SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KINERJA PENDINGINAN DAN KONSUMSI ENERGI KOTAK PENDINGIN BERBASIS FOTOVOLTAIK

Richard A.M Napitupulu[a], Wilson Sabastian Nababan[a]*, Siwan E.A Peranginangin[a], Charles SP Manurung[a], Brian Nata Milala[a]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Universitas HKBP Nommensen, Jl. Sutomo No. 4A, Medan, Sumatera Utara 20234, Indonesia*

**Penulis korespondensi: wilson.nababan@uhn.ac.id; wilson.nababan40@gmail.com, (W.S. Nababan), Tel.: +62 812-6040-4903*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 23 Juli 2026
Direvisi pada 21 September 2026
Disetujui pada 15 Oktober 2026
Tersedia daring pada 18 November 2026

Kata kunci:
Kotak pendingin; ikan kembung; panel surya; refrigerasi; kinerja termal.

Keywords:
Cooling box; mackerel; photovoltaic power; refrigeration; thermal performance.

ABSTRAK

Keterbatasan fasilitas rantai dingin di wilayah pesisir mendorong pengembangan kotak pendingin yang dapat beroperasi dengan energi fotovoltaik. Penelitian ini mengevaluasi respons temperatur dan kebutuhan daya kotak pendingin kompresi uap dengan beban ikan kembung 5 kg. Purwarupa menggunakan panel surya 250 Wp, pengendali pengisian, baterai, serta kompresor DC WOMA ZH35G dengan refrigeran R134a. Lima pengujian dilakukan dengan pencatatan temperatur, radiasi matahari, kelembapan, dan daya listrik setiap satu menit. Pada pengujian yang diawali dari kondisi hangat, temperatur titik T8 di bagian bawah beban ikan turun dari nilai maksimum 30,4 °C menjadi 12,7 °C selama 52 menit, dengan laju pendinginan rata-rata 0,34 °C/menit. Pada pengujian lain dengan kondisi awal lebih rendah, temperatur T8 mencapai 4,2–4,3 °C. Daya operasi tercatat pada rentang 79–133 W, sedangkan korelasi gabungan antara radiasi sesaat dan daya listrik tergolong lemah (r = 0,11). Hasil menunjukkan bahwa purwarupa mampu memberikan pendinginan sementara, tetapi belum membuktikan pencapaian temperatur inti ikan 0–4 °C maupun perpanjangan umur simpan. Pengukuran temperatur inti produk, pengujian berulang dengan kondisi awal seragam, dan evaluasi mutu ikan diperlukan sebelum alat direkomendasikan untuk penyimpanan jangka panjang.

ABSTRACT

Limited cold-chain infrastructure in coastal areas motivates the development of photovoltaic-powered cooling boxes. This study evaluates the temperature response and electrical power demand of a vapor-compression cooling box loaded with 5 kg *of mackerel. The prototype incorporates a* 250 WP *photovoltaic panel, charge controller, battery, and a WOMA ZH35G DC compressor using* R134a *refrigerant. Five experimental runs were conducted, recording temperature, solar irradiance, relative humidity, and electrical power at one-minute intervals. During the run starting from relatively warm conditions, the T8 sensor located at the bottom of the fish load decreased from a peak of* 30.4 °C *to* 12.7 °C *over* 52 min*, corresponding to an average cooling rate of* 0.34 °C/min*. Other runs beginning at lower temperatures reached T8 values of* 4.2–4.3 °C*. Operating power ranged from* 79 *to* 133 W*, while the pooled correlation between instantaneous irradiance and power was weak* (r = 0.11)*. The results demonstrate the feasibility of short-term cooling, but do not establish that the fish core reached* 0–4 °C *or that product shelf life was extended. Controlled repeat testing, direct fish-core temperature measurements, and quality assessments are required before recommending the device for prolonged storage.*

1. PENGANTAR

Ikan merupakan bahan pangan yang cepat mengalami penurunan mutu setelah ditangkap akibat aktivitas enzim, oksidasi, dan pertumbuhan mikroorganisme. Oleh karena itu, pengendalian temperatur menjadi bagian penting dalam penanganan pascapanen. Bagi nelayan dan usaha kuliner pesisir berskala kecil, kebutuhan ini sering terkendala sumber listrik yang tidak stabil, biaya operasi pendinginan, serta keterbatasan fasilitas rantai dingin.

Sistem refrigerasi bertenaga fotovoltaik dapat menjadi pilihan bagi lokasi yang belum memiliki sumber listrik memadai. Setiawan dkk. (2021) menekankan pentingnya kesesuaian antara kapasitas panel, penyimpanan energi, dan beban pendinginan. Rami & Allouhi. (2024) juga menunjukkan bahwa kinerja ruang dingin ikan berbasis surya perlu dinilai dari aspek energi dan keekonomian. Dari sisi perpindahan panas, Budiyanto dkk. (2023) memperlihatkan bahwa distribusi aliran udara berpengaruh terhadap waktu pendinginan dan keseragaman temperatur produk.

Sejumlah pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi fluktuasi sumber energi surya. Hu dkk. (2021) mengkaji penyimpanan energi dingin berbasis es pada sistem kompresi uap fotovoltaik. Fenton dkk. (2024) mengintegrasikan material perubahan

fasa pada refrigerasi termoelektrik, sedangkan Chopra dkk. (2023) menerapkan reservoir termal dan pengendalian untuk penyimpanan produk pada lokasi tanpa jaringan listrik. Kajian Eltawil dkk. (2023) dan Kumar dkk. (2025) menunjukkan peluang pengembangan pengendalian sistem serta penyimpanan energi dingin untuk memperbaiki pemanfaatan energi.

