Analisis Performa Sistem Refrigerasi dan Karakteristik Termal *Cold Storage* Vaksin PCV13

Aria Ambara[1], Sumeru[2], Apip Badarudin[3]

[1]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: aria.ambara.tptu425@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: sumeru@polban.ac.id
[3]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: apipbdr@polban.ac.id

ABSTRAK

Keandalan *cold storage* menentukan keberlangsungan rantai dingin vaksin PCV13 yang dipersyaratkan berada pada suhu 2–8°C. Penelitian ini mengevaluasi sistem refrigerasi gudang vaksin melalui analisis siklus kompresi uap, pemetaan suhu tiga dimensi, uji gangguan operasional, dan perhitungan beban pendinginan aktual. Tekanan dan suhu refrigeran diukur pada dua unit R134a, sedangkan 27 pencatat suhu dipasang dalam susunan 3×3×3 dan direkam selama 72 jam. Uji pemadaman dilanjutkan dengan pemulihan sistem untuk menentukan *holding time* dan *recovery time*. Kapasitas pendinginan termodinamik mencapai 23,54 kW dengan COP rata-rata 2,85 dan efisiensi terhadap Carnot 50,15%. Seluruh sensor selama pemetaan berada pada rentang 2–8°C; rata-rata tertinggi terdapat pada SP15 sebesar 6,35°C dan terendah pada SP02 sebesar 4,96°C, dengan deviasi ekstrem 3,7 K. *Holding time* tercatat 43 menit dan *recovery time* 32 menit. Beban pendinginan aktual sebesar 22,64 kW menghasilkan margin kapasitas 0,90 kW dan utilisasi 96,2%. Sistem dinilai mencukupi pada kondisi pengujian, tetapi margin yang terbatas memerlukan pemantauan dan rencana kontingensi yang disiplin.

Kata Kunci:
cold storage vaksin, PCV13, COP, pemetaan suhu, *holding time*, beban pendinginan

ABSTRACT

The reliability of cold storage determines the continuity of the PCV13 vaccine cold chain, which must remain at 2–8°C. This study evaluated a vaccine storage refrigeration system using vapor compression cycle analysis, three dimensional temperature mapping, an operational disturbance test, and an actual cooling load calculation. Refrigerant pressure and temperature were measured on two R134a units, while 27 temperature loggers were arranged in a 3×3×3 grid and monitored for 72 hours. A power-failure test followed by system restart was used to establish holding and recovery times. The thermodynamic cooling capacity was 23.54 kW, *with a mean COP of 2.85 and 50.15% efficiency relative to the Carnot limit. All sensors remained within 2–8°C during mapping; SP15 had the highest mean temperature of 6.35°C and SP02 the lowest at 4.96°C, while the extreme spatial deviation was 3.7 K. Holding and recovery times were 43 and 32 minutes, respectively. The actual cooling load was 22.64* kW, *leaving a 0.90* kW *capacity margin at 96.2% utilization. The system was adequate under the tested conditions, although the limited margin requires disciplined monitoring and contingency planning.*

Keywords:
vaccine cold storage, PCV13, COP, temperature mapping, holding time, cooling load

1. PENDAHULUAN

Vaksin PCV13 merupakan produk biofarmasi peka suhu. Selama penyimpanan dan distribusi, suhu perlu dipertahankan pada 2–8°C agar mutu produk tetap terjaga (1). Paparan panas dapat mempercepat degradasi, sedangkan pembekuan juga dapat merusak vaksin tertentu dan sering kali tidak terdeteksi hanya melalui pemeriksaan visual (2, 3). Karena itu, keandalan fasilitas tidak cukup dinilai dari tercapainya setelan termostat; keseragaman spasial, kemampuan menahan kenaikan suhu ketika pendinginan terhenti, serta kecepatan pemulihan setelah gangguan perlu dibuktikan melalui pengujian terdokumentasi.

Pemantauan rantai dingin menghasilkan dasar bagi keputusan penanganan produk ketika terjadi penyimpangan suhu(4). Informasi posisi, waktu, dan riwayat ekskursi sama pentingnya dengan pembacaan suhu sesaat karena gangguan fasilitas dapat berkembang sebelum tindakan koreksi dilakukan (5, 6). Pemilihan media penyangga dan respons termal sensor juga perlu diperhatikan agar data pencatat suhu benar-benar mewakili paparan produk (7). Dalam ruang berukuran besar, distribusi udara dari evaporator, posisi palet, pintu, dan selubung bangunan dapat membentuk titik panas maupun titik dingin yang tidak terwakili oleh satu sensor kontrol.

