Perancangan Gudang Beku Portabel Kapasitas 10 Ton untuk Produk Ikan Tenggiri di Karawang

Mochamad Rikki Firmansyah[1], Annisa Syafitri Kurniasetiawati[2], Ismail Wellid[3]

[1]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: mochamad.rikki@gmail.com
[2]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: annisa.syafitrik@polban.ac.id
[3]*Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail: iwd_ra@polban.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini merancang gudang beku portabel berkapasitas 10 ton untuk penyimpanan ikan tenggiri di Karawang pada temperatur −20 ± 2 °C. Rancangan terdiri atas ruang penyimpanan 4,95 × 2,90 × 2,80 m dan anteroom 3,00 × 2,90 × 2,80 m dengan panel polyisocyanurate masing-masing 100 dan 50 mm. Beban pendinginan dihitung dari transmisi, infiltrasi, produk, pekerja, lampu, kipas evaporator, dan beban listrik, kemudian dikoreksi terhadap faktor keamanan 15% dan waktu operasi. Hasil perhitungan menunjukkan kapasitas refrigerasi yang diperlukan sebesar 2,695 kW pada cold storage dan 2,324 kW pada anteroom. Komponen yang dipilih menggunakan refrigeran R404A, yaitu condensing unit Copeland ZXL025BE dan evaporator EDEN FEME 0280P.302 untuk cold storage serta Copeland ZX020BE dan EDEN FEME 0260P.301 untuk anteroom. Verifikasi berbasis data katalog menunjukkan kapasitas komponen melampaui beban desain, dengan COP estimasi masing-masing 1,37 dan 2,10. Set point cold storage juga memenuhi ketentuan penyimpanan ikan beku pada −18 °C atau lebih rendah. Nilai COP tersebut bukan hasil pengukuran; kinerja aktual perlu dikonfirmasi melalui pengujian prototipe.

Kata Kunci:
Cold storage, anteroom, beban pendinginan, portable, ikan tenggiri, COP estimasi

ABSTRACT

This study designs a 10-ton portable cold storage facility for Spanish mackerel in Karawang at −20 ± 2 °C. The design comprises a 4.95 × 2.90 × 2.80 m storage room and a 3.00 × 2.90 × 2.80 m anteroom, insulated with 100 and 50 mm polyisocyanurate panels, respectively. Cooling loads from transmission, infiltration, product, occupants, lighting, evaporator fans, and electrical equipment were calculated and adjusted for a 15% safety factor and operating time. The required refrigeration capacities are 2.695 kW for the frozen room and 2.324 kW for the anteroom. The selected R404A equipment consists of a Copeland ZXL025BE condensing unit and an EDEN FEME 0280P.302 evaporator for the frozen room, and a Copeland ZX020BE unit with an EDEN FEME 0260P.301 evaporator for the anteroom. Catalogue-based verification shows that the selected capacities exceed the design loads, with estimated COP values of 1.37 and 2.10. The cold-storage set point also satisfies the requirement to store frozen fish at −18 °C or colder. These COP values are not measured results; actual performance must be confirmed through prototype testing.

Keywords:
Portable cold storage, anteroom, cooling load, portable, Spanish mackerel, estimated COP

1. PENDAHULUAN

Rantai dingin mempertahankan mutu komoditas mudah rusak, tetapi fasilitas pendinginan juga menimbulkan konsumsi energi dan emisi yang tidak kecil. Inventaris global menunjukkan emisi rantai dingin sistem agripangan mencapai sekitar 1,32 Gt CO_2-ekuivalen pada 2022, sehingga rancangan berkapasitas tepat dan pengendalian operasi menjadi bagian penting dari keberlanjutan (1). Di sentra perikanan, kebutuhan ini diperumit oleh lokasi produksi yang tersebar, keterbatasan lahan, dan kebutuhan memindahkan fasilitas mengikuti titik pendaratan ikan.

