



Analisis Termodinamika Siklus Kompresi Uap pada Lemari Es Vaksin Medis dengan Variasi Phase Change Material Menggunakan Refrigeran R600a

Thermodynamic Analysis of Vapor Compression Cycle in Medical Vaccine Refrigerator with Phase Change Material Variation Using R600a Refrigerant

Ksatria Danuaji^{1,a)}, Boni Sena¹, Aa Santosa¹, Fadhel Rahman¹, Muhammad Ikbali¹, Edlyn Farid Simanjuntak¹.

¹Center of Education and Research Automotive Manufacturing Industri (CERAMI), Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

^{a)}Corresponding author: 2210631150078@student.unsika.ac.id

Abstrak

Kegagalan rantai dingin vaksin akibat suhu ekstrem dan ketidakstabilan pasokan listrik merupakan tantangan kritis bagi program imunisasi di negara tropis, termasuk Indonesia. Penelitian ini menganalisis secara komparatif pengaruh empat variasi *Phase Change Material* (PCM) terhadap beban pendinginan dan performa termodinamika lemari es vaksin berbasis refrigeran R600a, dengan fokus pada pembuktian bahwa integrasi PCM tidak mendegradasi efisiensi energi sistem selama operasi normal, sebuah aspek yang belum dikaji secara eksplisit pada konfigurasi dinding komposit bertingkat untuk konteks iklim tropis. Pemodelan kondisi tunak dilakukan pada suhu ambien 43 °C sesuai standar WHO PQS. Hasil menunjukkan bahwa *CrodaTherm 5* menghasilkan beban pendinginan total terendah dan nilai *Coefficient of Performance* (COP) terbukti konstan pada 5,51 di seluruh variasi PCM. Temuan ini membuktikan bahwa PCM memberikan keuntungan ganda: resistansi termal sekunder pada operasi normal sekaligus kapasitas *holdover time* saat pemadaman listrik. Secara praktis, penelitian ini memberikan landasan teknis yang terverifikasi bagi implementasi PCM pada lemari es vaksin di fasilitas kesehatan primer wilayah tropis, khususnya dalam mendukung keandalan rantai dingin pada kondisi infrastruktur listrik yang tidak stabil.

Kata Kunci: *phase change material*; refrigeran r600a; lemari es vaksin; beban pendinginan; koefisien performansi

Abstract

Vaccine cold chain failure driven by extreme ambient temperatures and unreliable power supply poses a critical threat to immunization programs in tropical countries, particularly Indonesia. This study presents a comparative analysis of four *Phase Change Material* (PCM) variations on the cooling load and thermodynamic performance of a vaccine refrigerator using R600a refrigerant, with a primary focus on demonstrating that PCM integration does not degrade system energy efficiency during normal operation, an aspect not previously examined explicitly within a multilayer composite wall configuration under tropical climate conditions. Steady-state modeling was conducted at an ambient temperature of 43 °C in accordance with WHO PQS standards. Results show that *CrodaTherm 5* achieves the lowest total cooling load, while the system *Coefficient of Performance* (COP) remained constant at 5.51 across all PCM variants. These findings confirm that PCM delivers dual functional benefits: secondary thermal resistance during steady-state operation and critical holdover time capacity during power outages. Practically, this study provides a verified technical basis for PCM implementation in vaccine refrigerators at primary healthcare facilities in tropical regions, particularly in supporting cold chain reliability under conditions of unstable electrical infrastructure.

Keywords: *phase change material*; R600a refrigerant; vaccine refrigerator; cooling load; coefficient of performance

PENDAHULUAN

Rantai dingin vaksin merupakan komponen krusial dalam program imunisasi global. Kegagalan mempertahankan suhu optimal 2–8 °C sering kali menyebabkan pemborosan hingga 50% vaksin setiap tahunnya, khususnya di negara berkembang [1], [2]. Di Indonesia yang beriklim tropis, tantangan ini diperberat oleh frekuensi gelombang panas yang dapat mencapai 43 °C serta pemadaman listrik *intermittent* pada jaringan fasilitas kesehatan primer [3]. Kondisi ini sangat berisiko bagi stabilitas vaksin, terutama vaksin Hepatitis B yang secara reversibel akan kehilangan potensi imunogenisitasnya jika terpapar suhu beku di bawah 0 °C akibat kegagalan sistem pendingin [4], [5]. Hal ini menegaskan kebutuhan mendesak terhadap sistem refrigerasi pasif yang presisi dan andal [6].

