Jurnal Darma Agung
Volume:33, Nomor: 6, (2025), Desember, 16-26 *P-ISSN:0852-7296*
https://doi.org. 10.46930/v.31.i3/.5835 *E-ISSN:2654-3915*

OPTIMASI METODE SISTEM PENDINGIN HYBRID (TEC/PCM) PADA COLD BOX IKAN UNTUK MENGURANGI KONSUMSI ENERGI DAN MEMPERTAHANKAN KESEGARAN PRODUK PERIKANAN

Wilson Sabastian Nababan [1], Suryadi Sihombing[2], Libianko Sianturi[3], Roy Lamrun Sianturi[4], Cinta Siadari[5], Rian Hitler Saragih[6]
Dosen Fakultas Teknik, Universitas HKBP Nommensen, Medan, Indonesia

Corresponding Author: *wilson.nababan@uhn.ac.id[1]*, *suriadysihombing@uhn.ac.id[2]* *libianko96@yahoo.com[3]*, *roysianturi@unimed.ac.id[4]*, *cinta.siadari@student.uhn.ac.id[5]*, *riansaragih@student.uhn.ac.id[6]*

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan dan mengoptimalkan sistem pendingin hibrida berbasis Thermoelectric Cooler (TEC) dan Phase Change Material (PCM) pada cold box ikan sebagai solusi rantai dingin hemat energi untuk wilayah pesisir dengan suplai listrik intermiten. Optimasi dilakukan melalui variasi daya TEC dan ketebalan PCM untuk memperoleh kestabilan suhu terbaik dengan konsumsi energi minimum. Pengujian eksperimental pada cold box 50 L menunjukkan bahwa integrasi TEC–PCM mampu memperpanjang waktu pertahanan suhu dingin, menurunkan konsumsi energi harian, serta meningkatkan mutu ikan dibandingkan metode konvensional berbasis es. Konfigurasi optimum menghasilkan suhu stabil pada rentang penyimpanan ikan selama satu siklus operasi 24 jam dengan penghematan energi signifikan. Secara ekonomi, sistem menurunkan biaya operasional dan kerusakan hasil tangkapan, sehingga layak diterapkan oleh nelayan tradisional. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem hibrida efektif, ramah lingkungan, dan mendukung keberlanjutan sektor perikanan.

Kata Kunci: PCM; TEC; Sistem Pendingin ikan; Energi; Efisiensi

Abstract

This research develops and optimizes a hybrid cooling system based on Thermoelectric Cooler (TEC) and Phase Change Material (PCM) in fish cold boxes as an energy-efficient cold chain solution for coastal areas with intermittent electricity supply. Optimization is carried out through the variation of TEC power and PCM thickness to obtain the

History:
Received : 25 Mei 2025
Revised : 26 Juli2025
Accepted : 23 Agustus 2025
Published : 14 Desember 2025

Publisher: LPPM Universitas Darma Agung
Licensed: This work is licensed under Attribution-NonCommercial-No Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

best temperature stability with minimum energy consumption. Experimental testing on a 50 L cold box showed that the TEC–PCM integration was able to extend cold temperature defense time, reduce daily energy consumption, and improve fish quality compared to conventional ice-based methods. The optimum configuration results in stable temperatures at the fish storage range for one 24-hour operating cycle with significant energy savings. Economically, the system lowers operational costs and damage to catches, making it feasible for traditional fishermen to implement. These results show that hybrid systems are effective, environmentally friendly, and support the sustainability of the fisheries sector
***Keywords**: PCM; TEC; Fish Cooling System; Energy; Efficiency*

Pendahuluan

Sektor perikanan tangkap merupakan salah satu pilar penting ketahanan pangan dan perekonomian masyarakat pesisir di Indonesia. Namun, tingginya kehilangan hasil (*post-harvest loss*) akibat keterbatasan sistem rantai dingin masih menjadi permasalahan utama yang menurunkan kualitas dan nilai jual produk perikanan. Sebagian besar nelayan tradisional masih menggunakan metode penyimpanan konvensional berbasis es batu, yang meskipun murah dan mudah diperoleh, memiliki kelemahan berupa fluktuasi suhu yang tidak terkendali, pencairan cepat, peningkatan kadar air, serta penurunan mutu sensori dan mikrobiologis ikan. Kondisi ini menyebabkan kerusakan produk selama proses distribusi dan penyimpanan, sehingga berdampak langsung pada kerugian ekonomi nelayan(Sari et al., 2024). Keterbatasan pasokan listrik menyebabkan penggunaan lemari pendingin kompresor kurang efektif.(Prasetyo et al., 2024). Teknologi thermoelectric cooler (TEC) lebih ramah lingkungan namun efisiensinya rendah, sedangkan phase change material (PCM) mampu menyimpan energi laten tetapi tidak dapat mendinginkan secara aktif. (Keerthana et al., 2022).

