

Analisis Kinerja Termal Sistem Refrigerasi Hybrid Menggunakan *Phase Change Material* Pada *Eco Reefer Container* Kapasitas ½ Ton

Danutirta Chrisraftiano, Sutopo Purwono Fitri, dan Ede Mehta Wardhana
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Insitut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sutopopurwonofitri@its.ac.id

Abstrak—Operasional *reefer container* membutuhkan daya besar untuk menghasilkan kinerja pendinginan yang optimal dan sesuai harapan. Hal ini sejalan dengan proyeksi peningkatan penggunaan *reefer container* pada masa yang akan datang. Semangat menjaga efisiensi penggunaan energi telah mendorong sektor industri dan peneliti mencari cara untuk menyelesaikan permasalahan terhadap penggunaan energi yang besar pada operasional *reefer container*. Upaya yang dilakukan adalah dengan melakukan inovasi terhadap penyimpanan energi agar dapat menjaga suhu optimal dalam ruang muat dengan efisiensi penggunaan energi. Penyimpanan kalor dalam bentuk *Phase Change Material* (PCM) yang dilakukan bersamaan dengan upaya pendinginan ruang muat memungkinkan untuk menjaga suhu ambien ruang cargo agar kenaikan suhunya dapat diperlambat. Bahan PCM yang digunakan adalah larutan NaCl dengan konsentrasi 18% karena memiliki kapasitas termal yang tinggi serta titik beku hingga -14°C . Penelitian eksperimental menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dengan ruang muat yang dipasang box enkapsulasi berisi PCM. Peneliti melakukan penelitian terhadap sistem refrigerasi konvensional dan sistem refrigerasi hybrid PCM. Sistem refrigerasi konvensional memiliki waktu pendinginan yang lebih singkat dengan tekanan kerja yang lebih tinggi. Suhu komponen kedua sistem refrigerasi cenderung sama, kecuali pada kompresor. Suhu ambien dan laju kenaikan suhu sistem refrigerasi hybrid PCM lebih rendah dibandingkan sistem refrigerasi konvensional. COP kedua jenis sistem memiliki nilai yang tidak berbeda secara signifikan pada suhu -10°C , -15°C , dan -19°C . Hal ini menunjukkan kinerja sistem refrigerasi kedua sistem cukup stabil untuk melakukan proses pendinginan sesuai target suhu pendinginan.

Kata Kunci—Sistem Refrigerasi, PCM, COP, Reefer Container.

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN *reefer container* ikut tumbuh seiring dengan adanya moda transportasi yang mendukung dari sektor laut dan darat (kapal laut, kereta api, truk). Mayoritas penggunaan *reefer container* adalah pelaku bisnis makanan yang membutuhkan ketahanan terhadap upaya pembusukan pada komoditas. *Reefer container* berupaya meminimalisir pembusukan dengan mempertahankan suhu pada kondisi dingin dimana bakteri penyebab pembusukan tidak dapat berkembang.

Tingkat konsumsi energi dalam daerah peletakan *reefer container* merupakan yang paling tinggi di terminal peti kemas. Konsumsi rata-rata energi yang diperlukan *reefer container* mencapai sekitar 6kW/TEUs hingga 9kW/FEUs untuk ukuran 40 feet [1]. Semakin besarnya kebutuhan konsumsi daya untuk *reefer container*, ditambah harga bahan bakar untuk operasional pada saat di pelabuhan maupun di atas kapal yang fluktuatif, dan semakin banyaknya kompetitor di bidang *shipping line*, berbagai usaha untuk mengurangi

tingkat konsumsi energi (*saving energy*) dari *reefer container* pun menjadi isu terkini yang perlu dicari solusinya.

Thermal energy storage (TES) dalam bentuk *phase change material* menjadi solusi penurunan penggunaan bahan bakar terhadap operasional *reefer container*. TES akan berfungsi menjaga ketahanan suhu sehingga sistem refrigerasi dapat dinonaktifkan untuk sementara waktu.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Studi Terkait

Berdasarkan penelitian terdahulu pada topik sejenis yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai pada Tabel 1.

B. Reefer Container

Reefer container pada umumnya adalah peti besar terbuat dari baja dengan dinding aluminium atau baja serta dilengkapi dengan mesin pendingin yang berukuran (2,5 × 2,5 × 6) meter dan (2,5 × 2,5 × 12) meter dengan kapasitas untuk ukuran 20 feet 15 ton dan 40 feet 25 ton. *Reefer container* dilengkapi dengan mesin pendingin guna memuat barang-barang yang harus dijaga kesegarannya sampai di tangan konsumen.

Kapasitas sistem pendingin dan tingkat suhu yang dapat dicapai dari suatu *reefer container* tergantung tiga faktor yang antara lain: (1) kemampuan mesin pendingin untuk menyerap panas yang berada dalam ruangan container, (2) insulasi, halangan uap, kelembaban yang besar dapat dicegah dengan pemindahan panas dari luar kedalam ruangan, (3) mesin untuk menggerakkan generator panas dengan alat yang tersedia dalam *reefer container* [2].

Setiap jenis produk dapat diangkut dalam wadah *reefer* pada suhu yang diinginkan oleh pengirim, yang terbagi menjadi dua kategori: *frozen* (umumnya disimpan pada suhu setpoint di bawah -10°C) atau *chilled* (disimpan pada setpoint suhu di atas -5°C). Kargo beku merupakan sekitar 20% dari semua kargo *reefer*, dengan sekitar 80% ikan dan 45% daging diangkut dalam keadaan beku serta sebagian besar kentang olahan, dan porsi buah dan sayuran yang lebih kecil.

C. Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Refrigerasi adalah sebuah proses yang di gunakan untuk mendinginkan suatu objek hingga suhu yang lebih rendah dari lingkungan sekitarnya. Untuk system refrigerasi yang digunakan pada *reefer container* umumnya memanfaatkan kompresi uap. Dalam menghasilkan dingin melalui sistem refrigerasi terdiri dari memodifikasi kesetimbangan termodinamikanya sendiri yang di pengaruhi dengan volume, suhu, tekanan, dan lain-lain [3].

Tabel 1.
Studi Terkait Penggunaan PCM pada Sistem Refrigerasi

Penulis	Judul	Kesimpulan Penelitian
Dewanti, Dica (2023)	Aplikasi <i>Phase Change Material</i> Pada <i>Wall Insulation Eco-Reefer Container</i>	[COP Beban transmisi pada sistem <i>wall insulation</i> dengan PCM lebih rendah dibandingkan pada sistem konvensional. Beban transmisi pada <i>wall insulation</i> dengan PCM yaitu 16,02 W sedangkan pada sistem konvensional beban transmisi yang dihasilkan yaitu 17,92 W. 1. Pada sistem refrigerasi konvensional tanpa beban waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu hingga -20 °C yaitu 1 jam 12 menit. Sedangkan pada <i>wall insulation</i> menggunakan PCM tanpa beban membutuhkan waktu 18 jam 52 menit. 2. COP pada sistem <i>wall insulation</i> , yaitu 1,995 dengan daya kompresor 0,557 kW.
Satriawan, Ganesha Arif (2022)	Kinerja Thermal Dari Sistem Refrigerasi <i>Hybrid VC – PCM (Vapour Compression – Phase Change Material)</i> pada <i>Reefer Container</i>	3. COP tertinggi di dapatkan pada kondisi <i>hybrid non-equipment</i> dengan komposisi PCM 22% NaCl 35% Glycol. Pada kondisi <i>hybrid equipment</i> COP tertinggi dengan menggunakan komposisi PCM 22% NaCl 20% Glycol. 4. Kandungan latent heat setiap PCM yang berbeda-beda menjadikan kondisi beban PCM yang bervariasi sehingga tidak selalu sama. 5. Penggunaan PCM hanya mampu mempertahankan suhu ruang di bawah 0°C selama kurang lebih 8 jam dengan beban muatan ikan sebesar 57,6 kg.

Tabel 2.
Persyaratan PCM sebagai Penyimpanan Kalor

Sifat Thermal	Properti Fisik	Sifat Kimia	Faktor Ekonomi
Temperatur perubahan fasa sesuai dengan rentang operasi yang diinginkan	Kepadatan Tinggi	Stabilitas Kimia	Tersedia dalam jumlah banyak dan murah
Kalor laten per satuan massa yang tinggi	Variasi densitas rendah selama perubahan fasa	Tidak ada dekomposisi kimia	
Kalor Spesifik yang tinggi	Sedikit atau tidak ada supercooling selama pembekuan	Kompatibilitas dengan bahan wadah	
Konduktivitas termal yang tinggi dalam fase padat dan cair		Tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak mudah meledak	

1) *Proses Kompresi*

Proses ini berlangsung di kompresor secara isentropic adiabatic. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk kompresor adalah uap jenuh bertekanan rendah, setelah dikompresi refrigeran menjadi uap bertekanan tinggi. Oleh karena itu proses ini dianggap isentropik sehingga temperatur keluar kompresor pun meningkat. Besarnya daya kompresi bisa dihitung dengan rumus :

$$Q_c = m \times (h_2 - h_1) \tag{1}$$

Besarnya gaya kerja kompresi per satuan massa refrigeran (qw) dapat didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran pada saat keluar kompresor (h₂) dengan entalpi refrigeran pada saat masuk kompresor (h₁) [4].

2) *Proses Kondensasi*

Proses ini berlangsung pada komponen kondensor. Refrigeran yang bertekanan dan bertemperatur tinggi keluaran dari kompresor membuang kalor sehingga fasanya berubah menjadi cair. Hal ini berarti bahwa di kondensor terjadi penukaran kalor antara refrigeran dengan udara atau air, sehingga panas berpindah dari refrigeran ke udara atau air pendingin dan akhirnya refrigeran mengembun dan berubah fasa menjadi cair.

Besarnya kapasitas kondensor dapat didefinisikan dengan:

$$Q_{cd} = m \times (h_3 - h_2) \tag{2}$$

Besarnya panas per satuan massa refrigeran yang dilepaskan di kondensor (q_{cd}) dapat didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran pada saat keluar kondensor (h₃) dengan entalpi refrigeran pada saat masuk kondensor (h₂) [4].

3) *Proses Ekspansi*

Proses ini berlangsung secara isoentalpi, hal ini berarti tidak terjadi penambahan entalpi tetapi terjadi drop tekanan dan penurunan temperatur. Proses penurunan tekanan terjadi pada katup ekspansi yang berfungsi mengatur laju aliran refrigeran dan menurunkan tekanan.

$$h_4 = h_3 \tag{3}$$

Entalpi keluaran katup ekspansi (h₄) akan sama dengan entalpi masukan dari katup ekspansi (h₃) [4].

