio-PCM



PCM di sisi dalam evaporator

Gambar 5. Chest freezer tanpa dan dengan paket bio-PCM.

C. Paket Bio-PCM

Pengembangan paket bio-PCM diawali dengan membuat rancangan kotak PCM dengan mempertimbangkan bahwa bio-PCM tidak bocor pada saat diintegrasikan dengan chest freezer karena bio-PCM berwujud cair pada temperatur di atas titik bekunya. Bio-PCM yang digunakan adalah campuran ester minyak jagung (*Corn-oil ester*) dan air.

Paket bio-PCM juga memiliki pengantar panas yang baik dan cukup kokoh untuk dapat diintegrasikan pada chest freezer. Untuk itu kotak bio-PCM dirancang dari bahan pelat aluminium dengan ketebalan minimum 0.5 mm. Paket bio-PCM dibuat dalam bentuk yang relatif kecil disesuaikan dengan ukuran dari ruang chest freezer (Gambar 3). Untuk chest freezer 100 Liter diperlukan lima buah paket bio-PCM dengan total volume sekitar 9 Liter.

D. Kondisi Pengujian dan Sistem Instrumentasi

Pengujian dilakukan di dalam sebuah ruangan yang terbuka, sehingga kondisi di sekitar pengujian relatif sama dengan kondisi lingkungan. Temperatur lingkungan dimonitor dan dicatat dengan data logging system.

Chest freezer dilengkapi dengan sistem instrumentasi yang lengkap untuk mengukur temperatur dari freezer pada berbagai posisi. Ada 24 termokopel dipasang pada bagian inti (di tengah-tengah produk) khusus untuk mengukur variasi temperatur produk. Sebagian termokopel juga dipasang pada bagian atas dari produk yang paling atas. Juga ada termokopel yang dipasang pada dinding evaporator dan sebagian lagi digunakan untuk mengukur sistem refrigerasi dari chest freezer. Daya yang dikonsumsi oleh chest freezer juga diukur dengan menggunakan power analyser. Sistem instrumentasi dan data logging system disajikan pada Gambar 4 dan posisi penempatan sensor pengukuran temperatur produk di dalam chest freezer dapat dilihat pada Gambar 2.

Termokopel yang digunakan pada pengujian ini adalah termokopel tipe T dengan deviasi maksimum sebesar ± 0.5 °C. Sistem pengukuran yang lain adalah memonitor dan mencatat konsumsi daya dengan menggunakan power analyzer Lutron DW6092 dengan ketidakpastian sebesar $\pm 0.05\%$.

E. Prosedur Pengujian

Pada pengujian ini penempatan produk dan titik-titik pengukuran mengacu kepada standar [24]. Pengujian mencakup chest freezer tanpa PCM dan chest freezer dengan Bio-PCM yang integrasinya dengan menggunakan

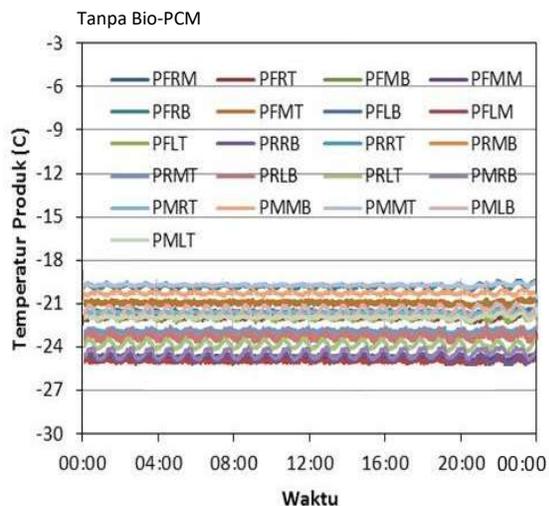
paket Bio-PCM dan ditempelkan ke dinding evaporator. Gambar 5 menyajikan *chest freezer* tanpa dan dengan Bio-PCM. Volume PCM yang terpasang 9 Liter dan terjadi pengurangan volume *chest freezer* sekitar 10%.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