Konsep portabel atau modular memberi fleksibilitas instalasi dan perawatan. Harfi dan Hadi merancang cold storage portabel 10 ton dengan beban 4,2 kW serta pasokan listrik hibrida 5 kW (2). Penelitian modular untuk komoditas perikanan menunjukkan bahwa distribusi aliran udara perlu dinilai bersama perhitungan beban (3), sedangkan rancangan modul 20 kaki menempatkan pemodelan geometri, perhitungan beban, pemilihan mesin, dan analisis aliran sebagai tahapan yang saling terkait (4). Perancangan cold storage 10 ton untuk tuna juga menegaskan bahwa kapasitas penyimpanan, kondisi operasi, dan pemilihan komponen harus dihitung secara terintegrasi (5).

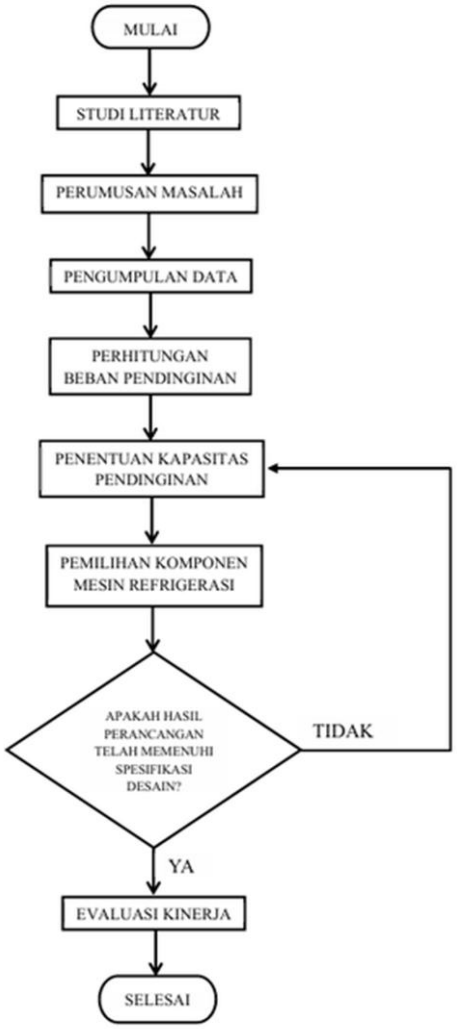
Penelitian ini difokuskan pada rancangan gudang beku portabel berkapasitas 10 ton untuk ikan tenggiri di Karawang. Kebaruan praktis rancangan terletak pada kombinasi konstruksi knockdown, anteroom untuk

membatasi infiltrasi langsung, dan pemisahan sistem refrigerasi setiap ruang. Tujuan penelitian adalah menentukan beban pendinginan, menyusun denah, memilih komponen, serta memverifikasi kecukupan kapasitas dan performa estimasi berdasarkan data katalog. Ruang lingkup penelitian tidak mencakup pembuatan prototipe maupun pengukuran kinerja aktual.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Tahapan dan Data Perancangan

Metode yang digunakan adalah perancangan teknik berbasis data kebutuhan penyimpanan, perhitungan beban, seleksi komponen dari katalog, dan verifikasi teoretis. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Iterasi dilakukan apabila kapasitas condensing unit atau evaporator lebih kecil daripada beban desain. Karena penelitian belum mencakup prototipe, seluruh indikator performa dinyatakan sebagai hasil estimasi, bukan hasil pengukuran aktual.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian dan Iterasi Pemilihan Komponen

Tabel 1. Parameter utama perancangan

Parameter	Cold storage	Anteroom
Fungsi	Ikan tenggiri beku	Ruang transisi
Dimensi	4,95 × 2,90 × 2,80 m	3,00 × 2,90 × 2,80 m
Temperatur ruang	−20 ± 2 °C	5 °C
Panel PIR	100 mm; U = 0,0225 W/m²K	50 mm; U = 0,0225 W/m²K
Waktu operasi	22 jam/hari	16 jam/hari
Temperatur lingkungan	35 °C	35 °C
Refrigeran desain	R404A	R404A

Kapasitas produk total ditetapkan 10.000 kg. Produk masuk harian diasumsikan 1.000 kg pada −15 °C dan didinginkan hingga −20 °C selama 6 jam, dengan kalor jenis di bawah titik beku 1,63 kJ/Kg.K. Nilai temperatur lingkungan 35 °C dipakai sebagai kondisi rancangan. Pendekatan komponen beban serupa digunakan pada pengembangan unit penyimpanan berpendingin, yaitu transmisi, infiltrasi, produk, penerangan, dan beban internal (6).