Penelitian terdahulu umumnya membahas manajemen rantai dingin atau pemetaan suhu sebagai evaluasi terpisah. Hanson et al. (2017) dalam artikelnya melakukan telaah terhadap 45 penelitian mengenai kondisi temperatur pada berbagai tahapan vaccine cold chain. Hasil kajian menunjukkan bahwa paparan suhu di bawah rentang yang direkomendasikan masih sering terjadi baik pada tahap penyimpanan maupun distribusi vaksin. Sebanyak sekitar 33% fasilitas penyimpanan di negara maju dan 37,1% di negara berkembang mengalami kejadian suhu di bawah batas yang dipersyaratkan (3).

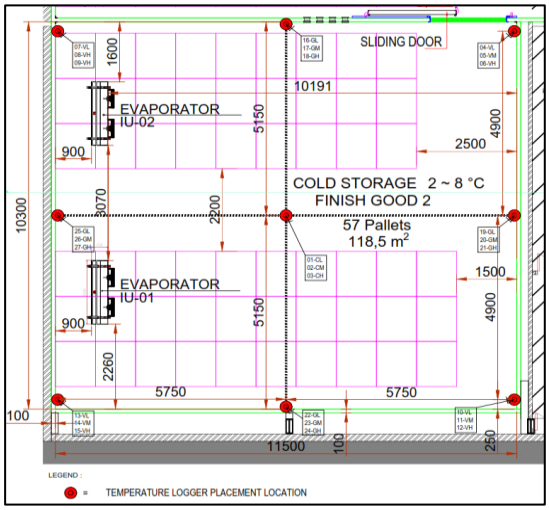
Comes, Sandvik, dan Van de Walle (2018) dalam penelitiannya membahas pentingnya keandalan sistem *cold chain* dalam mempertahankan mutu vaksin selama penyimpanan dan distribusi. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa efektivitas cold chain tidak hanya dipengaruhi oleh kemampuan peralatan refrigerasi, tetapi juga oleh keandalan pasokan listrik, sistem pemantauan temperatur, teknologi informasi, serta kemampuan pengambilan keputusan ketika terjadi gangguan operasional (5). Kajian ini mengintegrasikan empat indikator pada satu fasilitas *cold storage finished good 02* (yang selanjutnya akan disebut FG-02): pertama yaitu performa termodinamik dua unit refrigerasi, kedua yaitu distribusi suhu 27 titik, ketiga yaitu ketahanan dan pemulihan selama simulasi kegagalan daya, serta keempat yaitu keseimbangan kapasitas terhadap beban pendinginan aktual. Tujuannya adalah menilai apakah kapasitas terpasang memadai untuk mempertahankan kondisi penyimpanan vaksin PCV13 pada skenario operasi yang diuji dan menentukan titik kritis untuk pemantauan permanen.

2. METODOLOGI

2.1 Objek dan Kondisi Pengujian

Objek penelitian adalah sistem *cold storage finished good* (FG)-02 ruangan penyimpanan dingin lengkap dengan dan sistem pendinginnya milik perusahaan biofarmasi di Jakarta Timur. Dimensi internal ruang 11,5 m×10,3 m×2,7 m atau 319,81 m^3. Selubung menggunakan panel *polyisocyanurate* (PIR) setebal 100 mm dengan nilai $U = 0,22$ W/m^2K. Ruangan diisi 57 palet beban tiruan berupa kardus kosong yang disusun diatas palet dan ditempatkan mengikuti tata letak operasional. Termostat diatur pada 4,7°C dengan diferensial 2 K.