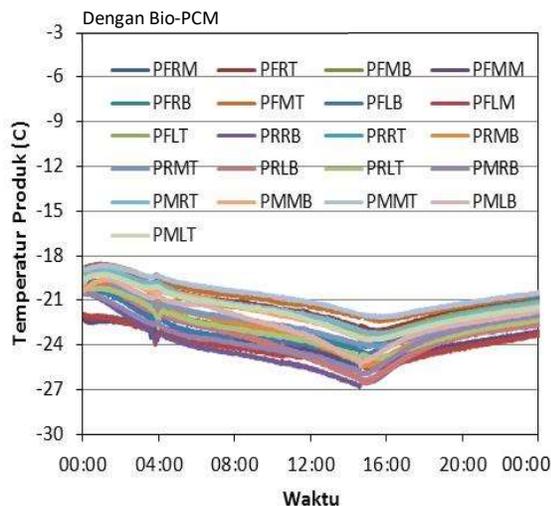
A. Temperatur Produk dan PCM

Parameter kinerja dari sistem *chest freezer* terdiri atas temperatur produk, temperatur PCM dan konsumsi energi. Variasi temperatur produk pada berbagai posisi di dalam *chest freezer* tanpa PCM dapat dilihat pada Gambar 6, sedangkan untuk *chest freezer* dengan Bio-PCM disajikan pada Gambar 7.

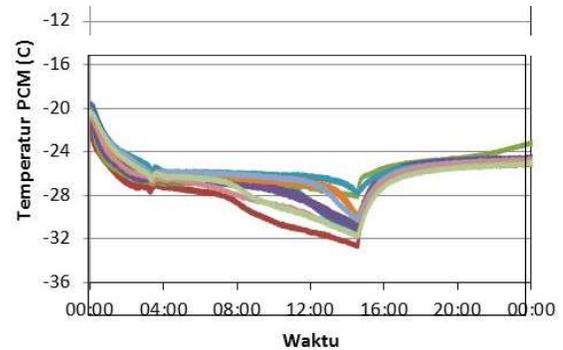
Dari Gambar 6 dapat diketahui bahwa *chest freezer* tanpa PCM temperatur produk relatif sangat stabil dengan fluktuasi yang kecil sebagai akibat dari respon dari kerja kompresor dengan jumlah siklus *on/off* sebanyak 23 kali per hari (dalam 24 jam). Variasi temperatur dari produk berada pada rentang antara -19°C an -25°C .



Gambar 6. Variasi temperatur produk di dalam *chest freezer* tanpa PCM.



Gambar 7. Variasi temperatur produk di dalam *chest freezer* dengan Bio-PCM.



Gambar 8. Variasi temperatur PCM di dalam *chest freezer*.

PFRM, PFRT, PFMB dan seterusnya menunjukkan posisi produk yang diukur temperaturnya. Posisi ditunjukkan dengan kombinasi posisi: Huruf I yaitu P = produk; Huruf II menunjukkan posisi: depan (F = *front*), tengah (M = *middle*), belakang (R = *rear*); Huruf III sebagai indikasi posisi: kanan (R = *right*), tengah (M = *middle*), kiri (L = *left*); Huruf IV berarti posisi vertikal, atas (T = *top*), tengah (M = *middle*), bawah (B = *bottom*)

Sedangkan untuk *chest freezer* dengan Bio-PCM jumlah siklus *on/off* dari kompresor menurun dengan drastis menjadi 1 siklus dalam 27 jam 20 menit atau kurang dari 1 siklus per hari. Temperatur produknya dengan variasi yang relatif lebih lebar dibandingkan dengan produk di dalam *chest freezer* tanpa PCM yaitu antara $-18,5^{\circ}\text{C}$ dan -27°C , seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7. Variasi temperatur produk pada rentang ini masih termasuk katagori kabinet L1 menurut standar [24].