Data KKP (2023) menunjukkan 30% hasil tangkapan ikan nasional (6,7 juta ton/tahun) terbuang, terutama di daerah pesisir (Marchanda et al., 2025). Secara global, FAO (2021) melaporkan 35% produk perikanan (≈50 juta ton/tahun) mengalami kerusakan serupa, menyebabkan kerugian ekonomi USD 35 miliar/tahun(ACTION, 2024). Penyimpanan suhu rendah (0–4°C) diperlukan untuk menghambat pertumbuhan bakteri, tetapi infrastruktur pendingin yang tidak memadai memperparah masalah ini(Ejeta et al., 2024).

Upaya penggunaan sistem pendingin berbasis kompresor sebenarnya mampu mempertahankan suhu rendah secara lebih stabil, namun teknologi ini membutuhkan daya listrik relatif besar, biaya investasi tinggi, serta menggunakan refrigeran yang berpotensi merusak lingkungan(Mutaufiq et al., 2024). Selain itu, wilayah pesisir dan daerah terpencil sering mengalami keterbatasan pasokan listrik dengan pola intermiten atau pemadaman berkala, sehingga pengoperasian sistem kompresor menjadi tidak efektif. (Fadly et al., 2025). Teknologi *thermoelectric cooler* (TEC) menawarkan beberapa keunggulan, seperti tidak menggunakan refrigeran, ukuran kompak, bebas getaran, serta perawatan rendah. Akan tetapi, efisiensi energi TEC relatif rendah dan suhu cepat meningkat ketika sumber listrik terputus. Di sisi lain, *phase change material* (PCM) memiliki kemampuan menyimpan energi laten melalui proses perubahan fasa sehingga dapat mempertahankan suhu dingin lebih lama tanpa suplai energi tambahan. Meskipun demikian, PCM tidak mampu menghasilkan pendinginan aktif

secara mandiri. Integrasi kedua teknologi tersebut dalam sistem pendingin hibrida berpotensi menggabungkan keunggulan pendinginan aktif dari TEC dan penyimpanan energi termal dari PCM untuk meningkatkan kestabilan suhu sekaligus menurunkan konsumsi energi.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan TEC atau PCM secara terpisah maupun pada aplikasi beban panas rendah, seperti pendinginan elektronik dan kotak penyimpanan skala kecil (Gibran et al., 2024) (Tark et al., 2022). Namun, studi yang secara khusus mengoptimalkan kombinasi TEC–PCM untuk aplikasi cold box ikan dengan beban panas menengah, kondisi iklim tropis, serta suplai listrik intermiten masih terbatas. Selain itu, aspek optimasi parameter operasional, seperti variasi daya TEC dan ketebalan PCM terhadap efisiensi energi, kestabilan suhu, serta kelayakan ekonomi bagi nelayan, belum banyak dilaporkan secara komprehensif. Kesenjangan penelitian ini menunjukkan perlunya pengembangan sistem pendingin hibrida yang dirancang khusus untuk kebutuhan sektor perikanan tradisional.