Phase Change Material (PCM) telah diaplikasikan secara luas sebagai solusi untuk meningkatkan keandalan sistem pendingin vaksin [6], [7]. Secara termodinamika, interaksi sistem refrigerasi dengan PCM beroperasi dalam tiga fase termal yang dinamis [8], [9]. Pertama, pada fase awal pendinginan (*pull-down atau charging*), sistem membutuhkan kerja kompresor ekstra untuk menyerap kalor laten PCM agar berubah wujud menjadi padat sepenuhnya [10]. Kedua, saat sistem mencapai kondisi tunak (*steady-state*) pada operasi normal, PCM bertindak secara pasif, wujud fisiknya menyumbang resistansi termal sekunder pada dinding insulasi tanpa membebani siklus refrigerasi. Ketiga, keuntungan fundamental PCM baru teraktivasi pada kondisi tak tunak (*transien t discharging/melting*) seperti saat pemadaman listrik darurat. Di fase ini, PCM bertindak sebagai penyimpan energi termal laten (*thermal inertia*) yang secara aktif menyerap fluktuasi panas eksternal, sehingga sangat efektif menahan laju kenaikan suhu kabin (*holdover time*) [10].

Meskipun berbagai studi sebelumnya menunjukkan bahwa material PCM dengan rentang titik leleh 2–7 °C merupakan spesifikasi yang paling ideal untuk aplikasi penyimpanan vaksin [7], [11], kajian komparatif yang secara komprehensif mengisolasi implikasi konduktivitas termal PCM murni terhadap parameter termodinamika *steady-state*, khususnya pada sistem refrigerasi kompresi uap berbasis R600a yang masih terbatas [12]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh empat variasi karakteristik PCM terhadap komponen beban pendinginan, daya aktual kompresor, dan *Coefficient of Performance* (COP) pada lemari es vaksin medis *undercounter* bervolume 0,130 m³. Analisis ini krusial untuk membuktikan secara teknis bahwa integrasi lapisan fisik PCM tidak mendegradasi efisiensi energi harian lemari es selama beroperasi normal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan dan perhitungan teoretis pada kondisi tunak (*steady-state*) untuk mengevaluasi beban pendinginan dasar dan performa termodinamika sistem refrigerasi lemari es vaksin pada titik desain operasi maksimal. Asumsi kondisi tunak digunakan dengan pertimbangan bahwa profil perpindahan panas melalui dinding komposit akan mencapai titik stabil (konstan terhadap waktu) ketika pintu lemari es dalam keadaan tertutup rapat. Pendekatan ini memungkinkan pengaruh variasi konduktivitas termal PCM dapat dianalisis secara spesifik tanpa interferensi dari fluktuasi termal *transien* eksternal. Metode dibagi menjadi tiga tahapan utama: deskripsi sistem dan spesifikasi material, perhitungan beban pendinginan, serta analisis siklus termodinamika.

Sistem yang dimodelkan adalah lemari es vaksin medis *undercounter* dengan volume internal 0,130 m³ (dimensi 0,417 m × 0,480 m × 0,650 m), merepresentasikan kapasitas tipikal fasilitas kesehatan primer [13]. Suhu penyimpanan internal ditetapkan pada 5 °C sesuai rentang optimal penyimpanan vaksin 2–8 °C, sedangkan suhu lingkungan eksternal menggunakan 43 °C untuk menyimulasikan kondisi iklim tropis *hot zone* sesuai standar WHO PQS [14]. Refrigeran yang digunakan adalah R600a (*isobutane*), refrigeran hidrokarbon ramah lingkungan dengan GWP rendah yang telah diadopsi luas pada peralatan *cold chain prequalified* WHO [12]. Temperatur evaporator dan kondensor ditetapkan masing-masing –5 °C dan 45 °C, dengan efisiensi isentropik kompresor (η_{is}) sebesar 0,75, yakni nilai tipikal kompresor hermetis skala kecil [11]. Parameter lengkap sistem disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Awal Sistem Lemari Es Vaksin

Parameter	Nilai
V	0.130 m ³
Dimensi Internal	0.417 × 0.480 × 0.650 m
T_{in}	5°C
T_{out}	43°C
refrigeran	R600a (<i>Isobutane</i>)
T_{evap}	–5°C
T_{cond}	45°C
η_{is}	0.75

Produk yang disimpan meliputi vaksin Hepatitis B (Hep B) dalam vial kaca boros likat tipe I, dan rak *stainless steel* 316 sebagai tempat penyimpanan. Diasumsikan 500 vial bervolume 1 mL sehingga massa vaksin cair total adalah 0,5 kg. Karena komposisinya lebih dari 99% berbasis larutan *aqueous*, sifat termal vaksin aproksimasi menggunakan nilai air, kapasitas panas spesifik $c_p = 4,18$ kJ/kg·K [15].