4) *Proses Evaporasi*

Proses ini berlangsung di evaporator secara isobar isothermal. Refrigeran dalam wujud cair bertekanan rendah menyerap kalor dari lingkungan atau media yang didinginkan sehingga wujudnya berubah menjadi gas bertekanan rendah. Kondisi refrigeran saat masuk evaporator sebenarnya adalah campuran cair dan gas, hal ini teridentifikasi pada titik yang berada dalam kubah garis jenuh. Besarnya kapasitas kalor yang diserap oleh evaporator dapat didefinisikan dengan rumus:

$$Q_e = m \times (h_4 - h_3) \tag{4}$$

Besarnya panas per satuan massa refrigeran yang dilepaskan di kondensor (q_e) dapat didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran pada saat keluar kompresor (h₄) dengan entalpi refrigeran pada saat masuk kompresor (h₃) [4].

D. *Phase Change Material (PCM)*

PCM adalah bahan penyimpan energi yang memiliki densitas penyimpan energi termal jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bahan penyimpan kalor sensibel dan mampu menye-

Tabel 3.
Dimensi Dalam Reefer Container

Dimensi	Tebal (cm)
Panjang	120
Lebar	100
Tinggi	230

Tabel 4.
Material Penyusun Dinding Reefer Container

Material	Tebal (mm)
Colorbond	0,53
Polyurethane	100

Tabel 5.
Spesifikasi Komponen Sistem Refrigerasi Reefer Container

Komponen	Merk	Tipe
Kompresor	Bitzer	2HC-1.2Y-40S
Condensor	-	-
Katup Ekspansi	Danfoss	TES2
Evaporator	Muller	MLT013-C

rap atau melepaskan sejumlah besar energi pada suhu konstan dengan mengalami perubahan fasa.

PCM dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu PCM organik, anorganik, dan campuran senyawa eutektik dapat menghasilkan suhu perubahan fasa yang berbeda seperti pada Tabel 2. Desain dan pengoperasian penyimpanan kalor laten tergantung pada karakteristik fisik dan kimia dari PCM yang digunakan. Semakin tinggi densitas energi PCM, semakin kecil volume penyimpanan yang diperlukan untuk setiap aplikasi yang diusulkan. Ini menyiratkan biaya yang lebih rendah untuk struktur pertukaran kalor atau kapasitas penyimpanan panas total yang lebih besar dari sistem untuk volume keseluruhan yang sama [5].

E. Enkapsulasi PCM

Pemanfaatan PCM dan fluida perpindahan panas yang berhasil bergantung pada pengembangan sarana penahanan. Enkapsulasi PCM dengan geometri kapsul yang berbeda memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri. Enkapsulasi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut: (1) memenuhi persyaratan kekuatan, fleksibilitas, ketahanan korosi dan termal stabilitas, (2) bertindak sebagai penghalang untuk melindungi PCM dari interaksi berbahaya dengan lingkungan, (3) menyediakan permukaan yang cukup untuk perpindahan kalor, (4) memberikan stabilitas struktural dan penanganan yang mudah. Tipe kompartmen yang digunakan untuk menyimpan PCM dapat berupa makroenkapsulasi dan mikroenkapsulasi [5].

F. Sensible Heat Storage

Sistem akan melakukan penyimpanan energi dengan mengubah suhu media penyimpanan yang dapat berupa air, air asin, batuan dsb. Kapasitas penyimpanan energi dari sensible heat storage (SHS) bergantung pada perbedaan suhu inlet dan outlet, kapasitas panas spesifik dari material penyimpanan dan total massa media penyimpanan yang dapat ditulis dengan rumus:

$$Q = \int_{Tl}^{Th} mCp dT = mCp (Th - Tl) \quad (5)$$

G. Latent Heat Storage

Sistem ini kebanyakan akan mencapai kapasitas penyimpanan kalornya berasal dari kalor laten perubahan fase mate-

rial yang digunakan sebagai thermal energy storage (TES). Perubahan fasa ini meliputi padat ke cair, cair ke gas, dan sebaliknya. Media latent heat storage yang biasa digunakan dapat diklasifikasikan sebagai organik (parafin dan non-parafin), anorganik (garam hidrat dan logam), dan eutektik.

H. Coefficient of Performance

Coefficient of Performance (COP) merupakan perbandingan efek refrigerasi dengan kerja kompresor. Efek refrigerasi adalah enthalpy refrigerant masuk kompresor atau sesudah evaporator dibagi dengan enthalpy refrigerant masuk evaporator atau sesudah katup ekspansi. Sedangkan kerja kompresor adalah entalpi refrigerant masuk kondensor atau sesudah kompresor dibagi dengan enthalpy refrigerant masuk kompresor atau sesudah evaporator. Atau ringkasnya COP adalah perbandingan efek-tifitas pendinginan evaporator dengan kerja yang diberikan kompresor. Secara formulasi dapat dituliskan sebagai berikut [6]:

$$COP_{qr} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Identifikasi Masalah

Dalam sistem ini peneliti menganalisis masalah berdasarkan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini. Agar penelitian lebih spesifik, maka peneliti membuat batasan penelitian ini. Studi ini menganalisis bagaimana desain sistem refrigerasi yang cocok dalam berbagai kondisi cuaca. Setelah itu, peneliti menentukan metode apa yang akan digunakan.

B. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi pendukung dan dasar-dasar teori yang akan dibahas yang berkaitan dengan topik penelitian yang akan dijalankan. Pada penelitian ini dilakukan studi literatur tentang Sistem Refrigerasi Kompresi Uap, Phase Change Material, Enkapsulasi PCM dan COP. Studi literatur yang dilakukan dengan mencari dan membaca dari beberapa sumber seperti, jurnal, buku, penelitian terdahulu, dan penelitian terdahulu.

C. Studi Empiris

Setelah mengidentifikasi masalah dan studi literatur, Langkah berikutnya adalah melakukan studi empiris pada tahap ini dilakukan pengumpulan data untuk menunjang penelitian dalam menganalisa kinerja sistem refrigerasi dan distribusi suhu didalam reefer container. Data data yang dikumpulkan adalah data ukuran reefer container seperti di Tabel 3, data material penyusun dinding insulasi seperti di Tabel 4, spesifikasi komponen sistem refrigerasi reefer container seperti di Tabel 5, refrigeran didalam sistem. Berikut ini merupakan spesifikasi teknis dari reefer container yang akan dijadikan objek pada penelitian ini.

D. Persiapan Aparatus

Setelah mengidentifikasi objek penelitian kemudian mempersiapkan alat alat pendukung pengambilan data data yang diperlukan terutama sensor suhu.

E. Validasi Aparatus

Melakukan pengujian terhadap komponen yang akan digunakan dengan alat ukur yang telah terkalibrasi.

F. Percobaan dan Pengambilan Data

Pada langkah ini dilakukan ketika apparatus telah memenuhi syarat untuk dilakukan pengambilan data. Data yang akan diambil dari percobaan kali antara lain: (1) suhu refrigerasi, (2) suhu PCM, (3) suhu sirkulasi udara, dan (4) tekanan sebelum dan sesudah kompresi.

G. Validasi Data Percobaan

Pada validasi data percobaan dilakukan dengan cara membandingkan data yang telah diambil selama percobaan dengan data yang diambil dari studi empiris yang pernah dilakukan. Ketika data yang diambil selama percobaan terjadi ketimpangan atau tidak cocok dengan data dari studi empiris maka perlu dilakukan pengambilan data ulang.

H. Analisa Data dan Pembahasan

Pada tahap ini data yang telah di validasi dengan studi empiris akan dilakukan analisa data sehingga nantinya akan mendapat gambaran tentang percobaan yang telah dilakukan dan mendapatkan *margin error* pada percobaan yang telah dilakukan.

I. Kesimpulan

Setelah melalui proses tersebut, peneliti membuat kesimpulan tentang penelitian ini lalu memberikan saran atau rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Beban Pendinginan

Dengan kapasitas muat hingga satu ton, beban yang direncanakan untuk dimuat adalah sebesar 50%. Beban menggunakan *dummy cargo* berupa air sebanyak 500 kg.

B. Karakteristik PCM

PCM menggunakan larutan 18% NaCl-H₂O dengan massa jenis sebesar 1144 kg/m³. Kalor jenis sebesar larutan 18% NaCl-H₂O sebesar 3,403 kJ/kg°C, sedangkan kalor latent sebesar 233 kJ/kg. Larutan 18% NaCl-H₂O memiliki *freezing point* sebesar -14°C.

C. Beban Pendinginan

1) Kalor Pendinginan Produk

Merupakan beban pendinginan muatan didalam kargo yang direncanakan:

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_{sensible\ heat} + Q_{latent\ heat} \\
 &= (m \times c_p \times \Delta T) + (m \times L) \\
 &= (500 \times 4,184 \times 45) + (500 \times 336) \\
 &= 262,140\text{ kJ}
 \end{aligned}$$

2) Beban Tambahan

Beban infiltrasi diasumsikan tidak ada sirkulasi keluar masuk udara ke dalam ruang muat. Sedangkan beban transmisi berasal dari udara panas diluar ruang muat dengan dimensi dalam sebesar 230 cm x 120 cm x 100 cm dengan dinding polyurethane setebal 100mm dengan penutup *colorbond* setebal 0,53 mm. Melalui perhitungan didapatkan beban transmisi dengan rincian pada Tabel 6. Total beban transmisi yang diperhitungkan adalah sebesar 202 W.

Beban iradiasi diakibatkan oleh panas yang dihasilkan oleh peralatan penerangan. Kontainer diletakkan dalam ruangan

Tabel 6.
Beban Transmisi Dinding

No	Dinding Sisi	Simbol	Luas Area (m ²)	R	U	Q set pint -20°C (Watt)
1.	Depan	Qt1	3,5	4,04	0,247	43,250
2.	Belakang	Qt2	3,5	4,04	0,247	43,250
3.	Atas	Qt3	1,68	4,04	0,247	20,76
4.	Samping kiri	Qt4	3	4,04	0,247	37,0719
5.	Samping kanan	Qt5	3	4,04	0,247	37,0719
6.	Alas	Qt6	1,68	4,04	0,247	20,76

tertutup dengan penerangan lampu 3 buah dengan masing-masing menggunakan daya 5 Watt. Sedangkan beban peralatan memperhitungkan beban kipas evaporator didalam ruang muat sebesar 73 Watt. Total beban pendinginan tambahan 290,1656 W.