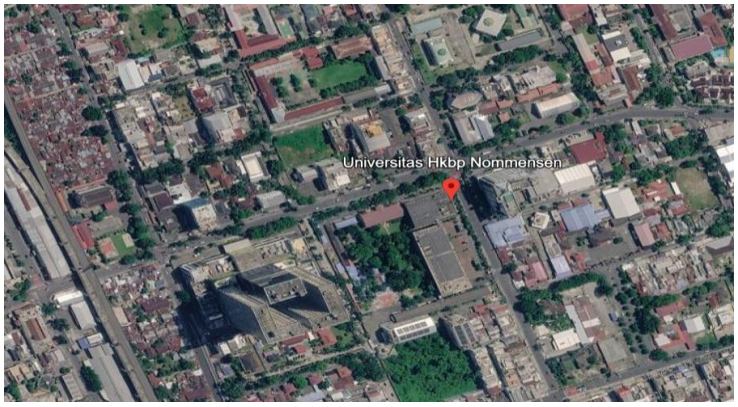
Namun, sebagian penelitian terdahulu berfokus pada ruang dingin berkapasitas besar, analisis konsumsi energi jangka panjang, atau komoditas selain ikan. Pada skala kotak pendingin portabel, evaluasi respons transien dengan beban ikan aktual masih relevan, terutama ketika daya listrik, radiasi matahari, kelembapan, dan temperatur diamati secara bersamaan. Penilaian kinerja perlu membedakan fase penurunan temperatur dari kondisi hangat dengan kondisi ruang yang telah lebih dahulu dingin agar perbandingan antar pengujian tidak menyesatkan.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi lima pengujian kotak pendingin fotovoltaik dengan beban ikan kembung 5 kg. Kontribusi utamanya berupa pembacaan terpadu terhadap respons temperatur pada titik pengukuran, perubahan radiasi matahari, kebutuhan daya listrik, dan kelembapan selama pengoperasian. Penelitian bertujuan menilai kemampuan penurunan temperatur, karakteristik kebutuhan daya, serta kendala perpindahan panas yang perlu diperbaiki untuk aplikasi pendinginan sementara. Karena temperatur inti ikan dan mutu produk tidak diuji, klaim penelitian dibatasi pada indikator termal yang terukur.

2. METODE

2.1 Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Metalurgi Universitas HKBP Nommensen Medan (3°35′ LU, 98°40′ BT) dengan sudut kemiringan panel 3° dan suhu lingkungan 28–32°C, pada 30 Juli 2026 dan 5 Agustus 2025 pada Gambar 1. Sistem yang diuji merupakan *cooling box* hasil modifikasi dengan siklus kompresi uap. Sumber energi berasal dari panel surya yang dihubungkan ke *solar charge controller* dan penyimpan listrik, kemudian memasok kompresor DC 12 V. Sirkuit refrigerasi terdiri atas kompresor, kondensor, pipa kapiler, dan evaporator.



Gambar 1: Lokasi tempat penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat Pengujian

Ada beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini untuk mendukung proses pengujian kinerja *cooling box.* Alat-alat tersebut berfungsi sebagai perangkat utama maupun pendukung dalam pengambilan data, sehingga hasil yang diperoleh dapat lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan. Alat yang berfungsi sebagai perangkat utama meliputi *data longger temperatur* Shenhwa MT500P *,solar charge controller* Tipe: PWM, 24V,10-20A*, pressure gauge* R314a Elitech DMG-2SE, tang meter Tekiro dan *pyranometer* Veinasa-ZFS, 0~2000W/m^2. Untuk alat pendukungnya meliputi panel surya monokristal SOLANA (250Wp, 24V) , *cooling box* dengan dimensi 500 mm x 350 mm x 320 mm, baterai GS Premium 24 V/60 Ah, kompresor DC 12 Volt merk WOMA ZH35G, evaporator, kondensor, dan pipa kapiler.

2.2.2 Bahan Pengujian

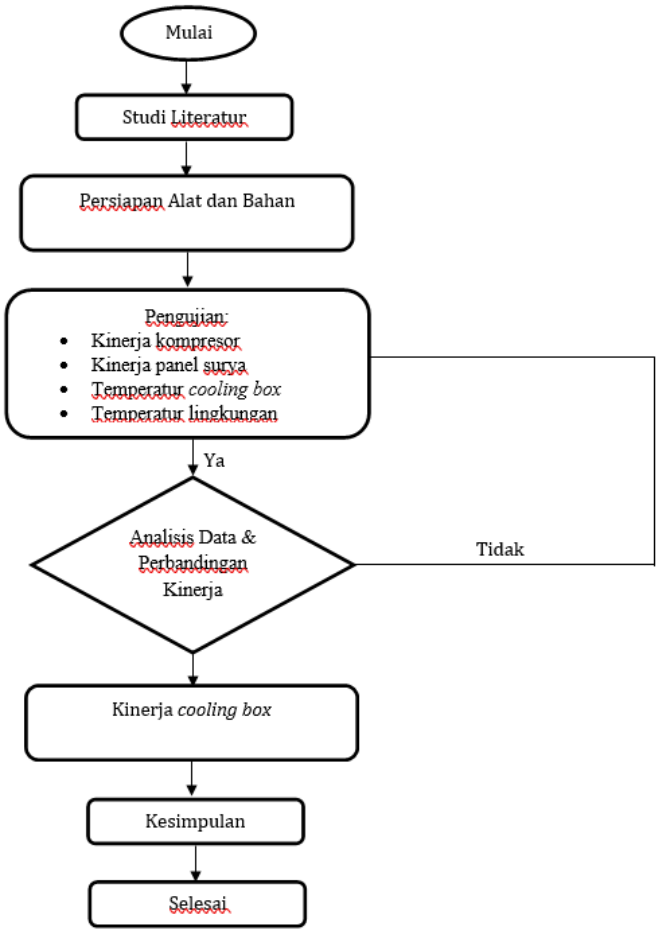
Bahan yang digunakan selama proses penelitian ini yaitu ikan kembung. Di bawah ini objek uji berupa ikan kembung dengan massa total 5 kg yang disusun di dalam ruang pendingin. Konfigurasi prototipe yang diuji ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Peralatan *cooling box* bertenaga surya yang diuji

2.3 Flowchart

Tahapan penelitian meliputi studi pustaka, persiapan purwarupa, pemeriksaan instrumentasi, pelaksanaan pengujian, pencatatan data, dan analisis kinerja. Diagram alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 3. Pengamatan difokuskan pada perubahan temperatur pada beberapa titik, radiasi matahari, kelembapan relatif, serta parameter kelistrikan selama operasi sistem.