Menurunnya jumlah siklus *on/off* yang sangat drastis pada *chest freezer* dengan Bio-PCM dan tetap mampu menjaga temperatur produk berada pada rentang klasifikasi dari *freezer*. Menurunnya jumlah siklus *on/off* merupakan keunggulan dari *chest freezer* dengan Bio-PCM karena sangat potensial untuk diterapkan pada daerah dimana suplai listrik sering ada gangguan atau daerah yang belum memiliki suplai listrik. Kalau ada gangguan suplai listrik, beban termal dari *chest freezer* akan diserap oleh bio-PCM sehingga temperatur produk dapat dipertahankan. Untuk aplikasi di daerah yang belum ada suplai listriknya, *chest freezer* dengan bio-PCM dapat diintegrasikan dengan sumber daya tenaga surya. Dengan menghidupkan *chest freezer* hanya sekitar setengah hari khususnya pada siang hari dan setengah hari berikutnya (pada malam hari) *chest freezer* masih dapat berfungsi dengan baik melalui pemanfaatan dingin yang disimpan di dalam bio-PCM dimana beban termal *chest freezer* diserap oleh bio-PCM dan temperatur produk tetap dapat dijaga pada rentang kebutuhan standar BS EN ISO 23953-2 [24].

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa variasi temperatur produk per titik posisi pengukuran di dalam *chest freezer* tanpa bio-PCM berada di bawah 1°C . Sedangkan untuk *chest freezer* dengan bio-PCM variasi temperatur produk per titik posisi pengukuran mencapai 5°C (Gambar 7). Variasi temperatur produk ini, walaupun masih di dalam rentang yang diperbolehkan oleh standar, merupakan kelemahan dari kinerja termal *chest freezer* dengan bio-PCM dibandingkan dengan yang tanpa bio-PCM.

Pada Gambar 8 ditunjukkan variasi temperatur bio-PCM yang dipasang pada dinding evaporator *chest freezer*. Dari gambar dapat diketahui bahwa bio-PCM mengalami perubahan fase pada temperatur $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa *setting* termostat dari *chest freezer* sudah optimum dan PCM dapat menjaga temperatur produk dalam waktu yang relatif lama walaupun kompresor tidak beroperasi.

B. Konsumsi Energi

Konsumsi energi dari *chest freezer* ditentukan berdasarkan standar [23]. Variasi pemakaian daya dari *chest freezer* tanpa PCM dan dengan Bio-PCM dapat dilihat berturut-turut pada Gambar 9 dan 10.

Dari Gambar 9 dan 10 dapat diperoleh perbandingan jumlah siklus *on/off* dari kompresor *chest freezer*. Untuk *chest freezer* tanpa PCM diperoleh 27 siklus *on/off* dalam rentang waktu 27,4 jam dengan daya rata-rata 61 W dan waktu operasi kompresor (*running time*) 13,41 jam. Sehingga diperoleh konsumsi energi dari *chest freezer* tanpa PCM sekitar 0,818 kWh dalam 27,4 jam (Tabel 1).

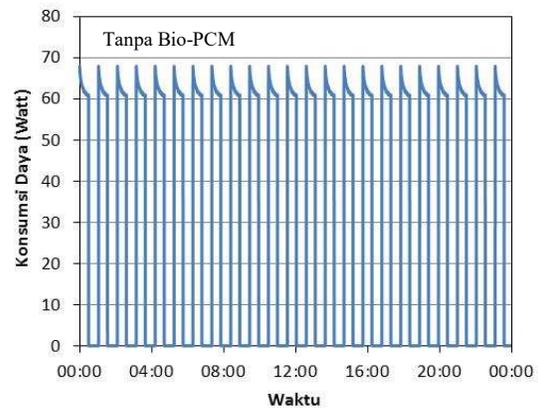
Pengaruh pemasangan bio-PCM pada *chest freezer* dapat diamati dengan jelas dari penurunan jumlah siklus *on/off* yang hanya 1 siklus dalam 27,4 jam. Konsumsi daya rata-rata relatif lebih kecil dibandingkan dengan *chest freezer* tanpa PCM yaitu sebesar 59,53 W. Hal ini disebabkan karena banyaknya jumlah siklus operasi pada *chest freezer* tanpa PCM, dimana pada awal-awal siklus konsumsi daya relatif lebih besar dibandingkan dengan bagian akhir dari siklus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10. Tetapi waktu operasi dari kompresor pada *chest freezer* dengan bio-PCM lebih lama sehingga total konsumsi energinya menjadi sedikit lebih besar yaitu sebesar 0,64% (Tabel 1). Peningkatan konsumsi energi ini masih di bawah 1% jadi masih dapat diasumsikan relatif sama.