3) Kalor Pendinginan PCM

PCM direncanakan untuk menahan kenaikan suhu ruangan yang hingga 10°C, sehingga beban kenaikan yang harus diatasi:

$$\begin{aligned}
 Q &= m \times c_p \times \Delta T \\
 Q &= 500 \times 4,184 \times 10 \\
 Q &= 20.920\text{ kJ}
 \end{aligned}$$

PCM direncanakan menahan 10 jam proses *discharging*.

$$Q_{discharging} = \frac{Q}{t} = 581,1\text{ W}$$

Dengan memperhitungkan beban pendinginan tambahan maka beban *discharging* total didapatkan:

$$\begin{aligned}
 Q_{discharging\ total} &= Q_{discharging} + Q_{additional} \\
 Q_{discharging\ total} &= 871,3\text{ W} + 36.000\text{ detik} \\
 Q_{discharging\ total} &= 31.366,8\text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Kalor *discharging* PCM yang digunakan untuk menahan suhu ruangan berasal dari *Sensible Heat* dan *Latent Heat* dari PCM dengan mempertimbangkan karakteristik PCM melalui perhitungan berikut:

$$\begin{aligned}
 Q_{discharging\ total} &= Q_{PCM} \\
 Q_{PCM} &= Q_{sensible\ heat} + Q_{latent\ heat} \\
 Q_{PCM} &= (m \times c_p \times \Delta T) + m \times L \\
 31.366,8\text{ kJ} &= \text{massa PCM} \times (233 + (3,403 \times 10)) \\
 \text{massa PCM} &= 117,46\text{ kg}
 \end{aligned}$$

Beban *charging* total PCM yang diperlukan dari suhu ruangan hingga setara dengan target pendinginan, yaitu sebesar -20°C adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Q_{charging} &= Q_{sensible\ heat} + Q_{latent\ heat} \\
 Q_{charging} &= (m \times c_p \times \Delta T) + (m \times L) \\
 Q_{charging} &= (117,46 \times 3,403 \times 45) + (105,6 \times 233) \\
 Q_{charging} &= 45.355,41\text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Waktu *charging* yang direncanakan sebesar 14 jam (50.400 detik) sehingga beban pendinginan PCM sebesar:

$$Q_{charging} = \frac{45.355,41}{50.400} = 899\text{ WQ}$$

4) Beban Pendinginan Sistem Refrigerasi Konvensional

Perhitungan beban pendingin sistem refrigerasi konvensional tidak menyertakan $Q_{charging}$ PCM pada Tabel 7.

Tabel 7.

Akumulasi Beban Pendingin Sistem Refrigerasi Konvensional		
No	Nama Beban	Q pada set suhu -20°C (W)
1.	Q Produk	0
2.	Q Infiltrasi	0
3.	Q Transmisi	202,1656
4.	Q Charging PCM	0
5.	Q Iradiasi	15
6.	Q Peralatan	73
Total		290,1656

Tabel 8.

Akumulasi Beban Sistem Refrigerasi Hybrid PCM		
No	Nama Beban	Q pada set suhu -20°C (W)
1.	Q Produk	0
2.	Q Infiltrasi	0
3.	Q Transmisi	202,1656
4.	Q Charging PCM	899
5.	Q Iradiasi	15
6.	Q Peralatan	73
Total		1189,3656

5) *Beban Pendinginan Sistem Refrigerasi Hybrid PCM*

Perhitungan beban pendingin sistem refrigerasi konvensional tidak menyertakan $Q_{charging}$ PCM sebesar 899 W. Akumulasi beban sistem *refrigerasi hybrid* PCM pada Tabel 8.

D. Analisis Data Hasil Eksperimen Sistem Refrigerasi

Tahap menyala dijalankan dengan mengaktifkan sistem refrigerasi dengan suhu ambient seimbang dengan kondisi luar. Tahap ini dijalankan dengan durasi pendinginan dengan durasi sekitar 14 jam. Pada tahap ini dapat memberikan gambaran terhadap suhu komponen sistem *refrigerasi* yang digunakan. Tahap ini dapat berjalan otomatis untuk dapat menonaktifkan sistem refrigerasi ketika telah mencapai suhu yang telah ditetapkan. Tahap ini juga dapat menghidupkan kembali pada saat suhu ambien terbaca oleh termostat dengan kenaikan suhu sebesar 10°C dari *set point* yang telah ditetapkan menggunakan modular yang telah terpasang pada panel listrik.

Tahap mati dijalankan dengan menonaktifkan seluruh sistem refrigerasi. Mode ini dijalankan dengan durasi sekitar 10 jam. Pada tahap ini dapat memberikan gambaran terhadap kemampuan ruang muat untuk menahan suhu ambien dalam range waktu yang telah ditetapkan.

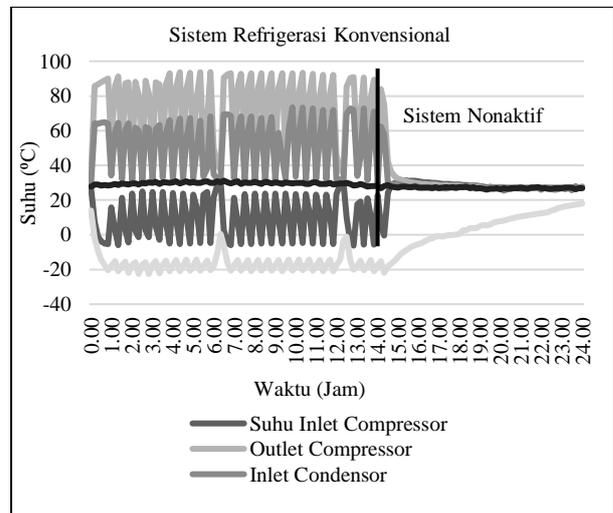
1) *Sistem Refrigerasi Konvensional*

Pada komponen sistem *refrigerasi*, evaporator mampu mencapai *setting* suhu yang diharapkan sekitar -20 °C, kondensor menjaga suhu sekitar 26–31°C, suhu hasil kerja kompresor maksimal mencapai 93,7°C. Tertera pada Gambar 1.