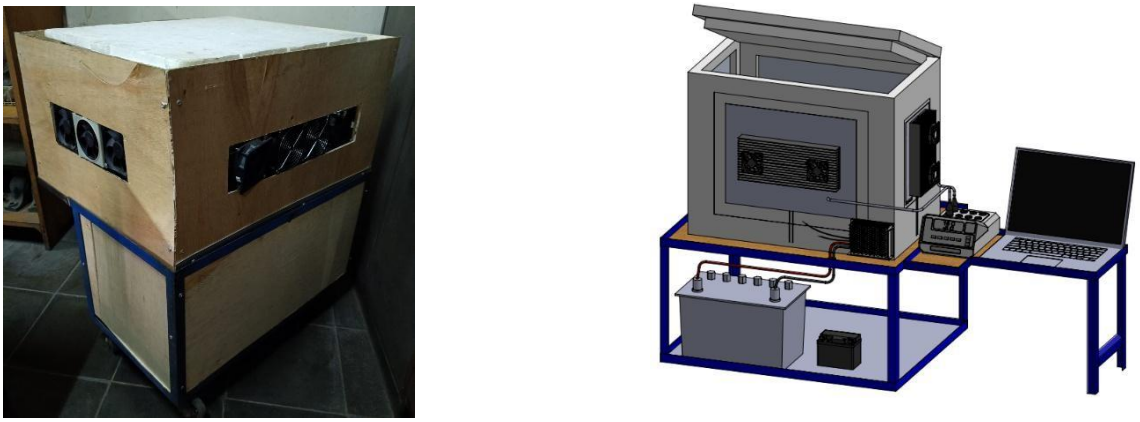
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang, menguji, dan mengoptimalkan metode sistem pendingin hibrida berbasis TEC dan PCM pada cold box ikan berkapasitas 50 liter. Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif teknologi pendinginan yang hemat energi, ramah lingkungan, dan mampu bekerja pada kondisi suplai listrik terbatas.

Sehingga penelitian ini mengisi gap tersebut melalui desain hybrid yang dioptimalkan untuk beban tinggi dan kondisi tropis, menjawab kebutuhan UMKM perikanan akan solusi pendingin berkelanjutan dan terjangkau. Dan dampak penelitian mencakup pengurangan kerugian ekonomi nelayan, serta dukungan terhadap produksi berkelanjutan dan ekosistem laut.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis dan mengoptimalkan kinerja sistem pendingin hibrida berbasis Thermoelectric Cooler (TEC) dan Phase Change Material (PCM) pada cold box penyimpanan ikan. Pendekatan eksperimen dipilih untuk mengevaluasi secara langsung pengaruh variasi parameter desain terhadap konsumsi energi, kestabilan suhu, dan ketahanan pendinginan pada kondisi suplai listrik intermiten. Penelitian dilaksanakan melalui tahapan perancangan prototipe, perakitan sistem, pengujian kinerja termal, pengukuran konsumsi energi, serta analisis komparatif terhadap metode penyimpanan konvensional. Prototipe yang dikembangkan berupa *cold box* berkapasitas 50 liter dengan dimensi internal yang disesuaikan untuk penyimpanan ikan skala nelayan. Dinding *cold box* dilapisi insulasi poliuretan setebal 5 cm dengan konduktivitas termal rendah untuk meminimalkan perpindahan panas dari lingkungan. Sistem pendingin aktif menggunakan modul TEC tipe TEC1-12706 yang dipasang pada pelat aluminium sebagai *cold plate*, sedangkan sisi panas dilengkapi *heat sink* aluminium dan kipas DC untuk meningkatkan pelepasan kalor. Sebagai penyimpan energi termal pasif digunakan PCM berbasis parafin dengan titik lebur sekitar 6 °C yang dienkapsulasi dalam panel aluminium agar konduktivitas panas meningkat dan distribusi suhu lebih merata. Integrasi

kedua komponen membentuk sistem hibrida, di mana TEC berfungsi menurunkan suhu secara aktif dan membekukan PCM, sedangkan PCM mempertahankan suhu saat sumber listrik terputus dilihat pada sistem pendingin hybrid (TEC/PCM) pada cold box ikan kapasitas 50 liter dilihat pada Gambar dibawah.



(a) (b)