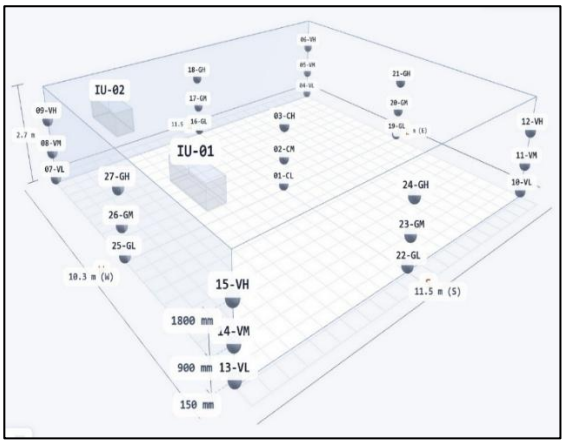
Sistem refrigerasi FG-02 terdiri atas dua unit kondensasi Bitzer LH114/4CES-9Y berpendingin udara yang identik (Unit 1 dan Unit 2), masing-masing berkapasitas nominal 11 kW dan menggunakan refrigeran R134a. Kedua unit beroperasi secara paralel dan independen, masing-masing melayani satu evaporator (IU-01 dan IU-02) yang ditempatkan berdampingan pada sisi barat laut ruang (Gambar 1a). Konfigurasi paralel ini dipilih agar kedua unit dapat beroperasi bersamaan untuk memenuhi beban puncak, sekaligus memberikan redundansi parsial apabila salah satu unit mengalami gangguan. Sirkulasi udara dingin dari kedua evaporator bercampur di dalam ruang sehingga distribusi suhu yang terukur pada 27 titik logger (Bagian 2.2) mencerminkan efek gabungan kedua unit, bukan zona terpisah. Skema tata letak unit kondensasi, evaporator, dan sensor ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Denah penempatan sensor dan evaporator.

Pengukuran tekanan refrigeran dilakukan menggunakan *pressure gauge* bawaan unit kondensasi Bitzer, mengacu pada standar EN 837-1, dengan rentang ukur -1 hingga 18 bar untuk sisi tekanan rendah (*suction*) dan -1 hingga 38 bar untuk sisi tekanan tinggi (*discharge*). Suhu permukaan pipa diukur menggunakan kamera termal Testo 868 dengan rentang ukur -30°C hingga +650°C. Pemantauan suhu ruang selama 72 jam dan uji gangguan menggunakan

27 unit *data logger* Testo 174T, dengan rentang ukur −30°C hingga +70°C. Sistem refrigerasi utama terdiri atas dua unit kondensasi Bitzer LH114/4CES-9Y berkapasitas nominal 11 kW per unit. Seluruh instrumen dalam kondisi terkalibrasi pada saat pengujian dilakukan.Kualifikasi area penyimpanan dan penempatan sensor mengacu pada pendekatan berbasis risiko dalam pedoman WHO untuk ruang terkendali suhu (8, 9). Dua puluh tujuh pencatat suhu disebar dalam kisi 3×3×3 pada ketinggian sekitar 0,15 m; 0,90 m; dan 1,80 m (Gambar 1). Pemetaan dilakukan pada kondisi berbeban selama 72 jam, 17–20 Oktober 2025, dengan interval 15 menit. Pengujian gangguan pada 21 Oktober 2025 menggunakan interval satu menit. Kedua mesin dimatikan setelah kondisi stabil; mesin kemudian dinyalakan kembali setelah periode pemanasan untuk mengukur respons pemulihan.



Gambar 2. Susunan tiga dimensi penempatan sensor dan evaporator

2.2 Analisis Termodinamik dan Termal

Tekanan sisi hisap dan buang dibaca melalui *pressure gauge*. Suhu permukaan pipa diukur tiga kali dengan kamera termal Testo 868 pada pipa isap, buang, *liquid line*, dan evaporator. Analisis siklus mengacu pada prinsip termodinamika kompresi uap (10–12). Selisih suhu permukaan terhadap suhu refrigeran dikoreksi sebesar 2 K sesuai arah aliran kalor; pendekatan ini mempertimbangkan perbedaan yang dapat terjadi antara suhu dinding pipa dan fluida internal (13). Tekanan dan suhu dipetakan pada diagram *P-h* R134a untuk menentukan h_1, h_2, dan h_4. Persamaan kinerja siklus dinyatakan sebagai berikut:

$$q_e = h_1 - h_4, \quad w_c = h_2 - h_1, \quad COP = \frac{q_e}{w_c}. \qquad (1)$$

Laju massa acuan pabrikan sebesar 274 kg/jam per unit digunakan untuk memperoleh $\dot{Q}_e = \dot{m}\, q_e$ dan $\dot{W}_c = \dot{m}\, w_c$. COP Carnot dihitung dengan $T_e/(T_k - T_e)$ pada temperatur absolut. Distribusi suhu diringkas menggunakan nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan $\Delta T = T_{max} - T_{min}$. *Holding time* didefinisikan sejak mesin mati hingga sensor pertama melebihi 8°C, sedangkan *recovery time dcsaacasvavava*dihitung sejak mesin hidup hingga seluruh sensor kembali di bawah 8°C.