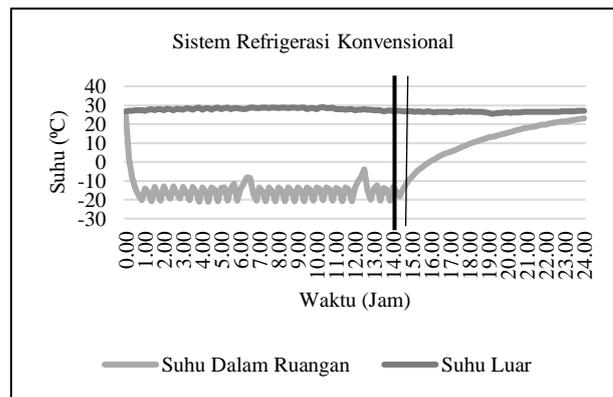
Pada saat sistem *refrigerasi* dimatikan, suhu ambien mengalami kenaikan dari -20 °C menjadi 22,96°C dalam waktu 10 jam. Sistem refrigerasi mampu menahan suhu dari -20 °C hingga -10 °C hanya selama 20 menit. Hal ini menunjukkan perubahan suhu yang cukup signifikan dalam waktu yang singkat. Laju kenaikan suhu sebesar 0,5°C/menit. Tertera pada Gambar 2.

Pada tekanan kerja tinggi nilai minimum tercatat 228,7 Psi *absolute* dimana hal ini terjadi ketika sistem refrigrasi dalam keadaan aktif pada saat mendekati suhu sesuai dengan pengaturan. Sedangkan tekanan kerja tinggi nilai maksimum tercatat sebesar 244,7 Psi *absolute* yang terjadi pada saat sistem refrigerasi diaktifkan setelah mengalami fase *defrosting*.

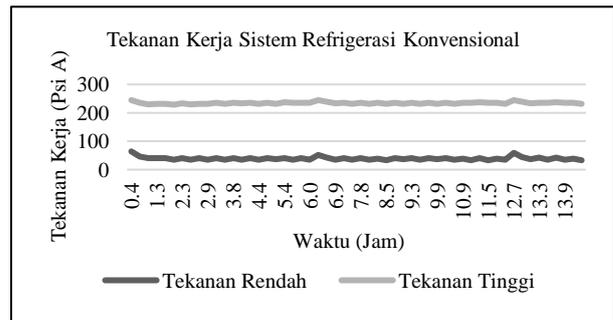
Pada tekanan kerja rendah, nilai terendah tercatat sebesar 33,2 Psi *absolute* di mana hal ini terjadi pada kondisi sistem



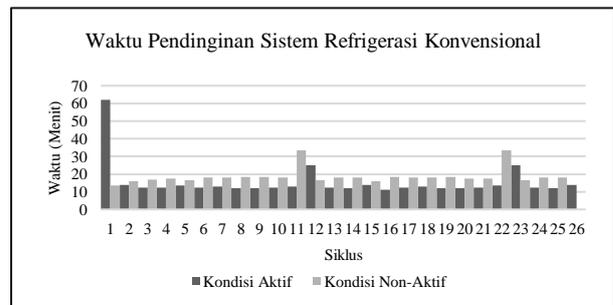
Gambar 1. Grafik suhu komponen sistem *refrigerasi* konvensional.



Gambar 2. Grafik sistem *refrigerasi* konvensional dinonaktifkan.



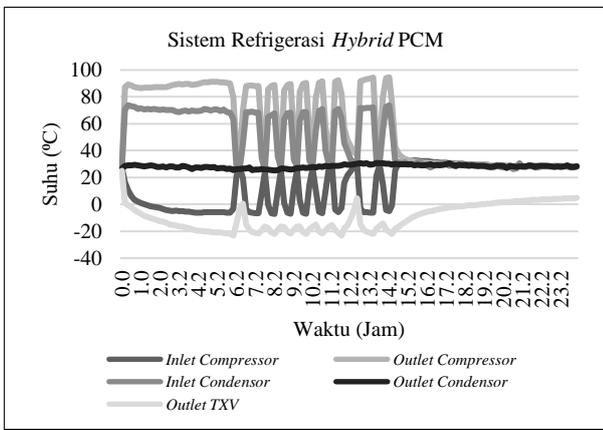
Gambar 3. Grafik tekanan kerja sistem *refrigerasi* konvensional.