Gambar 3: Diagram alir penelitian

2.4 Instrumentasi dan variabel

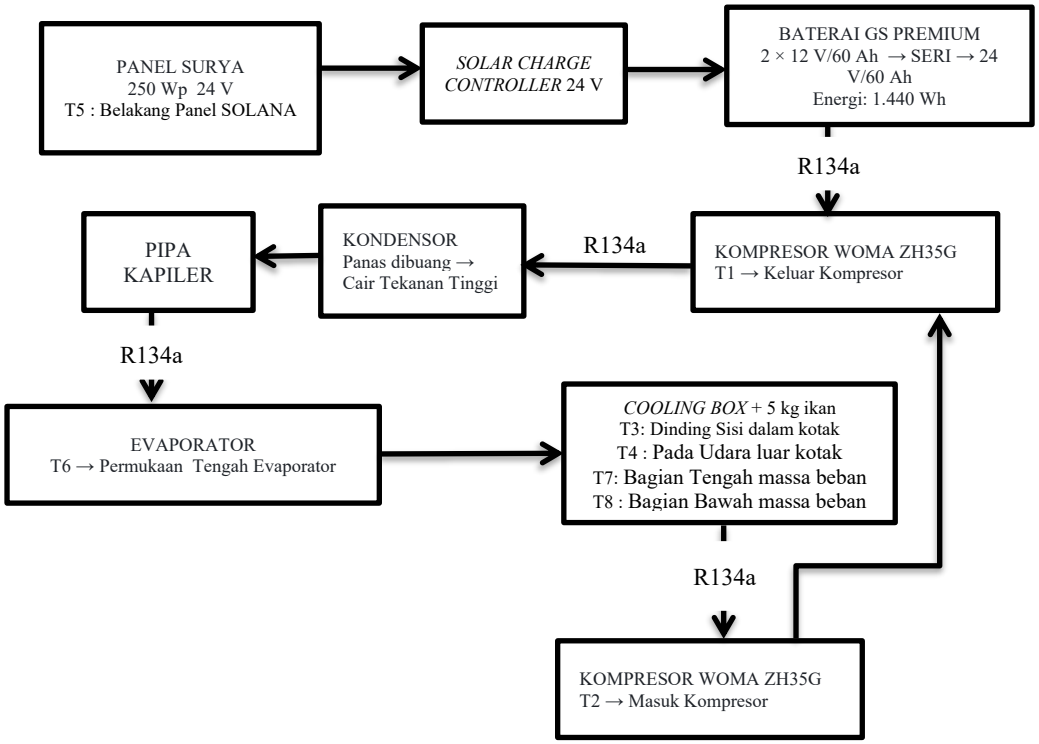
Temperatur direkam dengan pencatat data multikanal, radiasi matahari diukur menggunakan piranometer, dan arus dipantau menggunakan tang ampere. Delapan titik pengukuran (T1–T8) digunakan untuk mewakili kondisi refrigeran, lingkungan, dinding kotak, permukaan evaporator, serta posisi tertentu pada beban ikan (Tabel 1). Sensor T8 terletak pada bagian bawah massa ikan dan digunakan sebagai indikator respons temperatur pada titik tersebut, bukan sebagai bukti bahwa seluruh inti ikan memiliki temperatur yang sama.

Tabel 1: Parameter dan Posisi Pengukuran

Kode	Posisi Pengukuran	Tujuan	Tipe	Akurasi / Galat Maks
T1	Keluar kompresor	Temperatur gas panas tekanan tinggi	Termokopel K	±0,5 °C
T2	Masuk kompresor	Temperatur gas dingin tekanan rendah	Termokopel K	±0,5 °C
T3	Dinding sisi dalam kotak	Efektivitas isolasi termal	Termokopel K	±0,5 °C
T4	Pada Udara luar kotak ± 1 m	Temperatur lingkungan ambien	Sensor digital	±0,3 °C
T5	Belakang panel SOLANA	Temperatur operasi panel	Termokopel K	±0,5 °C
T6	Permukaan tengah evaporator	Temperatur penyerap panas utama	Termokopel K	±0,5 °C
T7	Bagian Tengah massa beban	Temperatur bagian dalam bahan uji	Termokopel K	±0,5 °C
T8	Bagian Bawah massa beban	Temperatur lapisan bawah bahan uji	Termokopel K	±0,5 °C

2.5 Prosedur Pengujian

Ikan kembung dengan massa total 5 kg dimasukkan ke dalam kotak pendingin sebelum sistem dijalankan. Pengamatan meliputi temperatur, kelembapan relatif, arus, tegangan, daya listrik, dan radiasi matahari, dengan interval pencatatan satu menit. Susunan komponen dan dokumentasi instalasi ditampilkan pada Gambar 4.