Beban sensibel selama fase pemulihan dihitung dari perubahan suhu 12,29°C menjadi 6,39°C dalam 29 menit:

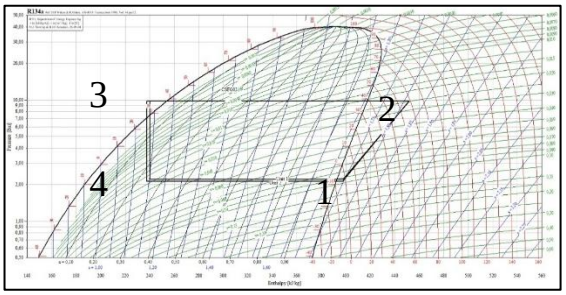
$$\dot{Q}_s = \sum_i \frac{m_i . CP_i . \Delta T}{\Delta t}, \quad \dot{Q}_k = UA(T_a - T_r). \quad (2)$$

Komponen yang dihitung adalah kardus, palet HDPE, udara ruang, inti PIR, pelat baja sisi dalam, lantai aluminium, konduksi selubung, kipas, dan lampu. Properti kardus mengacu pada kajian kemasan termal (14), sedangkan HDPE mengacu pada basis data material FSRI (15). Beban personel dikeluarkan karena tidak ada orang di dalam ruang selama pengujian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Performa Sistem Refrigerasi

Pemetaan diagram *P-h* (Gambar 3) menghasilkan efek refrigerasi 154,967 dan 154,266 kJ/kg untuk Unit 1 dan Unit 2. Kedua unit menunjukkan kondisi hampir identik, termasuk *super-heat* sisi isap 5,57–5,67 K. Rekapitulasi pada Tabel 1 memperlihatkan kapasitas gabungan 23,537 kW dan COP siklus 2,852. Kapasitas ini 7,0% lebih tinggi daripada kapasitas nominal gabungan 22 kW. Kondisi ambien pengujian yang lebih rendah daripada kondisi desain 35°C mengurangi tekanan kondensasi dan membantu kapasitas volumetrik kompresor.



Gambar 3. Pemetaan kondisi operasi R134a pada diagram P-h

Tabel 1. Kinerja termodinamik kedua unit refrigerasi

Parameter	Unit 1	Unit 2	Sistem
q (kJ/kg)	154,967	154,266	–
w_c (kJ/kg)	54,114	54,282	–
Qe (kW)	11,795	11,742	23,537
$\dot{W}C$ (kW)	4,119	4,132	8,251
COP aktual	2,864	2,842	2,852
COP Carnot	5,75	5,63	5,69
Efisiensi Carnot (%)	49,82	50,48	50,15

Nilai efisiensi 50,15% terhadap batas Carnot mencerminkan rugi nyata akibat beda temperatur penukar kalor, penurunan tekanan, dan kerja mekanis. Angka tersebut adalah COP termodinamik berbasis entalpi dan laju massa acuan, bukan COP kelistrikan dari *power meter*. Karena itu, hasil ini tepat digunakan untuk membandingkan keseimbangan siklus dan kapasitas pada kondisi uji, tetapi belum menggantikan audit

energi berbasis daya listrik terukur.

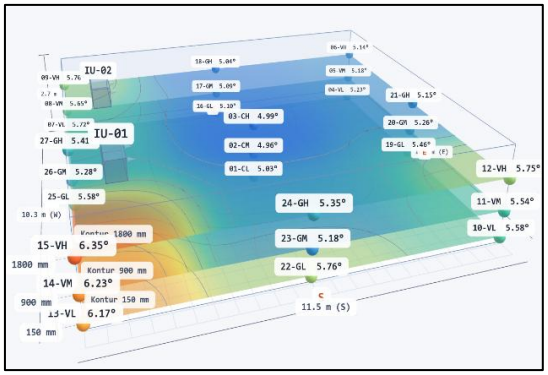
3.2 Distribusi Suhu 72 Jam

Seluruh 27 sensor tetap berada di antara 2 dan 8°C. Rata-rata spasial berkisar 4,96–6,35°C. SP15 merupakan titik terpanas berdasarkan rata-rata dan maksimum, sedangkan SP02 mempunyai rata-rata terendah. Nilai absolut terendah terjadi di SP18 sebesar 3,30°C (Tabel 2). Perbedaan antara maksimum global 7,00°C dan minimum global 3,30°C menghasilkan deviasi ekstrem 3,70 K tanpa ekskursi di luar spesifikasi.