Tabel 2. Parameter Termal dan Massa Produk [15], [16], [17]

Komponen	Material	Massa Total (kg)	Kalor Jenis, cp (kJ/kg·K)
Vaksin (500 vial)	Aqueous/Water	0,5	4,18
Botol Vial (500 pcs)	Kaca Boros	2,5	0,83
Rak Penyimpanan (2 unit)	likat Tipe I Stainless steel 316	2,3	0,50
Kondisi Operasi:	- Suhu Awal (T_{awal}): 25 °C	- Suhu Akhir (T_{akhir}): 5 °C	- Waktu Pendinginan: 5 Jam

Perpindahan panas melalui dinding dimodelkan sebagai konduksi satu dimensi pada dinding komposit empat lapis: *powder-coated galvanized steel* (1 mm) – *polyurethane foam* (60 mm) – PCM (15 mm) – aluminium *powder coating* (1 mm), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 [14]. Koefisien konveksi luar diasumsikan 7 W/m²·K (*free convection*) dan konveksi dalam 15 W/m²·K (*forced convection*) [18].

Tabel 3. Parameter Termal Lapisan Dinding Komposit [15]

Lapisan (Dari Luar ke Dalam)	Ketebalan, L (mm)	Konduktivitas Termal, k (W/m·K)
Powder-coated galvanized steel	1	50
Polyurethane foam (PU)	60	0,025
Phase Change Material (PCM)	15	(Bervariasi, lihat tabel PCM)
Aluminium powder coating	1	200
Koefisien Konveksi:	$h_{out} = 7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	$h_{in} = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

perpindahan panas melalui dinding dimodelkan sebagai konduksi satu dimensi pada komposit empat lapis, di mana ketebalannya divalidasi berdasarkan standar optimasi

termomekanis. Lapisan terluar baja galvanis (1 mm) digunakan untuk menjaga integritas struktural dan mencegah korosi [15]. Insulasi utama *polyurethane foam* (60 mm) ditetapkan berdasarkan batas ketebalan optimal untuk meredam fluktuasi suhu ekstrem di iklim tropis tanpa mengorbankan volume ruang simpan secara signifikan [19]. Selanjutnya, lapisan *Phase Change Material* (15 mm) diadopsi dari dimensi standar *waterpack* WHO PQS, yang terbukti secara eksperimental mampu memberikan *holdover time* krusial tanpa memicu pendinginan berlebih (*over-cooling*) [10]. Terakhir, lapisan terdalam menggunakan aluminium (1 mm) karena konduktivitas termalnya yang tinggi ($k = 200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) memungkinkan perpindahan kalor yang cepat dan merata dari ruang kabin menuju PCM, sehingga efektif mencegah terjadinya *hot-spots* pada produk vaksin [15].

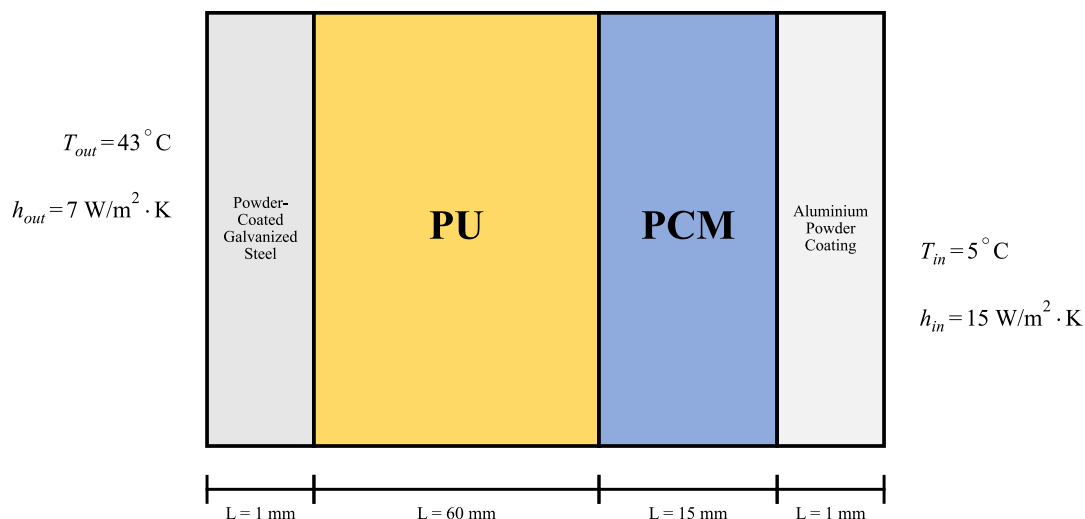
Empat jenis PCM dengan rentang titik leleh 2–7 °C dibandingkan dalam penelitian ini. Spesifikasi masing-masing PCM disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Properti Termal Varian PCM [20], [21], [22], [23]