(a)



(b)

Gambar 4: (a) Skema sistem fotovoltaik, baterai, dan refrigerasi; (b) instalasi sistem dan instrumen pengujian

2.6 Pengolahan dan analisis data

Data hasil pengukuran divalidasi silang dengan seri data yang tersimpan pada grafik dokumen penelitian; apabila terjadi ketidaksesuaian, nilai tabel mentah digunakan sebagai acuan. Karena kondisi awal antar-pengujian tidak seragam, analisis dilakukan per pengujian dan interpretasi dibedakan antara ruang yang telah pradingin dan fase *pull-down* dari kondisi hangat. Laju pendinginan rata-rata dihitung dari perubahan temperatur internal terhadap selang waktu efektif menggunakan Persamaan (1), mengikuti pendekatan evaluasi respons termal pada sistem pendingin eksperimental (Fenton dkk., 2024).

$$\bar{v}_c = (T_max - T_end)/\Delta t \quad (1)$$

Pada Persamaan 1, laju pendinginan rata-rata dinyatakan dalam °C/menit, temperatur awal dan akhir diambil dari rentang pengamatan yang didefinisikan, dan Δt adalah durasinya. Energi listrik selama pengujian diperkirakan melalui penjumlahan daya yang direkam pada setiap interval satu menit menggunakan Persamaan (2). Keabsahan estimasi ini bergantung pada titik ukur daya, metode pengukuran, dan kelengkapan rekaman waktu.

$$E = \Sigma(P_i \times \Delta t)/60 \quad (2)$$

Pada Persamaan 2, E adalah energi listrik (Wh), P_i merupakan daya (W) pada pengamatan ke-i, dan Δt adalah interval satu menit yang dikonversi menjadi jam. Hubungan antara radiasi surya (G), daya (P), dan temperatur T8 dievaluasi menggunakan korelasi Pearson sebagai analisis deskriptif. Korelasi tidak ditafsirkan sebagai hubungan sebab-akibat karena sampel bersifat deret waktu, kondisi awal berbeda, dan status baterai tidak dikendalikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Ringkasan kinerja lima Pengujian

Ringkasan hasil pada Tabel 2 memperlihatkan perbedaan kondisi awal yang nyata. Pengujian 1–3 dimulai ketika ruang *cooling box* telah berada pada temperatur rendah, pengujian 4 merepresentasikan fase *pull-down* paling jelas dari kondisi hangat, sedangkan pengujian 5 dimulai pada kondisi menengah dan mencapai temperatur akhir terendah kedua. Karena itu, temperatur minimum tidak dapat dibandingkan secara langsung tanpa mempertimbangkan kondisi awal dan durasi operasi. Profil T8 seluruh pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 2: Ringkasan hasil pengujian *cooling box*

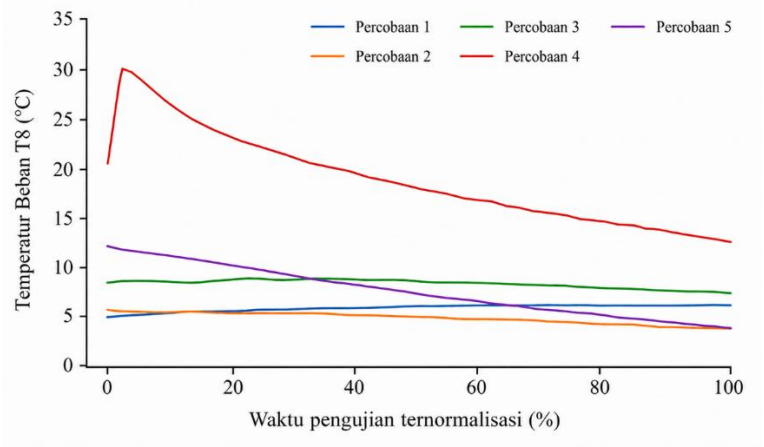
Percobaan	T6 awal (°C)	T6 akhir (°C)	T6 minimum (°C)	T8 awal (°C)	T8 maksimum (°C)	T8 akhir (°C)	T8 minimum (°C)	Penurunan bersih T8[1] (°C)
1	−3,8	−4,7	−5,3	5,4	6,4	6,4	5,4	−1,0
2	−1,2	−8,6	−8,8	5,8	5,8	4,2	4,2	1,6
3	10,9	−6,8	−6,8	8,6	8,9	7,5	7,5	1,1
4	8,3	−8,0	−8,0	21,5	30,4	12,7	12,7	8,8
5	−1,6	−11,6	−11,7	12,2	12,2	4,3	4,3	7,9

Pada percobaan pertama, T8 meningkat sebesar 1,0 °C meskipun T6 tetap berada di bawah 0 °C. Percobaan kedua menghasilkan T8 akhir terendah, yaitu 4,2 °C, sedangkan percobaan ketiga mencapai 7,5 °C. Pada percobaan keempat, T8 turun dari maksimum 30,4 menjadi 12,7 °C, sementara percobaan kelima turun dari 12,2 menjadi 4,3 °C. Perbandingan kinerja perlu mempertimbangkan temperatur awal, durasi pengujian, dan konsumsi energi karena kondisi setiap percobaan berbeda.

Tabel 3: Ringkasan hasil temperatur lingkungan pada lima kali percobaan

Percobaan	T4 awal (°C)	T4 akhir (°C)	Perubahan awal–akhir (°C)
1	32,5	33,4	+0,9
2	32,6	35,9	+3,3
3	34,7	35,0	+0,3
4	30,8	32,6	+1,8
5	32,1	33,9	+1,8

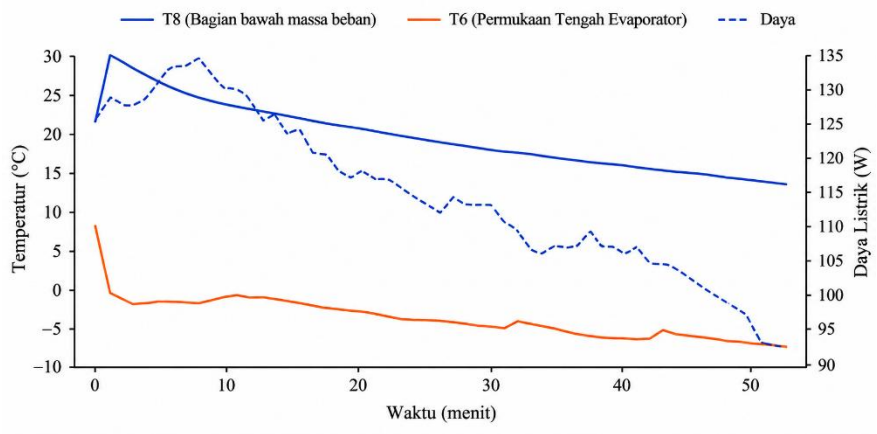
Ringkasan hasil pada Tabel 3 memperlihatkan perbedaan kondisi temperatur lingkungan T4 berfluktuasi selama pengujian dan pada seluruh percobaan menunjukkan nilai akhir lebih tinggi daripada nilai awal. Kenaikan bersih terbesar terjadi pada percobaan kedua, yaitu 3,3 °C, sedangkan terkecil pada percobaan ketiga, yaitu 0,3 °C. Perbedaan kondisi lingkungan ini perlu dipertimbangkan saat membandingkan kinerja pendinginan antarpercobaan.