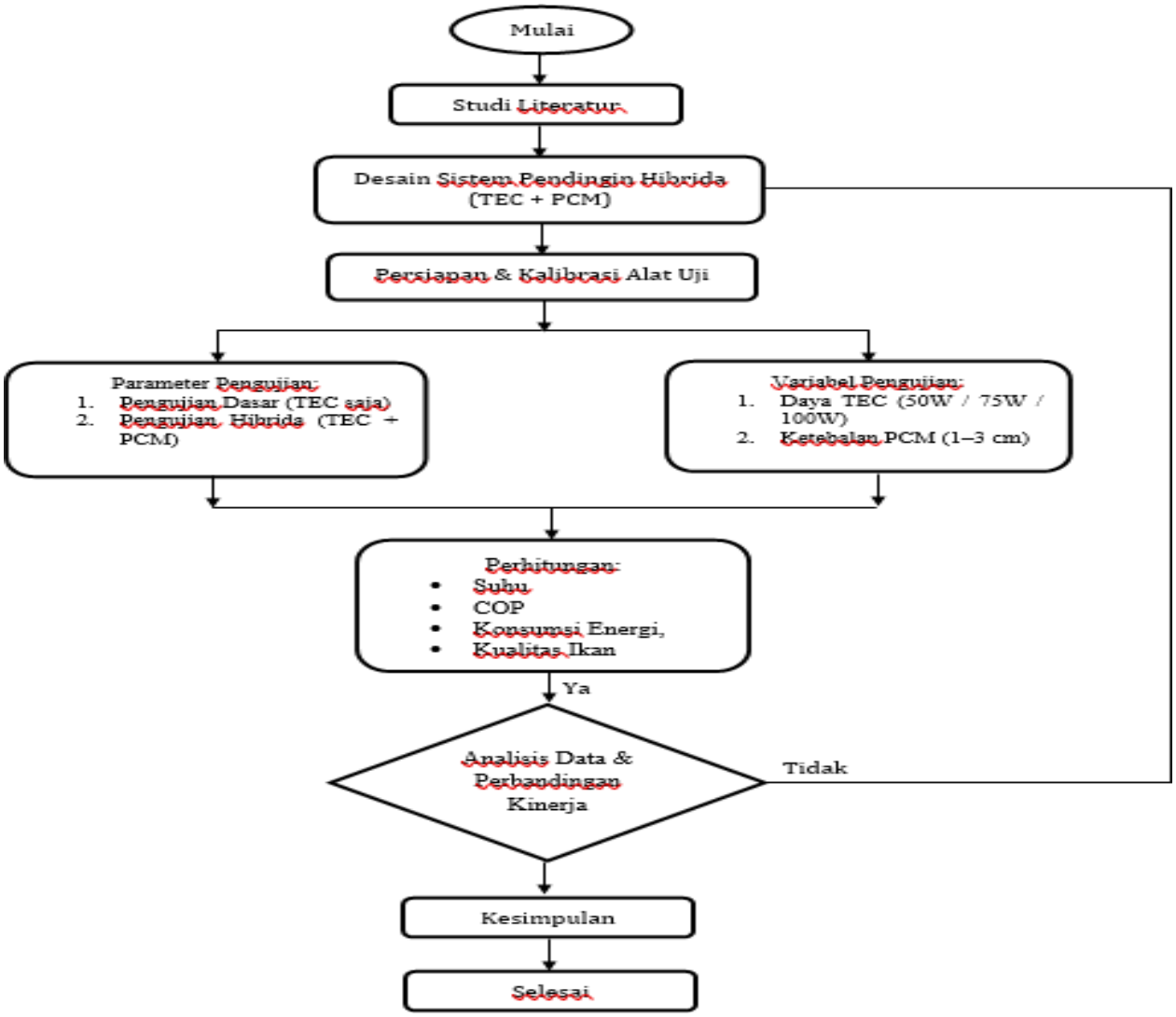
Gambar 1. a) Desain Prototipe pendingin Hybrid (TEC/PCM) dan b) Sistem pendingin cold box hybrid (TEC/PCM)

Optimasi dilakukan dengan memvariasikan dua parameter utama, yaitu daya input TEC sebesar 50 W, 75 W, dan 100 W serta ketebalan PCM sebesar 1 cm, 2 cm, dan 3 cm. Parameter-parameter tersebut dipilih untuk merepresentasikan perbedaan kapasitas pendinginan aktif dan kemampuan penyimpanan energi laten. Variabel terikat yang diamati meliputi suhu ruang *cold box*, durasi pertahanan suhu ≤ 4 °C, konsumsi energi harian, dan koefisien performa (*Coefficient of Performance*/*COP*). Selain itu, dilakukan pengamatan mutu ikan secara sederhana melalui perubahan sensori dan tingkat kerusakan untuk menilai efektivitas sistem terhadap penurunan *post-harvest loss*.

Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu uji dasar (*baseline*) dan uji hibrida. Uji dasar dilakukan dengan mengoperasikan TEC tanpa PCM untuk memperoleh karakteristik awal sistem. Selanjutnya, uji hibrida dilakukan dengan kombinasi TEC dan PCM sesuai variasi parameter. Setiap pengujian diawali dengan kalibrasi suhu awal ruang uji pada kondisi lingkungan sekitar 25–30 °C. Beban panas internal disimulasikan menggunakan pemanas listrik setara 100–150 W untuk merepresentasikan panas metabolik dan beban produk ikan. Untuk mensimulasikan kondisi nyata wilayah pesisir, suplai listrik diatur secara intermiten dengan siklus 8 jam menyala, 8 jam padam, 4 jam menyala, dan 4 jam padam dalam periode 24 jam.