2.2 Perhitungan Beban Pendinginan

Koefisien perpindahan panas menyeluruh panel dihitung dari tahanan konveksi bagian dalam dan luar serta tahanan konduksi setiap lapisan. Penggunaan PIR dipilih karena konduktivitas efektif busa poliuretan sel tertutup relatif rendah dan dipengaruhi morfologi sel (7); pengembangan panel sandwich untuk cold room juga menunjukkan pentingnya karakteristik termal sekaligus mekanik kulit dan inti (8).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{f_i}+\frac{x_1}{k_1}+\frac{x_2}{k_2}+\frac{x_1}{k_1}+\frac{1}{f_0}} \quad (1)$$

Beban transmisi, infiltrasi, dan produk dihitung dengan Persamaan (2)–(4). Pada Persamaan (3), laju massa udara dan selisih entalpi mewakili udara luar yang masuk ketika pintu dibuka. Anteroom ditempatkan sebelum cold storage agar udara 35 °C tidak langsung masuk ke ruang −20 °C.

$$\dot{Q}_{\mathrm{tr}} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{inf}} = I \cdot \Delta h \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{p}} = \frac{m \cdot CP \cdot \Delta T}{n \cdot 3600} \quad (4)$$

Beban internal mencakup pekerja, lampu, kipas evaporator, dan peralatan listrik. Semua komponen dijumlahkan dengan Persamaan (5), kemudian dikoreksi terhadap waktu operasi dan faktor keamanan 15% menggunakan Persamaan (6).

$$\dot{Q}_{\mathrm{tot}} = \dot{Q}_{\mathrm{tr}} + \dot{Q}_{\mathrm{inf}} + \dot{Q}_{\mathrm{p}} + \dot{Q}_{\mathrm{internal}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{Q}_{\mathrm{tot}} \left(\frac{24}{t_{\mathrm{operation}}}\right)(1 + SF) \quad (6)$$

2.3 Pemilihan Komponen dan Evaluasi

Condensing unit dan evaporator dipilih dari data performa pabrikan pada temperatur evaporasi −27 °C untuk cold storage dan −5 °C untuk anteroom, dengan temperatur kondensasi 45 °C. Kapasitas setiap komponen harus lebih

besar daripada kapasitas desain pada Persamaan (6). Pipa cair dan isap ditentukan dari rentang kapasitas serta batas rugi tekanan. COP estimasi, COP Carnot, dan efisiensi relatif dihitung dengan Persamaan (7)–(9); temperatur pada Persamaan (8) dinyatakan dalam kelvin.

Verifikasi dilakukan melalui empat tahap: (1) membandingkan kapasitas katalog condensing unit dan evaporator dengan beban desain; (2) menghitung margin kapasitas; (3) menghitung COP estimasi dari perbandingan kapasitas refrigerasi katalog terhadap daya masukan pada kondisi rancangan yang sama; dan (4) membandingkan set point ruang dengan ketentuan temperatur penyimpanan ikan beku. Kinerja aktual hanya dapat ditentukan melalui pengukuran kapasitas pendinginan dan daya listrik pada prototipe dalam kondisi tunak.

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{aktual}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{P}_e} \tag{7}$$

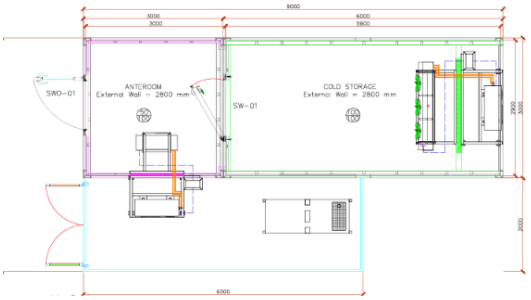
$$\mathrm{COP}_{\mathrm{Carnot}} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \tag{8}$$

$$\eta_{\mathrm{refrigerasi}} = \frac{\mathrm{COP}_{\mathrm{aktual}}}{\mathrm{COP}_{\mathrm{Carnot}}} \times 100\% \tag{9}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