No	Jenis PCM	Melting Point (°C)	k (W/m·K)	Tipe
1	n-Tetradecane (C ₁₄ H ₃₀)	5,8	0,21	Organic
2	CrodaTherm 5	5	0,17	Bio-based
3	Rubitherm RT5	5–7	0,20	Organic paraffin
4	Rubitherm SP5 gel	2–7	0,60	Inorganic gel

Beban pendinginan produk dihitung berdasarkan panas sensibel karena tidak terjadi perubahan fase pada vaksin, vial kaca, maupun rak *stainless steel* dalam rentang suhu operasi 2–8 °C. Beban produk dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$Q_{produk} = \frac{\Sigma m \cdot c_p \cdot (T_{awal} - T_{akhir})}{\text{waktu pendinginan}} \quad (1)$$



Gambar 1. Lapisan Transmisi Lemari Es

Beban transmisi menggunakan koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) pada Persamaan (2):

$$Q_{transmisi} = U \cdot A \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

Tabel 5. Parameter Perhitungan Beban Infiltrasi Udara

Parameter	Nilai
Volume Internal (V_{box})	0,130 m ³
Laju Pergantian Udara (n)	0,5 kali/jam
Efisiensi Volumetrik (η_{vol})	0,5
Densitas Udara Dalam pada 5 °C (ρ_{in})	1,269 kg/m ³
Entalpi Udara Ambien pada 43 °C, ~50% RH (h_{amb})	110,1 kJ/kg
Entalpi Udara Internal pada 5 °C, ~85% RH (h_{in})	16,5 kJ/kg

Pada beban infiltrasi menggunakan pendekatan entalpi total sesuai ASHRAE *Handbook Fundamentals* 2021 Chapter 26 [18] pada Persamaan (3):

$$Q_{infiltrasi} = \frac{n \cdot V_{box} \cdot \eta_{vol} \cdot \rho_{in} \cdot (h_{amb} - h_{in})}{3600} \quad (3)$$

Beban total merupakan penjumlahan seluruh komponen beban pada Persamaan (4):

$$Q_{total} = Q_{produk} + Q_{transmisi} + Q_{infiltrasi} \quad (4)$$

Kinerja sistem refrigerasi dievaluasi berdasarkan siklus kompresi uap standar yang terdiri dari empat titik keadaan: (1) keluar evaporator/masuk kompresor, (2) keluar kompresor/masuk kondensor, (3) keluar kondensor/masuk katup ekspansi, dan (4) keluar katup ekspansi/masuk evaporator. Nilai entalpi spesifik di setiap titik ditentukan dari tabel properti termodinamika R600a berdasarkan tekanan dan temperatur operasi yang telah ditetapkan [11], dengan asumsi *superheat* 5°C pada keluar evaporator (titik 1, masuk kompresor) dan *subcooling* 5°C pada keluar kondensor (titik 3, masuk katup ekspansi).

Laju aliran massa refrigeran ($\dot{m}$) yang disirkulasikan untuk mengatasi beban panas ruang dihitung menggunakan Persamaan (5) sebagai rasio antara total beban pendinginan (Q_{total}) terhadap kemampuan serap kalor spesifik refrigeran di evaporator ($h_1 - h_4$).

$$\dot{m} = \frac{Q_{total}}{h_1 - h_4} \quad (5)$$

Selanjutnya, daya aktual yang dibutuhkan kompresor ($\dot{W}_{komp}$) untuk menekan uap refrigeran ditunjukkan pada Persamaan (6), yang merupakan perkalian antara laju aliran massa dengan energi kerja kompresi.