Tabel 2. Ringkasan titik kritis pemetaan suhu 72 jam

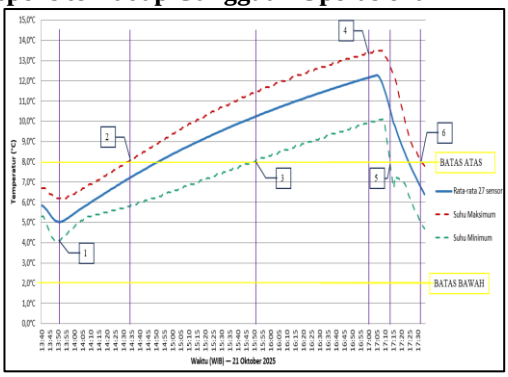
Titik	Min. (°C)	Maks. (°C)	Rerata (°C)	Interpretasi
SP02	4,10	5,70	4,96	Rerata terendah
SP15	5,70	7,00	6,35	Titik terpanas
SP18	3,30	5,80	5,04	Minimum absolut
Semua	3,30	7,00	4,96–6,35	ΔT = 3, 70 K

SP15 terletak di zona bawah sisi barat daya, paling jauh di belakang evaporator dan tidak menerima hembusan langsung. Sebaliknya, SP02 berada di bagian tengah pada elevasi menengah yang menerima aliran dari dua evaporator. Visualisasi pada Gambar 4 menegaskan gradien tersebut. SP15 dan SP02 layak dijadikan lokasi pemantauan tetap karena mewakili kondisi terpanas dan rerata terendah; SP18 perlu dipantau sebagai lokasi risiko minimum absolut.



Gambar 4. Distribusi rata-rata suhu pada model tiga dimensi FG-02.

3.3 Respons terhadap Gangguan Operasional



Gambar 5. Profil suhu minimum, maksimum, dan rata-rata selama uji pemadaman dan pemulihan.

Kedua unit dimatikan pukul 13:51 ketika suhu rata-rata 5,01°C (titik 1). Sensor pertama, SP15, melampaui 8°C pada pukul 14:34 (titik 2) sehingga *holding time* bernilai 43 menit. Pada pukul 15:51 seluruh sensor telah melebihi 8°C (titik 3). Sistem dinyalakan kembali pukul 17:00 saat seluruh sensor mencapai 12,18°C (titik 4). Suhu minimum pertama kali kembali ke dalam batas atas 8°C pada jam 17.13 (titik 5) dan seluruh sensor kembali menunjukan nilai suhu <8°C pada pukul 17:32 (titik 6), sehingga *recovery time* bernilai 32 menit (Gambar 5).

Tabel 3. Indikator uji pemadaman dan pemulihan

Indikator	ΔT (K)	Waktu (min)	Laju (°C/min)
Holding time	–	43	–
Fase pemanasan	7,28	194	0,038
Recovery time	5,48	32	0,171
Rasio pemulihan/pemanasan	–	–	4,5 kali

Laju penurunan suhu 0,171°C/menit adalah 4,5 kali laju kenaikan pasif 0,038°C/menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kapasitas aktif dapat mengatasi kalor yang masuk melalui selubung pada skenario ini. Namun, *holding time* 43 menit merupakan batas operasional kritis yang harus dijadikan acuan waktu maksimum. Prosedur darurat yang meliputi eskalasi teknis, verifikasi ganda penyebab kegagalan daya, dan pengamanan produk melalui pemindahan atau media pendingin cadangan harus dijalankan sebelum sensor kritis mencapai 8°C.

3.4 Beban Pendinginan dan Kecukupan Kapasitas

Tabel 4. Komposisi beban pendinginan aktual

Komponen	Beban (kW)	Kontribusi (%)
Produk simulasi	6,36	28,09
Udara ruang	1,31	5,78
Material struktural	11,82	52,21
Konduksi selubung	1,79	7,91
Kipas dan lampu	1,36	6,01
Total aktual	22,64	100,00
Kapasitas sistem	23,54	–
Margin kapasitas	0,90	3,8*

*Persentase terhadap kapasitas termodinamik.

Beban aktual hasil analisis transien berjumlah 22,64 kW (Tabel 4). Komponen terbesar adalah massa termal struktur 11,82 kW atau 52,21%, disusul beban tiruan 6,36 kW atau 28,09%. Beban ini 6,7% lebih tinggi daripada beban rencana 21,21 kW, tetapi masih 0,90 kW di bawah kapasitas termodinamik 23,54 kW. Utilisasi kapasitas mencapai 96,2%.