Table 1. Perbandingan konsumsi energi dari *chest freezer* tanpa dan dengan Bio-PCM.

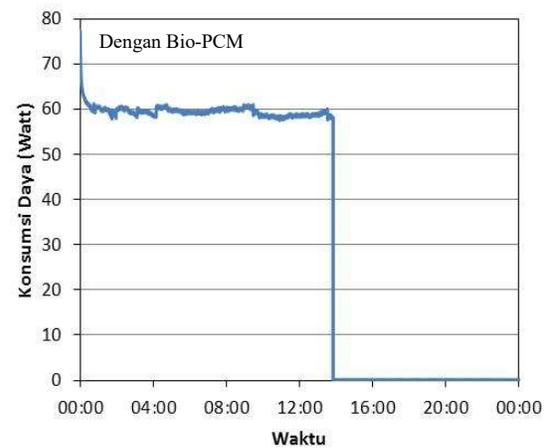
Parameter energi	Tanpa Bio-PCM	Dengan Bio-PCM
Rata-rata konsumsi	61,01	59,53
Waktu operasi (h)	13,41	13,83
Konsumsi energi	0,818	0,823
Perbandingan konsumsi energi (%)	-	+0,64%

Catatan: perbandingan konsumsi energi rentang waktu 1 siklus (27,4 jam) dari *chest freezer* dengan bio-PCM.

Dari hasil studi ini juga diperoleh bahwa optimasi penempatan paket bio-PCM di dalam *chest freezer* masih perlu dilakukan sehingga diperoleh sistem integrasi yang lebih efisien energi dan juga tidak mengurangi kapasitas produk yang didinginkan.



Gambar 9. Variasi konsumsi daya *chest freezer* tanpa PCM.



Gambar 10. Variasi konsumsi daya *chest freezer* dengan bio-PCM.

IV. KESIMPULAN

Studi eksperimental integrasi bio-PCM di dalam sebuah *chest freezer* sudah dilakukan. Hasil studi menunjukkan bahwa integrasi bio-PCM di dalam *chest freezer* dengan menempelkan paket bio-PCM pada dinding evaporator dapat mengurangi kapasitas produk yang didinginkan. Bio-PCM di dalam *chest freezer* mampu menurunkan jumlah siklus *on/off* dari kompresor secara signifikan dengan temperatur produk sebagai parameter kinerja termal berada pada rentang antara $-18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang masih termasuk katagori kabinet L1 menurut standar. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja termal dari *chest freezer* dengan bio-PCM sangat baik.