Gambar 5: Perubahan temperatur beban T8 pada lima percobaan

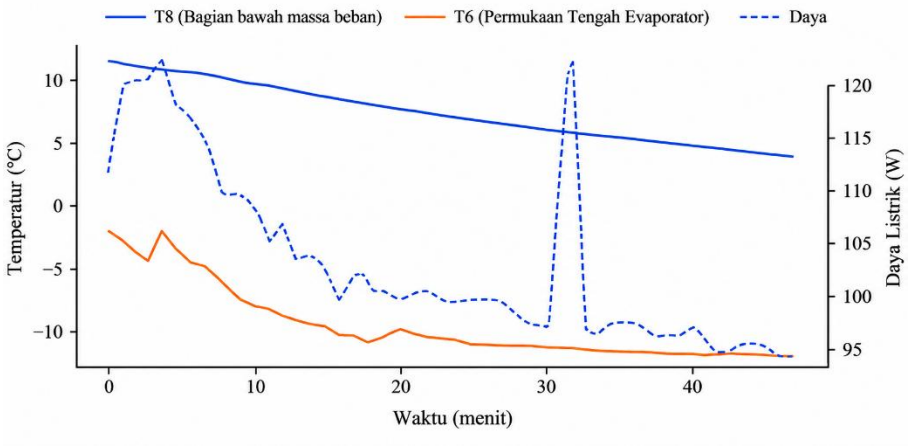
3.2 Respons pull-down dan kestabilan temperatur

Percobaan 4 memberikan gambaran proses pendinginan dari kondisi mendekati lingkungan. Setelah lonjakan awal hingga 30,4 °C, temperatur T8 turun menjadi 12,7 °C dalam 52 menit. Penurunan 17,7 °C menghasilkan laju *pull-down* rata-rata 0,34 °C/menit. Pada saat yang sama, T6 turun hingga −8,0 °C. Perbedaan temperatur yang besar antara T6 dan T8 menunjukkan bahwa evaporator mampu membentuk daerah bersuhu rendah, tetapi perpindahan panas dari ruang dan produk menuju evaporator masih membatasi penurunan temperatur internal. Kurva T8, T6, dan daya pada pengujian ini disajikan pada Gambar 6. Temuan ini sejalan dengan Budiyanto dkk., (2023), yang menekankan bahwa distribusi udara menentukan kecepatan dan keseragaman pendinginan komoditas ikan.



Gambar 6: Temperatur dan daya pada percobaan *pull-down* ke-4

Pada percobaan 5, T8 turun dari 12,2 °C menjadi 4,3 °C selama 47 menit dengan laju rata-rata 0,17 °C/menit, sedangkan T6 mencapai −11,7 °C, profilnya ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil ini menunjukkan bahwa temperatur udara ruang dapat mendekati batas atas rantai dingin apabila kondisi awal telah lebih rendah. Namun, temperatur udara tidak identik dengan temperatur inti ikan. Tanpa sensor yang ditempatkan pada bagian terdalam produk dan tanpa uji mutu, hasil tersebut belum cukup untuk menyatakan seluruh massa ikan telah mencapai 0–4 °C. Pramudya dkk., (2024) dan Budiyanto dkk., (2024) menunjukkan bahwa penentuan kapasitas *cold storage* perlu memperhitungkan beban produk, infiltrasi, transmisi dinding, serta waktu pendinginan aktual.

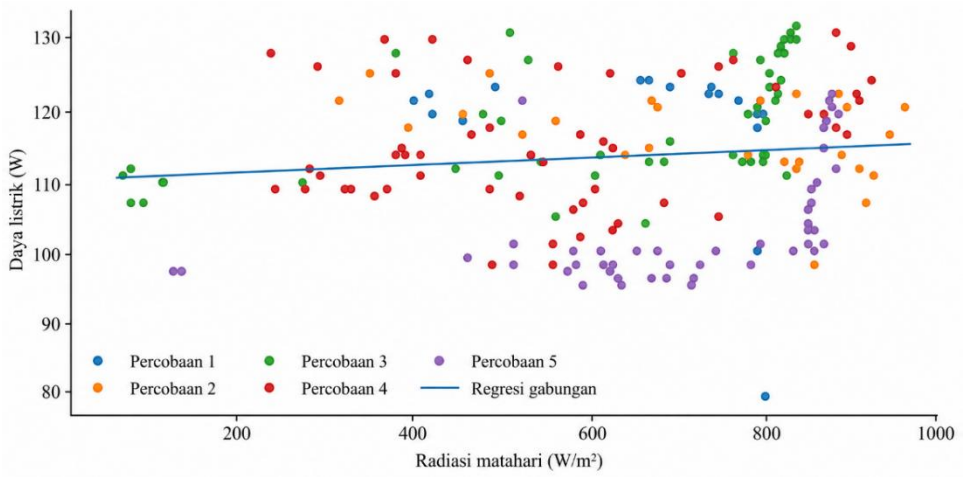


Gambar 7: Temperatur dan daya pada percobaan ke-5

Percobaan 1 memperlihatkan T8 yang relatif stabil pada 5,4–6,4 °C, sementara T6 berada di sekitar −4 °C setelah fase awal. Profil ini lebih tepat ditafsirkan sebagai kondisi ruang yang telah pradingin daripada proses *pull-down* dari temperatur lingkungan. Percobaan 2 dan 3 juga dimulai pada 5,8 dan 8,6 °C. Ketidakseragaman kondisi awal memperbesar variasi antar-pengujian dan membatasi *repeatabilitas*. Pada penelitian berikutnya, temperatur awal ikan dan ruang perlu diseragamkan, waktu penyeimbangan sensor ditetapkan, serta urutan penyalaan kompresor dan pencatatan data distandarkan.