$$W_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (6)$$

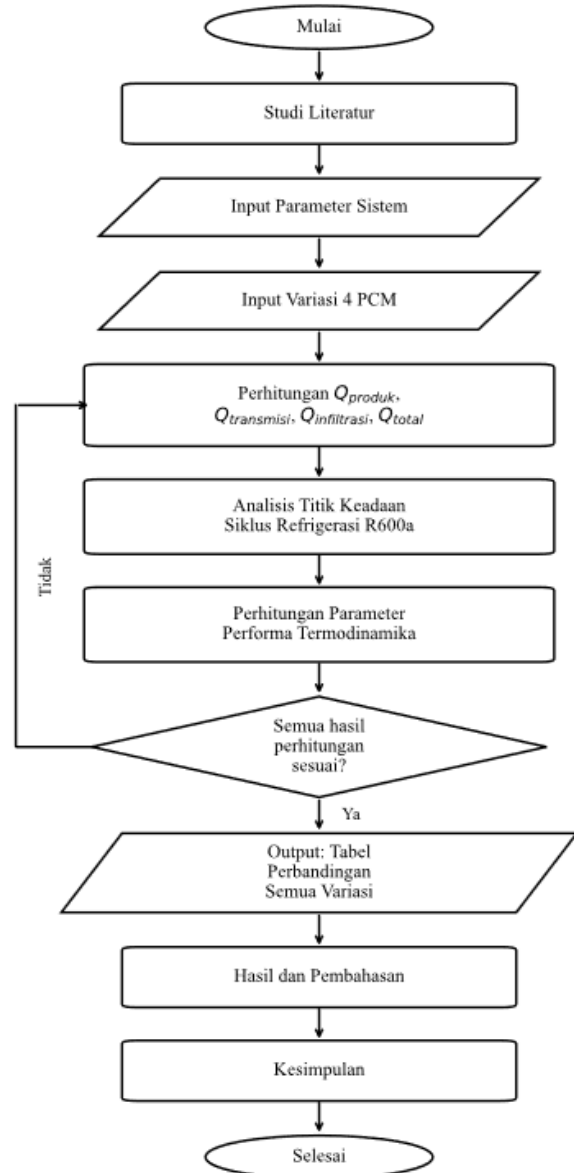
Kalor total yang dibuang oleh sistem ke lingkungan melalui kondensor ($\dot{Q}_{cond}$) dihitung pada Persamaan (7) berdasarkan laju aliran massa dan pelepasan energi refrigeran ($h_2 - h_3$) saat wujudnya berubah kembali menjadi cair.

$$Q_{cond} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (7)$$

Terakhir, efisiensi energi keseluruhan dari sistem refrigerasi dievaluasi menggunakan koefisien performansi (COP) pada Persamaan (8), yang secara matematis membandingkan manfaat pendinginan yang dihasilkan terhadap besarnya pengorbanan energi kerja kompresor yang diberikan.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (8)$$

Alur keseluruhan proses penelitian dari penentuan parameter sistem hingga perhitungan performa termodinamika disajikan dalam diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan komponen beban pendinginan untuk lima variasi konfigurasi dinding (tanpa PCM dan empat jenis PCM) disajikan pada Tabel 3. Beban produk (Q_{produk}) dan beban infiltrasi ($Q_{infiltrasi}$) bernilai konstan untuk semua variasi, masing-masing sebesar 5,82 W dan 1,07 W, karena kedua komponen ini tidak dipengaruhi oleh jenis material lapisan dinding. Perbedaan antar variasi hanya terjadi pada beban transmisi ($Q_{transmisi}$) yang dipengaruhi oleh konduktivitas termal PCM.

Tabel 6. Komponen Beban Pendingin Per Variasi PCM

Komponen	Tanpa PCM	n-Tetradecane (C14)	CrodaTherm 5	Rubitherm RT5	Rubitherm SP5_gel
Q_{produk} (W)	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82
$Q_{transmisi}$ (W)	17.22	16.95	16.89	16.94	17.13
$Q_{infiltrasi}$ (W)	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
Q_{total} (W)	24.11	23.84	23.78	23.83	24.02

Tabel 6 menyajikan komparasi numerik komponen beban pendinginan untuk seluruh variasi konfigurasi dinding komposit. Nilai Q_{produk} dan $Q_{infiltrasi}$ tercatat konstan masing-masing sebesar 5,82 W dan 1,07 W pada seluruh skenario, karena kedua komponen ini merupakan fungsi dari kapasitas kalor spesifik massa produk dan entalpi udara eksternal yang tidak bergantung pada karakteristik termofisik lapisan dinding. Variasi antar konfigurasi terjadi pada $Q_{transmisi}$ sebagai implikasi langsung dari perbedaan resistansi termal masing-masing susunan dinding komposit.