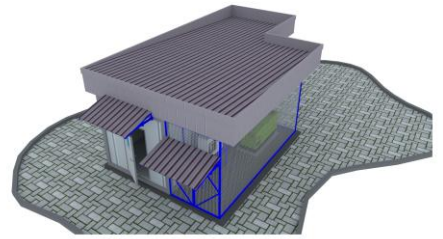
3.1 Denah dan Konstruksi Portabel

Denah termal pada Gambar 2 memisahkan anteroom sepanjang 3,00 m dan cold storage sepanjang 4,95 m, dengan lebar sama 2,90 m. Panjang efektif kedua ruang adalah 7,95 m. Akses satu arah melalui anteroom mengurangi perubahan temperatur mendadak dan memberi ruang penanganan produk sebelum memasuki ruang beku. Posisi evaporator diarahkan agar jalur suplai dan balik udara tidak terhalang tumpukan. Hal ini penting karena orientasi dan jarak antartumpukan dapat mengubah kecepatan udara, laju pendinginan, dan heterogenitas temperatur (9).

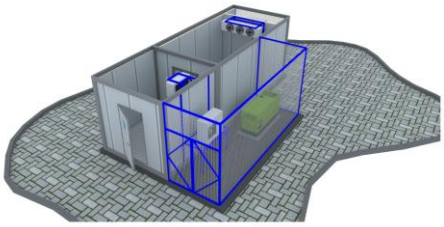


Gambar 2. Denah Gudang Beku Portabel

Konstruksi menggunakan rangka modular dan panel PIR yang dapat dibongkar-pasang. Visual tiga dimensi pada Gambar 3 memperlihatkan selubung luar, area berpagar untuk unit kondensasi, serta penempatan evaporator pada tiap ruang. Detail sambungan panel perlu diberi gasket dan vapor barrier kontinu untuk mencegah infiltrasi uap air dan pembentukan es pada sambungan.



(a)



(b)

Gambar 3. Visual Rancangan: (a) Tampak Luar dan (b) Susunan Ruang serta Evaporator.

3.2 Hasil Beban Pendinginan

Tabel 2. Rekapitulasi beban pendinginan.

Komponen	Cold storage (kW)	Anteroom (kW)
Transmisi	0,813	0,535
Infiltrasi	0,290	0,420
Produk	0,377	—
Pekerja	0,136	0,136
Penerangan	0,012	0,006
Kipas evaporator	0,229	0,250
Beban listrik lain	0,291	—
Jumlah awal	2,148	1,347
Kapasitas desain +15%	2,47	1,55
Koreksi waktu operasi	2,69	2,33

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan transmisi sebagai komponen terbesar cold storage, sedangkan transmisi dan infiltrasi mendominasi anteroom. Beban produk 0,377 kW relatif kecil karena produk masuk sudah beku pada −15 °C. Setelah koreksi waktu operasi dan faktor keamanan, kebutuhan akhirnya adalah:

$$\dot{Q}_{R,\mathrm{CS}} = 2{,}148 \left(\frac{24}{22}\right)(1{,}15) = 2{,}69 \text{ kW} \tag{10}$$

$$\dot{Q}_{R,\mathrm{AR}} = 1{,}347 \left(\frac{24}{16}\right)(1{,}15) = 2{,}33 \text{ kW} \tag{11}$$

Rasio infiltrasi terhadap jumlah awal adalah sekitar 13,5% pada cold storage dan 31,2% pada anteroom. Nilai ini memperlihatkan bahwa ruang transisi memindahkan sebagian besar gangguan pintu dari ruang −20 °C ke zona 5 °C. Walaupun demikian, efektivitasnya tetap bergantung pada disiplin operasi pintu dan kerapatan seal.

3.3 Pemilihan Komponen dan Kinerja

Tabel 3. Komponen terpilih dan indikator kinerja.