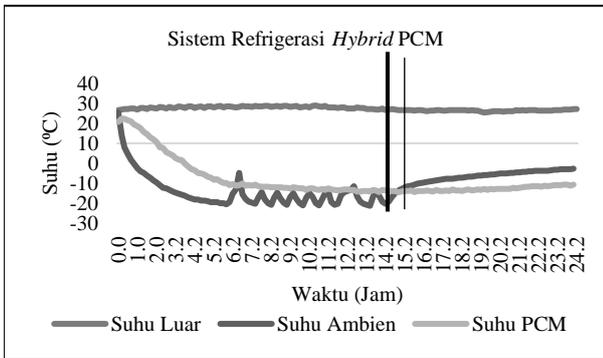
Gambar 4. Grafik waktu pendinginan sistem *refrigerasi* konvensional.

refrigerasi akan mencapai batas suhu maksimal yang diinginkan. Sedangkan pada nilai maksimum terjadi ketika sistem *refrigerasi* diaktifkan setelah mengalami fase *defrosting*, yakni sebesar 58,7 Psi *absolute* yang tertera pada Gambar 3.

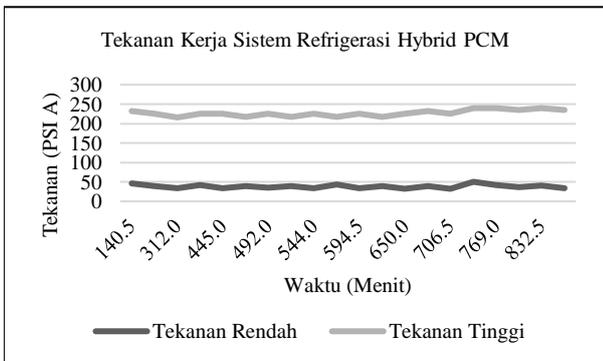
Sistem *refrigerasi* konvensional total dijalankan selama 14 jam 30 menit dengan rata-rata kondisi aktif sekitar 13 menit 35 detik untuk setiap siklusnya. Sedangkan untuk kondisi non



Gambar 5. Grafik suhu komponen sistem refrigerasi hybrid PCM.



Gambar 6. Grafik sistem refrigerasi hybrid PCM dinonaktifkan.



Gambar 7. Grafik tekanan kerja sistem refrigerasi hybrid PCM.

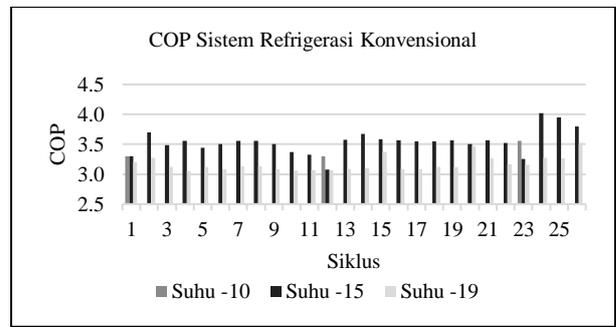
aktif 19 menit 15 detik untuk setiap siklusnya. Proses pendinginan diawali dengan durasi pendinginan sekitar 1 jam 2 menit untuk mengubah suhu ruangan hingga -20°C yang disajikan pada Gambar 4.

2) *Sistem Refrigerasi Hybrid PCM*

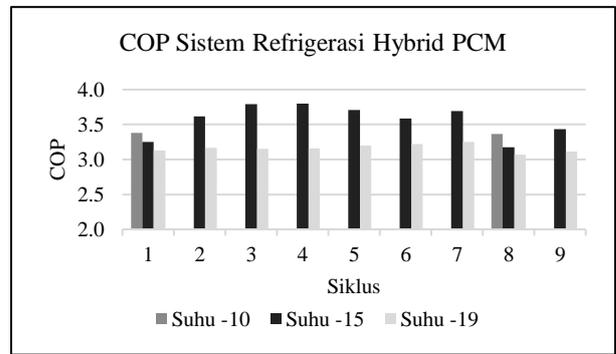
Pada komponen sistem refrigerasinya, suhu evaporator mampu mencapai setting suhu yang diharapkan sekitar -20°C , kondensor menjaga suhu sekitar 25°C – 30°C , suhu hasil kerja kompresor mencapai $94,5^{\circ}\text{C}$ yang tertera pada Gambar 5.

Pada saat sistem refrigerasi dimatikan, suhu ambien mengalami kenaikan dari -20°C menjadi $0,6^{\circ}\text{C}$ dalam waktu 10 jam. Dengan hadirnya PCM, suhu ambien yang awalnya berada pada suhu -20°C naik menjadi -10°C dalam kurun waktu 110 menit. Hal ini menunjukkan laju kenaikan suhu pada sistem refrigerasi hybrid PCM sebesar $0,09^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.

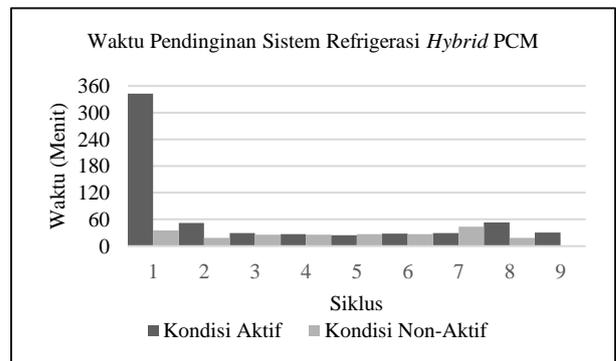
Hasil akhir dari suhu PCM menunjukkan nilai $-10,59^{\circ}\text{C}$ dari suhu awal sebesar -14°C . Dengan durasi *discharging* 10 jam. Hal ini menunjukkan kenaikan sebesar $3,41^{\circ}\text{C}$ sehingga didapatkan laju kenaikan suhu PCM sebesar $0,341^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ seperti yang tertera pada Gambar 6.