Konfigurasi tanpa PCM menghasilkan $Q_{transmisi}$ tertinggi sebesar 17,22 W, konsisten dengan ketiadaan lapisan sekunder setebal 15 mm yang mampu memberikan hambatan konduktif tambahan. Di antara kelima variasi PCM, CrodaTherm 5 ($k = 0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) menghasilkan $Q_{transmisi}$ terendah sebesar 16,89 W sehingga menekan Q_{total} ke nilai minimum 23,78 W, sedangkan Rubitherm SP5_gel ($k = 0,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) menghasilkan Q_{total} tertinggi di antara variasi PCM sebesar 24,02 W. Hasil ini mengonfirmasi korelasi linear antara konduktivitas termal PCM dengan beban transmisi yang terbentuk, konsisten dengan prinsip bahwa resistansi termal dinding komposit merupakan fungsi invers dari konduktivitas material penyusunnya.

Tabel 7. Performa Termodinamika Sistem Per Variasi PCM

Variasi	Q_{total} (W)	$\dot{m}$ ($\times 10^{-5} \text{ kg/s}$)	$\dot{W}_{komp}$ (W)	$\dot{Q}_{cond}$ (W)	COP
Tanpa PCM	24,11	8,059	4,376	28,49	5,51
n-Tetradecane	23,84	7,968	4,327	28,16	5,51
CrodaTherm 5	23,78	7,948	4,316	28,09	5,51
Rubitherm RT5	23,83	7,965	4,325	28,15	5,51
SP5_gel	24,02	8,028	4,359	28,37	5,51

Tabel 7 menguraikan respons parameter termodinamika siklus kompresi uap terhadap variasi profil Q_{total} dari masing-masing konfigurasi. Berdasarkan hukum kekekalan energi, kapasitas efek refrigerasi evaporator didesain selaras dengan Q_{total} , yang pada gilirannya menetapkan laju aliran massa refrigeran ($\dot{m}$). Variasi CrodaTherm 5 yang menghasilkan Q_{total} terendah menurunkan kebutuhan sirkulasi R600a menjadi $7,948 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$, yang secara proporsional mereduksi daya kompresor ($\dot{W}_{komp}$) ke nilai minimal 4,316 W dan laju disipasi kalor kondensor ($\dot{Q}_{cond}$) ke nilai terendah 28,09 W.

Aspek paling fundamental dari hasil ini adalah stabilitas nilai *Coefficient of Performance* (COP) yang tercatat identik sebesar 5,51 pada seluruh variasi. Hal ini merupakan konsekuensi termodinamika yang melekat pada siklus kompresi uap ideal, COP ditentukan sepenuhnya oleh entalpi titik keadaan di batas tekanan operasi sehingga selama temperatur evaporasi -5°C dan kondensasi 45°C dipertahankan konstan, fluktuasi beban termal antarvariasi tidak mempengaruhi efisiensi energi sistem.

Hasil pada kondisi *steady-state* mengindikasikan bahwa penambahan lapisan PCM setebal 15 mm memberikan kontribusi resistansi termal sekunder yang bersifat marginal, dengan CrodaTherm 5 sebagai kandidat terbaik. Meskipun demikian, fungsi insulasi dominan tetap dipegang oleh Polyurethane Foam ($k = 0,025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) yang secara inheren jauh lebih unggul sebagai penghalang konduksi termal. Yang lebih signifikan, integrasi PCM sebagai lapisan dinding terbukti tidak membebani kerja kompresor selama operasi nominal, sebagaimana dibuktikan oleh kestabilan nilai COP pada angka 5,51 di seluruh variasi hasil simulasi, konsisten dengan temuan Wickramaratne et al. yang melaporkan bahwa integrasi PCM pada sistem refrigerasi justru berpotensi meningkatkan COP dan menurunkan konsumsi daya kompresor [24].

Keunggulan fundamental PCM justru baru teraktivasi secara krusial pada kondisi *transien*, yakni saat terjadi kegagalan pasokan listrik. Kalor laten yang tersimpan di dalam material mendisipasi secara aktif kebocoran panas sensibel dari lingkungan, sehingga laju kenaikan suhu kabin tertahan secara efektif. Studi eksperimental Chojnacky dan Rodriguez. mengonfirmasi bahwa penggunaan massa termal pada lemari es vaksin mampu mempertahankan suhu antara 2°C hingga 8°C selama 4 hingga 6 jam tanpa pasokan listrik [25], memberikan *holdover time* yang krusial bagi keberlangsungan integritas rantai dingin vaksin.