Margin positif membuktikan kecukupan pada konfigurasi,

beban, dan suhu ambien pengujian, tetapi tidak besar. Kesimpulan tidak boleh diekstrapolasi langsung ke seluruh kondisi musiman atau muatan vaksin cair. Kardus kosong dan palet mempunyai kapasitas panas berbeda dari produk cair; metode suhu pipa juga memerlukan koreksi; dan laju massa belum diukur langsung. Pengujian lanjutan sebaiknya memakai media simulasi tiruan cair dengan kapasitas termal ekuivalen serta *power meter* terkalibrasi agar COP termodinamik dapat dibandingkan dengan COP energi.

4. KESIMPULAN

Sistem dua unit pendingin dengan refrigeran R134a menghasilkan kapasitas termodinamik 23,54 kW, COP 2,85, dan efisiensi 50,15% terhadap Carnot. Pemetaan 27 sensor selama 72 jam membuktikan seluruh titik berada pada 2–8°C, dengan SP15 sebagai titik terpanas dan SP02 sebagai rerata terendah yang layak dijadikan lokasi pemantauan permanen, serta deviasi terjauh 3,70 K. Uji gangguan menghasilkan holding time 43 menit dan recovery time 32 menit, dengan batas 43 menit tersebut menjadi acuan waktu kritis bagi prosedur darurat dan pengamanan produk. Beban aktual 22,64 kW memberikan margin 0,90 kW pada utilisasi 96,2%, sehingga kapasitas dinilai mencukupi untuk kondisi uji namun menyediakan cadangan terbatas yang memerlukan pemantauan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung dan perusahaan biofarmasi tempat pengujian atas dukungan fasilitas dan akses data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. World Health Organization. *Introduction of pneumococcal vaccine PCV13: a handbook for district and health facility staff*. Geneva: WHO; 2013.
2. Matthias DM, Robertson J, Garrison MM, Newland S, Nelson C. Freez-ing temperatures in the vaccine cold chain: a systematic literature review. *Vaccine*. 2007;25(20):3980–3986. doi:10.1016/j.vaccine.2007.02.052.
3. Hanson CM, George AM, Sawadogo A, Schreiber B. Is freezing in the vaccine cold chain an ongoing issue? A literature review. *Vaccine*. 2017;35(17):2127–2133. doi:10.1016/j.vaccine.2016.09.070.
4. World Health Organization. *How to monitor temperatures in the vaccine supply chain*. WHO/IVB/15.04. Geneva: WHO; 2015.
5. Comes T, Sandvik KB, Van de Walle B. Cold chains, interrupted: the use of technology and information for decisions that keep humanitarian vaccines cool. *J Humanit Logist Supply Chain Manag*. 2018;8(1):49–69. doi:10.1108/JHLSCM-03-2017-0006.
6. Pambudi NA, Sarifudin A, Gandidi IM, Romadhon R. Vaccine cold chain management and cold storage technology to address the challenges of vaccination programs. *Energy Reports*. 2022. doi:10.1016/j.egyr.2021.12.039.
7. M. R. Rusnack, R. Sasso, and A. Beers, “Errors That Occur from Using an Inappropriate Thermal Buffer When Monitoring the Storage Conditions of Temperature Sensitive Products: Size and Material DO Matter,” Innov. Pharm., vol. 9, no. 2, p. 16, Aug. 2018, doi: 10.24926/iip.v9i2.1314.
8. World Health Organization. Qualification of temperature-controlled stor-age areas. In: *WHO Technical Report Series No. 961, Annex 9, Supple-ment 7*. Geneva: WHO; 2015.
9. World Health Organization. Temperature mapping of storage areas. In: *WHO Technical Report Series No. 961, Annex 9, Supplement 8*. Geneva: WHO; 2015.
10. Çengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: an engineering approach*. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
11. Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 8th ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2014.
12. ASHRAE. *2022 ASHRAE handbook - Refrigeration*. Atlanta: ASHRAE; 2022.
13. Gorman JM, Sparrow EM, Abraham JP. Differences between measured pipe wall surface temperatures and internal fluid temperatures. *Case Stud Therm Eng*. 2013;1(1):13–16. doi:10.1016/j.csite.2013.08.002.
14. Kucharek M, Yang L, Wang K. Assessment of insulating package perfor-mance by mathematical modelling. *Packag Technol Sci*. 2020;33(2):65–73. doi:10.1002/pts.2492.
15. Fire Safety Research Institute. High density polyethylene (HDPE). Materials database. 2026 [cited 2026 Jul 14]. Avail-able from: https: //materials. fsri. org/materialdetail/ high- density-polyethylene-hdpe.