Gambar 9. Grafik COP sistem refrigerasi konvensional.



Gambar 10. Grafik COP sistem refrigerasi hybrid PCM.



Gambar 8. Grafik waktu pendinginan sistem refrigerasi hybrid PCM.

Pada tekanan kerja tinggi nilai minimum tercatat $209,7\text{ Psi absolute}$ di mana hal ini terjadi ketika sistem refrigerasi dalam keadaan non-aktif saat mendekati kenaikan suhu ke -10°C tepat sebelum kompresor kembali aktif. Sedangkan tekanan kerja tinggi nilai maksimum tercatat sebesar $239,7\text{ Psi absolute}$ yang terjadi pada saat sistem refrigerasi kembali dihidupkan setelah mengalami fase *defrosting*. Pada tekanan kerja rendah, nilai terendah tercatat sebesar $32,2\text{ Psi absolute}$ dimana hal ini terjadi pada kondisi sistem refrigerasi akan mencapai batas suhu maksimal yang diinginkan. Sedangkan pada nilai maksimum terjadi ketika sistem refrigerasi aktif pada saat mode *defrosting* yakni sebesar $50,2\text{ Psi absolute}$ yang tertera pada Gambar 7.

Sistem refrigerasi hybrid PCM total dijalankan selama 14 jam dengan rata-rata kondisi aktif sekitar 34 menit 11 detik untuk setiap siklusnya. Sedangkan untuk kondisi non aktif 27 menit 49 detik untuk setiap siklusnya. Proses pendinginan diawali dengan durasi pendinginan sekitar 5 jam 43 menit untuk mengubah suhu ruangan hingga -20°C yang tertera pada Gambar 8.

3) *Coefficient of Performance (COP)*

Sistem refrigerasi konvensional memiliki rata-rata nilai COP pada suhu ambien -10°C adalah 3,39. Nilai rata-rata COP pada suhu ambien -15°C adalah 3,54. Sedangkan nilai

rata rata COP pada suhu $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ adalah 3,17 yang disajikan pada Gambar 9.

Sistem refrigerasi *hybrid* PCM memiliki rata-rata nilai COP pada suhu ambien $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ adalah 3,37. Nilai rata rata COP pada suhu ambien $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ adalah 3,56. Sedangkan nilai rata rata COP pada suhu $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ adalah 3,16. Tertera pada Gambar 10.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: (1) Sistem refrigerasi konvensional dengan beban pendinginan sebesar 290,16 W memiliki waktu pendinginan awal yang lebih singkat dibandingkan sistem refrigerasi *hybrid* PCM yang memiliki beban pendinginan sebesar 1.189,36 W. Hal ini juga terjadi durasi waktu pendinginan selanjutnya dalam satu siklus aktif dan non-aktif. (2) Tekanan kerja pada sistem refrigerasi konvensional memiliki nilai yang lebih tinggi daripada tekanan kerja pada sistem refrigerasi konvensional. Pada kedua tipe sistem refrigerasi, komponen kondensor memiliki range suhu yang tidak jauh berbeda dengan suhu ruangan. Sedangkan suhu keluaran kompresor pada sistem refrigerasi *hybrid* PCM lebih tinggi dibandingkan sistem refrigerasi konvensional. (3) Suhu ambien sistem refrigerasi konvensional memiliki laju kenaikan sebesar $4,3^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sistem refrigerasi *hybrid* PCM sebesar $1,725^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ setelah sistem refrigerasi dimatikan selama 10 jam. Untuk mencapai

suhu ambien -10°C , sistem refrigerasi konvensional memiliki laju kenaikan sebesar $0,5^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ jauh lebih tinggi dibandingkan sistem refrigerasi *hybrid* PCM sebesar $0,09^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. (4) COP kedua jenis sistem memiliki nilai yang tidak berbeda secara signifikan pada suhu -10°C , -15°C , dan -19°C . Hal ini menunjukkan bahwa kinerja sistem refrigerasi pada kedua sistem cukup stabil untuk melakukan proses pendinginan sesuai dengan target suhu pendinginan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Budiyo dan T. Shinoda, "Energy efficiency on the reefer container storage yard; an analysis of thermal performance of installation roof shade," *Energy Reports*, vol. 6, hal. 686–692, Feb 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2019.11.138.
- [2] A. Sugianto, "Pencegahan Kerusakan Muatan pada Reefer Container di KM. Oriental Gold," Departemen Nautika, Politeknik Ilmu Pelayaran, Semarang, 2019.
- [3] 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 Food Sci. Technol.*, vol. 19, no. 8, hal. 413–417, 2008, doi: 10.1016/j.tifs.2008.03.006.
- [4] R. Irawan, A. Andrizal, dan I. Y. Basri, "Perbandingan coefficient of performance (cop) refrigerant r-134a dengan refrigerant mc-134 pada sistem pengkondisian udara mobil," *Automot. Eng. Educ. Journals*, vol. 4, no. 2, hal. 1–8, Mar 2015.
- [5] M. Ebrahimi dan A. Keshavarz, "CCHP thermal energy storage," *Comb. Cool. Heat. Power*, hal. 183–188, Jan 2015, doi: 10.1016/B978-0-08-099985-2.00008-1.
- [6] A. F. Regin, S. C. Solanki, dan J. S. Saini, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 9, hal. 2438–2458, Des 2008, doi: 10.1016/J.RSER.2007.06.009.