3.3 Pengaruh radiasi matahari terhadap kebutuhan daya

Radiasi matahari berfluktuasi antara 66 dan 954 W/m², sedangkan daya tetap berada pada rentang yang lebih sempit. Korelasi gabungan radiasi–daya hanya $r = 0{,}11$. Pada tingkat per percobaan, koefisien korelasi bervariasi dari −0,43 hingga 0,52. Variasi tanda ini menunjukkan bahwa daya kompresor tidak hanya ditentukan oleh radiasi sesaat, tetapi juga oleh kondisi baterai/penyangga listrik, siklus kerja kompresor, temperatur kondensasi, dan beban termal ruang yang dapat dilihat pada Gambar 8. Ikram dkk., (2021) menekankan pentingnya pemadanan komponen PV dan refrigerasi, sedangkan Setiawan dkk., (2021) menunjukkan bahwa model kepemilikan dan batas operasi sistem juga memengaruhi kelayakan instalasi pendingin surya.



Gambar 8: Hubungan radiasi matahari dan daya listrik seluruh percobaan

Korelasi yang lemah tidak berarti radiasi tidak penting. Radiasi menentukan energi yang tersedia dalam periode lebih panjang, tetapi penyangga energi meredam perubahan jangka pendek. Sistem semacam ini akan lebih andal apabila strategi pengendalian mempertimbangkan *state of charge* baterai, temperatur ruang, dan prakiraan radiasi. Eltawil dkk., (2023) menunjukkan bahwa kendali berbasis data dapat mengoptimalkan operasi pendingin fotovoltaik, sementara Hu dkk., (2021) dan Chopra dkk., (2023) menunjukkan manfaat penyimpanan energi dingin untuk memisahkan waktu produksi energi dari waktu kebutuhan pendinginan.

3.4 Kelembapan, mutu penyimpanan, dan implikasi desain

Kelembapan rata-rata meningkat dari sekitar 47–49% pada percobaan awal menjadi 60–63% pada percobaan 4–5. Kenaikan kelembapan relatif selama pendinginan merupakan konsekuensi dari menurunnya kemampuan udara menahan uap air. Kelembapan yang lebih tinggi dapat menekan dehidrasi permukaan ikan, tetapi kondensasi pada dinding dan produk perlu dikendalikan karena dapat meningkatkan risiko kontaminasi. Penelitian ini tidak mengukur *total volatile base nitrogen*, jumlah mikroba, pH, perubahan massa, maupun sifat organoleptik; oleh karena itu, istilah "menjaga kesegaran" harus dipahami sebagai potensi termal, bukan bukti langsung umur simpan.

Perbedaan yang konsisten antara T6 dan T8 mengindikasikan hambatan perpindahan panas dan distribusi udara. Perbaikan utama meliputi peningkatan insulasi pada tutup dan sambungan, pemasangan kipas sirkulasi internal berdaya rendah, pengaturan posisi evaporator agar tidak tertutup produk, serta penambahan separator agar ikan tidak bersentuhan langsung dengan permukaan sangat dingin. Integrasi material berubah fasa dapat menyimpan energi dingin saat radiasi tinggi dan menurunkan siklus hidup-mati kompresor, sebagaimana dilaporkan Fenton dkk., (2024), R. J. Setiawan dkk., (2024) dan Kumar dkk., (2025). Untuk penggunaan bergerak, konsep penyimpanan mikro fotovoltaik juga telah menunjukkan potensi dalam mengurangi kehilangan pascapanen (El-Sebaee dkk., 2026; Nadimuthu dkk., 2025).

Secara praktis, sistem ini paling tepat diposisikan sebagai alat prapendinginan atau penyimpanan sementara bagi pelaku usaha kecil di pesisir. Sistem belum dapat menggantikan *cold storage* terkontrol untuk penyimpanan lama. Pengembangan berikutnya perlu mencakup pengukuran temperatur inti pada beberapa ikan, pemetaan temperatur minimal sembilan titik ruang, pengulangan pada kondisi awal identik, pengujian 6–24 jam, pencatatan *state of charge*, serta evaluasi COP dan mutu mikrobiologis. Analisis keekonomian juga penting karena keberhasilan sistem surya bergantung pada biaya panel, baterai, kompresor, perawatan, dan nilai ikan yang dapat diselamatkan dari kerusakan (Carlsson dkk., 2025; Garcia & Semedo, 2024; Rami & Allouhi, 2024).