Konsumsi energi dari *chest freezer* dengan bio-PCM dapat dikatakan sama dengan *chest freezer* tanpa bio-PCM, tetapi optimasi pada penempatan bio-PCM di dalam *chest freezer* dapat memberikan potensi penghematan energi. *Chest freezer* dengan bio-PCM sangat potensial untuk diaplikasikan pada daerah yang suplai listriknya terbatas atau sering ada gangguan serta sangat potensial untuk diintegrasikan dengan sumber-sumber energi terbarukan yang ketersediaanya tidak kontinyu seperti sumber energi listrik tenaga surya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali yang telah mendanai penelitian ini melalui dana PNPB tahun 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Coulomb, "Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 29, pp. 413-417, 2018.
- [2] IIR, *The role of refrigeration in worldwide nutrition - 5th Informatory note on refrigeration and food*. Paris, France: International Institute of Refrigeration (IIR), 2009.
- [3] J. Miller, *Top markets report cold chain, international trade administration*, 2016. [Online]. Available: http://trade.gov/topmarkets/pdf/Cold_Chain_Executive_Summary.pdf
- [4] IARW. *Global cold storage capacity report: Capacity and growth of refrigerated warehousing by country*. International Association of Refrigerated Warehouses, 2016.
- [5] A. Sugiyono, B. Anindhita and M.S. Adiarso, *Indonesia energy outlook 2014*. Center for Energy Resources Development Technology Agency, 2014, p. 117.
- [6] D. Cowan, I. Chaer and G. Maidment, "Reducing refrigerant emissions and leakage – An overview and feedback from two EU projects," in *Proc. Sustainable Refrigeration and Heat Pump Conference*, p. 16, 2010.
- [7] D. Yang, *et al.*, "Paraffin / palygorskite composite phase change materials for thermal energy storage," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 44, pp. 228-34, 2016.
- [8] H. S. Xue, "Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 257-61, 2016
- [9] W. Su, J. Darkwa and G. Kokogiannakis, "Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 48, 373-391, 2015.
- [10] J. Giro-Paloma, M. Martínez, L.F. Cabeza and A.I. Fernández, "Types, methods, techniques, and applications for micro-encapsulated phase change materials (MPCM): a review," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1059-75, 2016.
- [11] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames and M. Smyth, "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 14, pp. 615-28, 2010.
- [12] J. Luo, *et al.*, "Emulsifying ability and cross-linking of silk fibroin microcapsules containing phase change materials," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 147, pp. 144-9, 2016.
- [13] D. Zhou, C. Y. Zhao and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 593- 605, 2012.
- [14] E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M. M. Farid and L. F. Cabeza, "Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications," *Appl. Energy*, vol. 99, pp. 513-33, 2010.
- [15] L. C. Liston, *et al.*, "Binary mixtures of fatty acid methyl esters as phase change materials for low temperature applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 96, pp. 501-7, 2016.
- [16] I.M. Rasta, I. N. G. Wardana, N. Hamidi and M.N. Sasongko, "The role of soya ester in water based PCM for low temperature cool energy storage," *Journal of Thermodynamics*, pp. 1-9, 2016.
- [17] I.M. Rasta and I. N. Suamir, "The role of vegetable oil in water-based phase change material for medium temperature refrigeration," *Journal of Energy Storage*, vol. 15, pp. 368-378, 2018.
- [18] D. Onyejekwe, "Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: an application to photovoltaic compressor vapour freezers," *Solar Wind Technology*, vol. 6, pp. 11–8, 1989.
- [19] K. Azzouz, D. Leducq and D. Gobin, "Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, pp. 1634–1644, 2009.
- [20] M. Cheralathan, R. Velraj and S. Renganarayanan, "Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-base cool thermal energy storage system," *Int. J. Energy Res*, Vol. 31, pp. 398–413, 2007.
- [21] E. Oro, L. Miro, M.M. Farid and L.F. Cabeza, "Improving thermal performance of freezers using phase change materials," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 984-991, 2012.
- [22] A. Raeisi, I. N. Suamir and S.A. Tassou, "Energy storage in freezer cabinets using phase change materials," in *Proc. the 2nd IIR International Cold Chain Conference*, Paris, pp. 187-194, 2013.
- [23] BS EN ISO 23953-1. *Refrigerated display cabinets-Part 1: Vocabulary*, BSI, 2012, p. 34.
- [24] BS EN ISO 23953-2. *Refrigerated display cabinets-Part 2: classification, require-ments and test conditions*, BSI, 2012, p. 96.