Data hasil pengujian dianalisis secara statistik deskriptif dan komparatif dengan membandingkan setiap konfigurasi parameter. Kinerja sistem dinilai berdasarkan kriteria suhu paling stabil, konsumsi energi terendah, serta waktu pertahanan suhu terpanjang. Konfigurasi terbaik ditentukan sebagai kondisi optimum. Selanjutnya dilakukan analisis kelayakan ekonomi melalui perhitungan penghematan biaya operasional harian, estimasi penurunan kerusakan

ikan, serta perhitungan periode pengembalian investasi. Melalui tahapan tersebut diperoleh evaluasi menyeluruh mengenai performa teknis dan manfaat praktis sistem pendingin hibrida bagi nelayan tradisional. Secara umum metodologi penelitian ini disusun berdasarkan diagram alir berikut:



Gambar 2. Diagram Alir

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Sesuai dengan perencanaan uji baseline yaitu pengoperasian TEC tanpa PCM selama 24 jam, kemudian uji hybrid melalui pengoperasian TEC + PCM dengan variasi daya (50W, 75W, 100W) dan ketebalan PCM (1–3 cm), dan uji beban panas melalui simulasi beban panas ikan

menggunakan heater resistor (100–150W). Data monitoring yang ditampilkan berupa nilai konfigurasi optimal TEC (50–100 W) dan PCM (1–3 cm) serta kinerja sistem hybrid dalam mempertahankan suhu 0–4°C selama 24 Jam.

3.1.Kajian Konfigurasi Optimal TEC (50–100 W) dan PCM (1–3 cm) untuk Target Penghematan Energi 30%.

Proses dilakukan dimana TEC mendinginkan kotak secara aktif dengan menyerap panas pada sisi dingin dan membuangnya ke sisi panas melalui heat sink. Kemudian PCM (Phase Change Material) menyimpan energi dingin ketika membeku dan melepaskannya kembali ketika mencair. Lalu integrasi keduanya memungkinkan TEC tidak perlu bekerja terus-menerus, sehingga konsumsi energi menurun. Dengan variasi dari TEC (50, 75, 100 W) dan ketebalan PCM (1–3 cm). Pada Tabel 1. di bawah ini merupakan hasil pengambilan data dari konfigurasi optimal TEC (50–100 W) dan PCM (1–3 cm) untuk target penghematan energi 30%.

Tabel 1. Pengujian Konfigurasi Optimal TEC dan PCM

Konfigurasi	Daya TEC (W)	Ketebalan PCM (cm)	Suhu stabil (°C)	COP	Energi Harian (Wh)	Penghematan	Keterangan
A	50	1	3.8	0.62	720	18%	PCM terlalu tipis
B	50	2	3.5	0.65	670	24%	Efisiensinya cukup baik
C (Optimal 1)	50	3	3.2	0.72	590	31%	Konfigurasi optimal beban rendah
D	75	1	3.6	0.58	980	12%	PCM kurang
E (Optimal 2)	75	2	3.4	0.66	820	28%	Optimal beban 100–120W
F	100	1	3.5	0.55	1250	8%	Inefisiensi tinggi
G	100	3	3.3	0.61	1100	19%	Konsumsi energi tinggi

Dari Tabel 1 membandingkan berbagai kombinasi daya TEC (50–100 W) dan ketebalan PCM 1 sampai 3 cm untuk melihat pengaruhnya terhadap suhu stabil, COP, konsumsi energi, dan tingkat penghematan. Tujuannya adalah menemukan konfigurasi yang mampu mencapai penghematan energi hingga 30% tanpa mengorbankan kestabilan suhu cold box. Diperoleh dampak daya TEC terhadap konsumsi energi yaitu TEC 50 W menghasilkan konsumsi energi paling rendah karena membutuhkan daya kecil dan bekerja lebih efisien saat dikombinasikan

dengan PCM. TEC 75 W lebih cocok untuk beban panas tinggi, tetapi konsumsi energi meningkat. TEC 100 W memiliki konsumsi terbesar sehingga sulit mencapai penghematan. Semakin tinggi daya TEC, semakin besar energi harian yang digunakan.