Parameter	Cold storage	Anteroom
Condensing unit	Copeland ZXL025BE	Copeland ZX020BE
Kapasitas CU	2,95 kW	4,17 kW
Daya masukan CU	2,16 kW	1,99 kW
Evaporator	EDEN FEME 0280P.302	EDEN FEME 0260P.301
Kapasitas evaporator	2,86 kW	2,60 kW
TXV	Danfoss T2; orifis 4	Danfoss T2; orifis 1
Solenoid valve	Danfoss EVR 3 v2	Danfoss EVR 3 v2
Pipa cair / isap	3/8 in / 7/8 in	3/8 in / 7/8 in
COP aktual	1,37	2,10
COP Carnot	3,42	5,36
Efisiensi relatif	40,1%	39,2%

Kapasitas condensing unit cold storage 2,95 kW memberikan margin 9,5% terhadap beban desain, sedangkan evaporator 2,86 kW memberikan margin 6,1%. Dengan demikian, kedua komponen memenuhi kriteria kapasitas lebih besar daripada beban desain, meskipun margin evaporator relatif terbatas sehingga kebersihan penukar kalor dan kondisi operasi perlu dijaga. Pada anteroom, evaporator memberikan margin 11,9%, sedangkan condensing unit 4,17 kW mempunyai margin 79,4%. Margin condensing unit yang besar berpotensi meningkatkan frekuensi hidup-mati kompresor, sehingga setelan termostat dan diferensial harus diatur untuk mencegah short cycling.

COP estimasi diperoleh dari kapasitas refrigerasi dan daya masukan pada data katalog, bukan dari pengukuran sistem. Hasilnya adalah 1,37 untuk cold storage dan 2,10 untuk anteroom, sedangkan COP Carnot masing-masing 3,42 dan 5,36. Efisiensi relatif sekitar 40% menunjukkan selisih yang wajar antara siklus nyata yang diperkirakan dan batas ideal, tetapi belum dapat digunakan untuk menyatakan efisiensi aktual instalasi. COP cold storage lebih rendah karena rentang temperatur evaporasi-kondensasi lebih besar. Set point, defrost, kipas, dan temperatur kondensasi juga memengaruhi konsumsi energi cold store (10), sedangkan strategi kontrol terpadu dilaporkan dapat menaikkan COP dan menurunkan emisi operasi (11). Karena itu, hasil perancangan tidak hanya ditentukan oleh kapasitas komponen, tetapi juga urutan kontrol kompresor, katup solenoid, kipas, dan defrost.

3.4 Implikasi Lingkungan dan Keterbatasan

R404A dipilih karena kecocokan katalog komponen dan praktik sistem komersial, namun refrigeran ini memiliki GWP tinggi. Kajian alternatif menunjukkan bahwa R448A, R449A, dan R452A dapat memberikan kinerja yang layak sebagai pengganti R404A dengan dampak iklim lebih rendah (12). Pada pengembangan berikutnya, substitusi refrigeran harus dinilai bersama perubahan kapasitas, superheat, tekanan kerja, kompatibilitas pelumas, keselamatan, dan ketersediaan servis.

Pilihan peningkatan mencakup material phase change untuk meredam fluktuasi beban (13), integrasi fotovoltaik pada cold room ikan (14), atau sistem CO_2 yang dipadukan dengan energi terbarukan (15). Rancangan saat ini masih berupa analisis teoretis berbasis data katalog. Belum dilakukan pengujian pull-down, pemetaan temperatur produk, pengukuran kapasitas pendinginan dan daya listrik, uji kebocoran, maupun analisis biaya siklus hidup. Validasi prototipe perlu dilakukan pada beban parsial dan penuh dengan pencatatan temperatur ruang serta produk, tekanan isap dan buang, laju aliran refrigeran atau udara, dan daya listrik secara serempak hingga kondisi tunak. Hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan untuk menghitung COP aktual dan membandingkannya dengan nilai estimasi.