3.5 Repeatabilitas dan ketidakpastian pengukuran

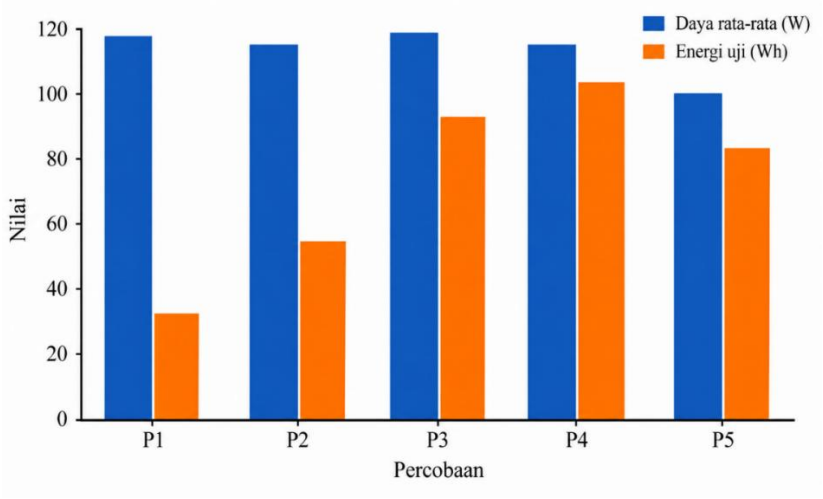
Indikator pada Tabel 4 memperlihatkan bahwa hubungan radiasi–daya tidak konsisten antar-pengujian, sedangkan korelasi daya–T8 cenderung positif pada beberapa pengujian karena daya yang lebih tinggi muncul ketika beban termal ruang masih besar. Korelasi daya–T8 berkisar 0,58–0,94 pada pengujian 2–4, tetapi pola tersebut tidak dapat ditafsirkan bahwa kenaikan daya menyebabkan temperatur meningkat pada Gambar 9. Sebaliknya, hubungan ini lebih konsisten dengan respons kompresor terhadap beban pendinginan yang lebih tinggi. Interpretasi korelasi karena itu harus mempertimbangkan urutan waktu dan kondisi awal, bukan hanya pasangan nilai pengamatan.

Tabel 4: Indikator laju pendinginan dan hubungan antarvariabel

Uji	Laju pull-down (°C/menit)	r(G,P)	r(P,T8)	Catatan kondisi awal
1	0,00	−0,33	0,81	Ruang telah pradingin
2	0,06	−0,43	0,58	Ruang telah pradingin
3	0,04	0,52	0,79	Ruang telah pradingin
4	0,34	0,25	0,94	Pull-down dari kondisi hangat
5	0,17	0,50	0,83	Kondisi awal menengah

Sumber ketidakpastian utama adalah ketidakseragaman temperatur awal, perubahan cuaca, ketidakpastian posisi sensor terhadap produk, serta tidak tersedianya rekaman kalibrasi dan *state of charge*. Interval satu menit memadai untuk menangkap tren makro, tetapi dapat melewatkan fluktuasi cepat akibat siklus kompresor. Karena spesifikasi akurasi dan data kalibrasi tiap kanal tidak tersedia pada dataset yang dianalisis, ketidakpastian gabungan secara numerik tidak dihitung agar tidak menghasilkan presisi semu. Penelitian lanjutan perlu melaporkan akurasi alat, melakukan kalibrasi titik es dan titik lingkungan, menggunakan minimal tiga sensor inti ikan, dan

menyajikan simpangan baku dari ulangan dengan kondisi awal identik. Perbaikan ini diperlukan sebelum COP dan perbandingan antar-konfigurasi dapat dilaporkan dengan ketidakpastian terukur.



Gambar 9: Daya rata-rata dan estimasi energi listrik setiap percobaan

3.6 Perhitungan Koefisien Kinerja (COP)

Meskipun entalpi refrigeran tidak diukur secara langsung, COP sistem dapat diperkirakan dari perbandingan jumlah kalor yang diserap dari beban dibagi dengan energi listrik yang dikonsumsi kompresor selama pengujian, yaitu pada Persamaan 3.

$$COP_{sistem} = \frac{Q_{dilepas}}{E_{listrik}} \quad (3)$$

Dimana :

$Q_{dilepas} = m \times c_p \times \Delta T$ (kj)
$E_{listrik} = P_{rata-rata} \times t$ (kj)
$m.ikan = 5\ kg$
c_p ikan = 3,650 J/kg

$$Q_{ikan} = 5kg \times 3{,}650\frac{J}{Kg} \times (12{,}2 - 4{,}3)C = 144{,}18\ kJ$$

$$E_{listrik} = \left(103{,}6\ x\frac{48x60}{1000}\right) = 298{,}37\ kJ$$

$$COP_{sistem} = \frac{144{,}18\ kJ}{298{,}37\ kJ} = 0{,}48$$

3.7 Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Posisi hasil penelitian terhadap literatur dirangkum pada Tabel 5. Berbeda dari studi ruang dingin skala besar yang menekankan beban tahunan dan kelayakan ekonomi, penelitian ini berfokus pada respons transien *cooling box* berdaya rendah dengan beban ikan aktual. Skala kecil memberikan kebutuhan daya yang lebih rendah, tetapi rasio luas permukaan terhadap volume lebih besar sehingga rugi panas dinding dan kebocoran udara menjadi lebih dominan. Karena itu, keberhasilan sistem tidak dapat hanya dinilai dari temperatur evaporator; temperatur produk dan keseragaman ruang harus menjadi indikator utama.

Tabel 5: Perbandingan karakteristik penelitian dengan studi terdahulu

Studi	Sistem dan skala	Temuan utama	Relevansi terhadap penelitian ini
Budiyanto dkk. (2023)	Cold storage modular 20 ft untuk komoditas ikan	Kecepatan dan distribusi aliran udara menentukan waktu pendinginan	Mendukung kebutuhan kipas dan pemetaan keseragaman temperatur
Chopra dkk. (2023)	Penyimpanan luar jaringan dengan refrigerasi surya dan reservoir termal	Penyimpanan dingin dan kendali adaptif menjaga operasi saat energi berubah	Menjadi dasar integrasi penyimpanan energi dingin
Fenton dkk. (2024)	Refrigerator termoelektrik surya dengan PCM	Produk pangan dapat didinginkan di bawah 5 °C dan beban energi berkurang	Menunjukkan peluang PCM pada *cooling box*
Kumar dkk. (2025)	Visi *cooler* kompresor DC bertenaga surya dengan PCM	PCM menurunkan daya rata-rata dari 48 menjadi 40 W	Menguatkan strategi peredaman siklus kompresor
Rami & Allouhi (2024)	Ruang dingin ikan berbasis PV pada pasar tradisional	Kelayakan energi, ekonomi, dan lingkungan bergantung pada sizing sistem	Menunjukkan perlunya analisis keekonomian tahap lanjut
Penelitian ini	*Cooling box* kompresi uap, panel surya, ikan kembung 5 kg	T8 30,4→12,7 °C pada *pull-down*; daya rata-rata 113,8 W	Memberikan data transien multivariabel pada skala portabel