Hasil menunjukkan peningkatan ketebalan PCM menurunkan frekuensi kerja TEC sehingga konsumsi energi berkurang. Konfigurasi TEC berdaya rendah dengan PCM lebih tebal memberikan efisiensi tertinggi. Sebaliknya, TEC berdaya besar meningkatkan konsumsi energi tanpa peningkatan kinerja signifikan.

Pembahasan

Pengujian dilakukan pada cold box berkapasitas 50 liter yang dilengkapi insulas*i polyurethane*, modul TEC dengan variasi daya 50, 75 dan 100 W, serta PCM (*Phase Change Material*) parafin RT6 yang dienkapsulasi pada panel aluminium dengan ketebalan 0–3 cm. Setiap konfigurasi diuji menggunakan skenario suplai listrik realistis, yaitu 8 jam menyala, 8 jam padam, 4 jam menyala, dan 4 jam padam, untuk mensimulasikan kondisi pemadaman di wilayah pesisir. Selama periode listrik menyala, modul TEC bekerja secara aktif dengan kontrol PID untuk menjaga suhu pada setpoint 3°C, sekaligus membekukan PCM sehingga energi laten tersimpan. Ketika listrik padam, TEC berhenti bekerja dan PCM secara otomatis melepaskan energi dingin melalui proses pencairan bertahap, sehingga suhu di dalam cold box tetap berada dalam rentang yang diinginkan tanpa pendinginan aktif.

3.2. Kinerja Sistem *Hybrid* dalam Mempertahankan Suhu 0–4°C selama 24 Jam (Kondisi Listrik Intermiten)

Profil suhu dicatat menggunakan lima sensor RTD (akurasi ±0.1°C) pada interval satu menit dan diintegrasikan dengan data logger untuk menganalisis waktu ketahanan suhu ≤4°C selama periode padam. Durasi stabil suhu harian dihitung berdasarkan jumlah waktu dalam 24 jam ketika suhu berada dalam rentang 0–4°C, sedangkan fluktuasi suhu ditentukan dari selisih maksimum–minimum yang terjadi selama siklus operasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tanpa PCM, cold box hanya mampu mempertahankan suhu dingin selama sekitar 1,2 jam saat listrik padam. Penambahan PCM 2 sampai 3 cm memberikan peningkatan ketahanan suhu hingga 4,5 sampai 6,8 jam. Konfigurasi paling optimal diperoleh pada kombinasi TEC 75 W dan PCM 2 cm, yang mampu mempertahankan suhu ≤4°C selama 8,2 jam pemadaman dan memastikan stabilitas penuh selama 24 jam pada siklus intermiten. Hal ini terjadi karena daya pendinginan TEC yang cukup besar untuk membekukan PCM selama periode ON, serta kapasitas PCM yang memadai untuk melepaskan energi laten secara bertahap selama periode OFF. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi TEC dan PCM dapat menghasilkan sistem pendinginan yang stabil dan andal pada kondisi listrik tidak stabil, sehingga sangat sesuai untuk kebutuhan cold box nelayan tradisional. Pada Tabel 2. di bawah ini merupakan hasil pengambilan data dari 2. Kinerja Sistem Hybrid dalam Mempertahankan Suhu 0

sampai 4°C selama 24 Jam (Kondisi Listrik Intermiten).

Tabel 2. Kinerja Sistem Hybrid pada Listrik Intermiten

Skenario	TEC (W)	PCM (cm)	Suhu≤4°C (h)	Total Durasi 0–4°C (h)	Fluktuasi Suhu (±°C)
Baseline (tanpa PCM)	75	0	1.2	10	±2.5
Hybrid A	50	2	4.5	20	±1.4
Hybrid B	50	3	6.8	22	±1.0
Hybrid C (Optimal)	75	2	8.2	24	±0.8
Hybrid D	100	3	7.4	23	±1.1