4. KESIMPULAN

Gudang beku portabel 10 ton dirancang dengan cold storage 4,95 × 2,90 × 2,80 m pada −20 ± 2 °C dan anteroom 3,00 × 2,90 × 2,80 m pada 5 °C. Kapasitas refrigerasi desain setelah koreksi waktu operasi dan faktor keamanan 15% adalah 2,695 kW dan 2,324 kW. Pasangan Copeland ZXL025BE–EDEN FEME 0280P.302 untuk cold storage serta Copeland ZX020BE–EDEN FEME 0260P.301 untuk anteroom memenuhi beban secara teoretis. COP estimasi berbasis data katalog masing-masing 1,37 dan 2,10, dengan efisiensi relatif sekitar 40%; nilai ini bukan hasil pengukuran aktual. Set point cold storage telah memenuhi ketentuan penyimpanan ikan beku pada −18 °C atau lebih rendah. Margin condensing unit anteroom yang besar, penggunaan R404A, dan belum adanya pengujian prototipe menjadi keterbatasan utama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, atas dukungan akademik dan fasilitas perancangan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1 Flammini A, Adzmir H, Pattison R, Karl K, Allouche Y, Tubiello FN. Greenhouse Gas Emissions from Cold Chains in Agrifood Systems. Sustainability. 2024;16(21):9184.

2 Harfi R, Hadi BN. Perancangan Cold Storage Portabel Kapasitas 10 Ton Menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Jurnal Presisi. 2021;23(2):60–72.

3 Budiyanto MA, Imamudien O, Lubis A, Alhamid MI, Shinoda T. Air Flow Distribution and Cooling Performance on Modular Cold Storage for Fishery Commodity. Energy Reports. 2023;9:162–71.

4 Arif Budiyanto M, Imamudien O, Idrus Alhamid M, Shinoda T. Design and analysis of a 20-feet modular cold storage system. Thermal Science and Engineering Progress. 2024;50:102587.

5 Syafar Pramudya D, Pamitran AS, Ardiyansyah A, Budiyanto MA. Design and calculation of cold storage capacity of 10 tons for tuna commodity. Maritime Technology and Research. 2023;6(2):268270.

6 Hossain A, Akhtaruzzaman M, Mondal MHT, Islam MR,

Roy J, Hasan SMK, et al. Development and performance evaluation of a refrigerated storage structure for preserving fresh fruits and vegetables. Discover Food. 2024;4(1):76.

7 Soloveva O V, Solovev SA, Vankov Y V, Shakurova RZ. Experimental Studies of the Effective Thermal Conductivity of Polyurethane Foams with Different Morphologies. Processes. 2022;10(11):2257.

8 Sartori AP, Ornaghi Junior HL, Guerra NB, Wander PR, Giovanela M, Reis Nunes RC, et al. Development and characterization of sandwich panels for thermal insulation in a cold storage chamber. Journal of Cellular Plastics. 2023;59(3):215–30.

9 Alexander LD, Jakhar S, Dasgupta MS. Optimizing cold storage for uniform airflow and temperature distribution in apple preservation using CFD simulation. Scientific Reports. 2024;14(1):25402.

10 Karacan MA, Yilmaz IC, Yilmaz D. Key Implications on Food Storage in Cold Chain by Energy Management Perspectives. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2023;7:1250646.

11 Zhu Z, Liu X, Zhao S, Shan X, Chen A, Yu J, et al. Energy saving and carbon emission reduction potential for cold store with new dynamic linkage control strategy. International Journal of Refrigeration. 2023;154:43–55.

12 Altinkaynak M. Exergetic performance analysis of low GWP alternative refrigerants for R404A in a refrigeration system. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2021;16(3):842–50.

13 Ilangovan A, Hamdane S, Silva PD, Gaspar PD, Pires L. Promising and Potential Applications of Phase Change Materials in the Cold Chain: A Systematic Review. Energies. 2022;15(20):7683.

14 Rami Y, Allouhi A. Design, Economic, and Environmental Accounting Assessment of a Solar-Powered Cold Room for Fish Storage in Traditional Markets. Sustainability. 2024;16(7):3080.

15 Garcia J, Semedo A. Sustainable CO2 Refrigeration System for Fish Cold Storage Facility Using a Renewable Integrated System with Solar, Wind and Tidal Energy for Cape Verde—Analyzing Scenarios. Sustainability. 2024;16(10):4259.