Evaluasi dalam studi ini difokuskan secara eksklusif pada pemodelan termodinamika *steady-state* berbasis perhitungan analitis satu dimensi, sehingga belum mencakup dinamika perpindahan panas secara komprehensif. Kinerja aktual PCM pada kondisi *transien*, meliputi durasi waktu pencairan saat pemadaman listrik di suhu ekstrem serta efek dinamis frekuensi bukaan pintu kabin, memerlukan validasi lanjutan melalui investigasi eksperimental langsung pada prototipe fisik lemari es vaksin.

PENUTUP

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan secara teknis bahwa integrasi lapisan fisik *Phase Change Material* (PCM) pada

dinding lemari es vaksin medis *undercounter* tidak mendegradasi efisiensi termodinamika sistem selama beroperasi normal (kondisi tunak). Berdasarkan analisis terhadap empat variasi, *CrodaTherm 5* ($k = 0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) menghasilkan performa termal paling optimal dengan menekan beban pendinginan total ke angka minimum 23,78 W dan mereduksi daya aktual kompresor menjadi 4,316 W, lebih efisien dibandingkan konfigurasi tanpa PCM (4,376 W). Parameter *Coefficient of Performance* (COP) juga tercatat sangat stabil pada angka 5,51 untuk seluruh konfigurasi. Hal ini menegaskan bahwa selain fungsi fundamentalnya sebagai penyimpan energi termal laten (inersia termal) pada kondisi tak tunak, keberadaan wujud fisik PCM turut menyumbang resistansi termal sekunder yang menguntungkan tanpa membebani siklus refrigerasi kompresi uap harian.

Secara praktis, inovasi lemari es medis berbasis PCM ini menawarkan keandalan ganda (*dual reliability*) yang sangat relevan untuk dikembangkan di daerah tropis dengan risiko cuaca ekstrem seperti Indonesia. Sistem ini mampu mengoptimalkan efisiensi energi listrik saat beroperasi normal, sekaligus menyediakan perlindungan termal kritis (*holdover time*) saat terjadi pemadaman listrik darurat. Oleh karena itu, rancangan ini memiliki potensi besar untuk diimplementasikan secara luas pada jaringan fasilitas kesehatan primer, guna meminimalisir tingginya angka kerusakan vaksin akibat kegagalan rantai dingin.

Saran

Penelitian lanjutan perlu melakukan simulasi dinamis (*transien t*) untuk menghitung secara kuantitatif durasi *holdover time* aktual masing-masing variasi PCM saat terjadi pemadaman listrik pada suhu ambien 43°C , mengingat hal tersebut merupakan parameter kinerja paling krusial yang belum dijawab oleh studi ini. Selain itu, fabrikasi dan pengujian eksperimental pada prototipe fisik lemari es vaksin sangat direkomendasikan untuk memvalidasi hasil pemodelan analitik satu dimensi, termasuk pengaruh frekuensi bukaan pintu kabin terhadap stabilitas suhu internal.

Dalam konteks pengembangan produk, *CrodaTherm 5* direkomendasikan sebagai kandidat PCM prioritas untuk pengujian lanjutan, namun evaluasi terhadap stabilitas termal siklus beku-cair jangka panjang, kompatibilitas material, dan aspek ekonomi perlu turut dipertimbangkan sebelum implementasi pada fasilitas kesehatan. Studi juga dapat diperluas dengan memvariasikan ketebalan lapisan PCM untuk mengidentifikasi dimensi optimal yang memaksimalkan *holdover time* tanpa mengorbankan volume ruang simpan, guna mendukung pengembangan desain lemari es vaksin yang lebih andal dan efisien untuk konteks layanan kesehatan primer di wilayah tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Pambudi, A. Sarifudin, I. M. Gandidi, and R. Romadhon, "Vaccine cold chain management and cold storage technology to address the challenges of vaccination programs," Nov. 01, 2022, Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.039>
- [2] Centers for Disease Control and Prevention, "Storage and Handling of Immunobiologics," Atlanta, Jan. 2023. Accessed: Mar. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/vaccines/hcp/downloads/storage-handling-toolkit.pdf>
- [3] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), *Climate Outlook 2023*. Jakarta: BMKG, 2022. [Online]. Available: <https://iklim.bmkg.go.id/bmkgadmin/storage/buletin/BMKG%20Climate%20Outlook%202023.pdf>
- [4] GlaxoSmithKline, "Engerix-B (Hepatitis B Vaccine, Recombinant) Prescribing Information," U.S. Food and Drug Administration, Silver Spring, MD, 2021. Accessed: Mar. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/media/119403/download>.
- [5] World Health Organization, *Temperature Sensitivity of Vaccines*, WHO/IVB/06.10. Geneva: WHO Department of Immunization, Vaccines and Biologicals, 2006. Accessed: Apr. 22, 2026 [Online]. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/69387>.
- [6] World Health Organization, "Immunization Agenda 2030: A Global Strategy to Leave No One Behind," 2020. Accessed: Apr. 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/immunization-vaccines-and-biologicals/strategies/ia2030>
- [7] M. Lança, J. Garcia, and J. Gomes, "Heat Transfer Mechanisms in Refrigerated Spaces: A Comparative Study of Experiments, CFD Predictions and Heat Load Software Accuracy," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 23, 2025, <https://doi.org/10.3390/en18236280>
- [8] 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," *Applied Energy*, vol. 99, pp. 513–533, Nov. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>
- [9] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, Feb. 2003, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)