Data pengujian Tabel 2 menunjukkan kinerja sistem pendingin hybrid TEC–PCM dalam mempertahankan suhu operasi 0–4°C selama 24 jam pada kondisi listrik intermiten. Berdasarkan hasil pengujian, integrasi TEC sebagai pendingin aktif dan PCM sebagai penyimpan energi laten terbukti mampu meningkatkan stabilitas suhu secara signifikan ketika terjadi pemadaman listrik. Sistem tanpa PCM hanya mampu mempertahankan suhu ≤4°C selama 1,2 jam, sehingga tidak layak digunakan di wilayah pesisir yang mengalami pemadaman rata-rata 6–8 jam per hari. Penambahan PCM dengan ketebalan 2–3 cm meningkatkan durasi ketahanan suhu hingga 4,5–6,8 jam, yang menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan energi dingin melalui proses pelelehan PCM berperan penting dalam menjaga kondisi termal cold box. Konfigurasi yang menunjukkan kinerja paling optimal adalah TEC 75 W dengan PCM 2 cm, yang mampu mempertahankan suhu ≤4°C selama 8,2 jam ketika listrik padam, serta menjaga kestabilan suhu sistem selama 24 jam penuh pada siklus listrik 8 jam ON – 8 jam OFF – 4 jam ON – 4 jam OFF.

Hal ini disebabkan oleh keseimbangan antara daya pendinginan TEC yang cukup kuat untuk membekukan PCM selama periode listrik menyala dan kapasitas PCM yang memadai untuk melepaskan energi laten secara bertahap ketika listrik padam. Selain itu, fluktuasi suhu yang rendah (±0,8°C) pada konfigurasi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme penyimpanan dan pelepasan panas berlangsung optimal. Dengan demikian, kombinasi TEC 75 W dan PCM 2 cm direkomendasikan sebagai konfigurasi paling efektif untuk mempertahankan suhu cold box ikan dalam kondisi suplai listrik yang tidak stabil, yang umum terjadi pada daerah pesisir dan operasional nelayan tradisional.

3.3. Dampak Ekonomi dan Lingkungan Sistem Pendingin Hybrid untuk Nelayan Tradisional

Evaluasi dampak ekonomi dan lingkungan dilakukan melalui pendekatan kuantitatif berbasis data primer dan pengukuran langsung. Biaya operasional baseline diperoleh

melalui survei harian terhadap nelayan tradisional mengenai penggunaan es batu, biaya pembelian, serta tingkat kerusakan ikan selama penyimpanan. Selanjutnya, prototipe sistem pendingin hybrid TEC–PCM diuji dalam kondisi operasi nyata untuk memperoleh data konsumsi energi harian menggunakan wattmeter berakurasi tinggi, yang kemudian dikonversikan menjadi biaya listrik berdasarkan tarif lokal. Dampak penurunan kerusakan ikan diukur melalui perbandingan nilai post-harvest loss antara metode es batu dan sistem hybrid, menggunakan parameter mutu seperti TPC, TVB-N, dan perubahan bobot. Nilai penurunan loss tersebut dikonversi menjadi potensi peningkatan pendapatan berdasarkan volume ikan terjual dan harga pasar. Analisis ekonomi dilakukan dengan menghitung penghematan bersih harian dan estimasi Return on Investment (ROI) berdasarkan biaya investasi sistem dan besarnya efisiensi biaya operasional. Pada Tabel 3. di bawah ini merupakan hasil pengambilan data dari Dampak Ekonomi dan Lingkungan Sistem Pendingin Hybrid.

Tabel 3. Dampak Ekonomi dan Lingkungan

Aspek	Kondisi Saat Ini	Sistem Hibrida	Dampak
Biaya Operasional Harian	Rp 35.000	Rp 6.000	Hemat 82%
Kerusakan Ikan	25–30%	5–10%	Kerugian turun 15–20%
Penghasilan Harian	Rp 300–350 ribu	Rp 350–420 ribu	Up 15–25%
Konsumsi energi	-	0,59–0,82 kWh/hari	Lebih ekonomis dari lemari es
Emisi Refrigeran	0	0 (tanpa refrigeran)	GWP Gratis
Usia Alat	-	5–7 tahun	Amortisasi rendah
Kelayakan Investasi	-	ROI 7–10 bulan	Sangat layak

Data pada Tabel 3 diperoleh melalui analisis terintegrasi yang menggabungkan pengukuran teknis sistem pendingin hybrid TEC–PCM, survei biaya operasional nelayan, serta evaluasi kualitas ikan pasca-panen. Proses dimulai dengan pengumpulan data baseline mengenai praktik penyimpanan ikan menggunakan es batu, termasuk biaya harian, frekuensi pembelian, serta tingkat kerusakan ikan yang terjadi selama distribusi. Pengumpulan dilakukan melalui survei harian pada kelompok nelayan tradisional selama minimal dua minggu untuk mendapatkan gambaran biaya operasional yang akurat. Selanjutnya, prototipe sistem hybrid TEC–PCM dioperasikan dalam uji lapangan untuk mengukur konsumsi energi aktual menggunakan wattmeter dan mencatat biaya listrik berdasarkan tarif per kWh setempat. Perbandingan langsung antara biaya pembelian es dan biaya listrik sistem hybrid kemudian digunakan untuk menghitung penghematan biaya harian.