Dibandingkan dengan studi PCM dan sistem dengan penyimpanan dingin, *cooling box* yang diuji masih mengandalkan kapasitas termal komponen dan baterai untuk mempertahankan operasi. Hal ini menjelaskan mengapa radiasi sesaat tidak langsung mengikuti daya,

tetapi juga menyebabkan ketergantungan pada status pengisian yang tidak tercatat. Penambahan PCM pada temperatur leleh sekitar batas penyimpanan dingin berpotensi memperpanjang waktu bertahan ketika radiasi menurun, selama massa PCM, kontak termal, dan posisi pemasangan dirancang agar tidak menghambat aliran udara.

Dari perspektif kesiapan teknologi, prototipe telah membuktikan fungsi dasar pendinginan pada beban ikan 5 kg, tetapi belum memenuhi seluruh indikator validasi produk. Tahap berikutnya perlu mengubah fokus dari *proof-of-concept* menuju verifikasi performa: kondisi awal terkendali, ulangan statistik, neraca energi, pengukuran inti ikan, uji kebocoran termal, dan evaluasi mutu. Pendekatan tersebut akan meningkatkan kekuatan bukti dan memungkinkan perbandingan yang adil dengan sistem pendingin surya lain pada tingkat publikasi dan penerapan lapangan.

4. KESIMPULAN

Cooling box kompresi uap bertenaga surya mampu menghasilkan temperatur sisi hisap hingga −11,7 °C dan menurunkan temperatur internal secara nyata pada beban ikan kembung 5 kg. Pada uji *pull-down* utama, temperatur internal turun dari 30,4 menjadi 12,7 °C selama 52 menit dengan laju rata-rata 0,34 °C/menit. Pada kondisi awal yang lebih dingin, temperatur internal mencapai 4,2–4,3 °C. Daya operasi berada pada 79–133 W dengan rata-rata 113,8 W dan kebutuhan energi 33,5–104,1 Wh per uji. Korelasi radiasi–daya gabungan yang lemah menunjukkan bahwa penyangga listrik membantu menjaga operasi saat radiasi berubah, tetapi variasi kondisi awal dan status penyimpanan energi membatasi perbandingan langsung antarulangan. Sistem direkomendasikan untuk prapendinginan dan penyimpanan sementara. Klaim pemenuhan rantai dingin 0–4 °C masih memerlukan validasi temperatur inti ikan, keseragaman ruang, COP, dan mutu mikrobiologis. Peningkatan insulasi, sirkulasi udara, penyimpanan energi dingin, serta kendali kompresor adaptif merupakan prioritas pengembangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas HKBP Nommensen atas fasilitas laboratorium dan dukungan selama pengujian. Penghargaan juga disampaikan kepada seluruh tim yang membantu perakitan alat, pengambilan data, dan penyusunan dokumentasi penelitian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat memengaruhi hasil dan pembahasan artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Richard A. M. Napitupulu : Supervisi, Validasi, Serta Peninjauan Dan Penyuntingan Naskah.
Wilson Sabastian Nababan : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis, Visualisasi, Dan Penyusunan Draf Awal.
Siwan E. A. Peranginangin : Metodologi, Investigasi, Validasi, Dan Peninjauan Naskah.
Charles S. P. Manurung : Investigasi, Penyediaan Sumber Daya, Validasi, Dan Penyuntingan.
Brian Nata Milala : Investigasi, Kurasi Data, Visualisasi, Dan Peninjauan Naskah.
Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Budiyanto, M. A., Imamudien, O., Lubis, A., Alhamid, M. I., & Shinoda, T. (2023). Air flow distribution and cooling performance on modular cold storage for fishery commodity. *Energy Reports*, *9*, 162–171.

Chopra, S., Müller, N., Dhingra, D., Pillai, P., Kaushik, T., Kumar, A., & Beaudry, R. (2023). Design and performance of solar-refrigerated, evaporatively-cooled structure for off-grid storage of perishables. *Postharvest Biology and Technology*, *197*, 112212.

Eltawil, M. A., Mohammed, M., & Alqahtani, N. M. (2023). Developing Machine Learning-Based Intelligent Control System for Performance Optimization of Solar PV-Powered Refrigerators. *Sustainability*, *15*(8), 6911. https://doi.org/10.3390/su15086911

Fenton, E., Bozorgi, M., Tasnim, S., & Mahmud, S. (2024). Solar-powered thermoelectric refrigeration with integrated phase change material: An experimental approach to food storage. *Journal of Energy Storage*, *79*, 110247.

Hu, C., Li, M., Wang, Y., Li, G., Ma, X., Du, W., Zhou, X., & Zhang, Y. (2021). Preliminary investigation on pilot-scale photovoltaic-driven cold storage with ice thermal storage based on vapor compression refrigeration cycle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *45*, 101187.

Kumar, K. S., Vasanthi, R., Shakir, M., Munimathan, A., Manirathnam, A., Alam, M. M., Rajendran, P., & Lee, I. E. (2025). Experimental investigation to enhancing the energy efficiency of a solar-powered Visi cooler. *Scientific Reports*, *15*(1), 18327.

Rami, Y., & Allouhi, A. (2024). Design, economic, and environmental accounting assessment of a solar-powered cold room for fish storage in traditional markets. *Sustainability*, *16*(7), 3080.

Setiawan, E. A., Thalib, H., & Maarif, S. (2021). Techno-economic analysis of solar photovoltaic system for fishery cold storage based on ownership models and regulatory boundaries in Indonesia. *Processes*, *9*(11), 1973.