- [10] L. N. Mane and P. A. Patil, "Experimental investigation of the effect of phase change material on backup time and equivalent energy consumption of domestic refrigerator," *Energy Storage and Saving*, vol. 3, no. 4, pp. 250–258, Dec. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.07.001>
- [11] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2020. https://www.academia.edu/download/54768587/%EC%84%BC%EA%B2%94_%EC%97%B4%EC%97%AD%ED%95%99_8%ED%8C%90_1.pdf
- [12] M. M. Joybari, M. S. Hatamipour, A. Rahimi, and F. G. Modarres, "Exergy analysis and optimization of R600a as a replacement of R134a in a domestic refrigerator system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 4, pp. 1233–1242, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.02.012>.
- [13] Meling Biomedical, "2~8°C Undercounter Pharmacy/Medical/Vaccine Refrigerator YC-130L," Meling Biomedical Co., Ltd. Accessed: Mar. 20, 2026. [Online]. Available: https://www.melingbiomedical.com/2-8-undercounter-pharmacy-medical-vaccine-refrigerator-yc-130l_p61.html
- [14] World Health Organization, "PQS Performance Specification E003/RF03.7: Refrigerator or Combined Refrigerator and Freezer," Geneva, Switzerland, Dec. 2024. Accessed: Mar. 06, 2026. [Online]. Available: <https://extranet.who.int/prequal/immunization-devices/e003-refrigerators-and-freezers>
- [15] Y. Cengel, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2020. <https://services.just.edu.jo/CourseQA/Uploads/Syllabus/223451.pdf>
- [16] B. Hruška, M. Chromčíková, A. Nowicka, J. Macháček, J. Gombárová, and M. Liška, "Thermodynamic model and structural analysis of borosilicate glasses for pharmacy," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2025, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14932-z>
- [17] P. Pichler, T. Leitner, E. Kaschnitz, J. Rattenberger, and G. Pottlacher, "Surface Tension and Thermal Conductivity of NIST SRM 1155a (AISI 316L Stainless steel)," *Int. J. Thermophys.*, vol. 43, no. 5, May 2022, <https://doi.org/10.1007/s10765-022-02991-5>
- [18] ASHRAE, *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, SI ed. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021, ch. 26. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-45267-3_6
- [19] W. J. Yoon, K. Seo, and Y. Kim, "Development of an optimization strategy for insulation thickness of a domestic refrigerator-freezer," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 3, pp. 1162–1172, May 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.11.013>
- [20] PubChem, "Tetradecane," National Library of Medicine. Accessed: Mar. 13, 2026. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tetradecane>
- [21] Croda Industrial Specialities, "CrodaTherm 5." Accessed: Mar. 02, 2026. [Online]. Available: https://www.crodaindustrialspecialities.com/en-gb/product-finder/product/1795-CrodaTherm_1_5
- [22] Rubitherm Technologies, "Techdata RT5." Accessed: Mar. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT5_EN_30092020.PDF
- [23] Rubitherm Technologies GmbH, "SP5_gel." Accessed: Mar. 02, 2026. [Online]. Available: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_SP5_gel_EN_12072022.PDF
- [24] H. D. Wickramaratne, N. S. Senanayake, and T. S. S. Jatunarachchi, "Improvement of Energy Efficiency of Household Refrigerators by the Incorporation of Phase Changing Materials," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 2022, no. 2, pp. 29–35, <http://article.sapub.org/10.5923/j.ijee.20221202.01.html#:~:text=doi%3A10.5923/j.ijee.20221202.01>
- [25] M. Chojnacky and A. L. Rodriguez, "Effect of thermal ballast loading on temperature stability of domestic refrigerators used for vaccine storage," *PLoS One*, vol. 15, no. 7 July, Jul. 2020, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235777>