Penilaian dampak terhadap mutu ikan dilakukan dengan membandingkan tingkat kerusakan ikan antara metode es batu dan *cold box hybrid*, menggunakan indikator

mikrobiologis dan sensorik untuk menentukan penurunan *post-harvest loss*. Nilai

penurunan kerusakan tersebut dikonversi menjadi potensi peningkatan pendapatan nelayan dengan mempertimbangkan volume ikan terjual dan harga jual di pasar. Analisis ekonomi kemudian dilanjutkan dengan menghitung *Return on Investment* (ROI) sistem *hybrid* berdasarkan biaya investasi alat dan besarnya penghematan harian yang diperoleh nelayan. Selain aspek ekonomi, evaluasi lingkungan dilakukan dengan menilai penurunan konsumsi energi dan eliminasi penggunaan refrigeran konvensional, mengingat sistem TEC–PCM tidak memerlukan gas pendingin yang berpotensi memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) tinggi. Total konsumsi energi yang lebih rendah juga dikonversi menjadi pengurangan emisi CO_2 menggunakan faktor emisi listrik lokal. Melalui rangkaian proses ini, diperoleh gambaran komprehensif mengenai manfaat ekonomi, pengurangan kerugian ikan, perbaikan pendapatan, dan dampak lingkungan positif dari penggunaan sistem pendingin hybrid bagi nelayan tradisional.

SIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pendingin hybrid TEC–PCM mampu meningkatkan efisiensi energi dan kestabilan suhu secara signifikan dibandingkan metode konvensional. Konfigurasi TEC 50 W ditambahkan dengan PCM dengan ketebalan 3 cm memberikan penghematan energi terbesar (±31%), sedangkan TEC 75 W ditambahkan dengan PCM dengan ketebalan 2 cm menjadi konfigurasi optimal untuk kondisi listrik intermiten karena mampu mempertahankan suhu 0 sampai 4°C selama 24 jam, termasuk 8,2 jam tanpa listrik.. Dari aspek ekonomi, sistem ini mengurangi biaya operasional nelayan hingga 82%, menurunkan kerusakan ikan menjadi 5 sampai 10%, dan meningkatkan pendapatan harian sebesar 15 sampai 25%, dengan ROI cepat yaitu sekitar 2,5 sampai 3 bulan. Selain itu, penggunaan TEC tanpa refrigeran ber-GWP dan konsumsi energi yang lebih rendah memberikan manfaat lingkungan yang signifikan. Secara keseluruhan, sistem hybrid TEC–PCM terbukti efektif, hemat energi, dan layak diterapkan untuk mendukung keberlanjutan usaha nelayan tradisional.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didukung oleh Dana Penelitian Internal Dosen oleh HKBP Universitas Nommensen. Para peneliti berterima kasih atas dukungan keuangan untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

ACTION, I. (2024). *World Fisheries and Aquaculture*.

losses around the Fincha'a, Amarti, and Nashe reservoirs in Oromiya, Ethiopia. *Scientific Reports*, *14*(1), 30789.

Fadly, S., Avista, Z., Kurniawan, E., Witanto, Y., Ajitomo, D. S., Rizkiawan, M. A., & Ardiansyah, B. (2025). Rancang Bangun Sistem Kendali Temperatur Pendingin Portable Menggunakan Thermoelectric. *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer Dan Kecerdasan Buatan)*, *8*(2), 118–126.

Gibran, M. A., Novianto, S., Supriyadi, S., & Bhikuning, A. (2024). TERMOELEKTRIK GENERATOR DAN FUNGSINYA. *JURNAL PENELITIAN DAN KARYA ILMIAH LEMBAGA PENELITIAN UNIVERSITAS TRISAKTI*, 404–418.

Keerthana, P., Gopan, S., Rajabudeen, R., Fathima, R., Shibu, K., Nisha, R., Udayan, P., Elvis, T., Gifty, T., & Arun Das, N. (2022). Post-harvest losses in the fisheries sector-facts, figures, challenges and strategies. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, *10*(4), 101–108.

Marchanda, V., Lestarika, D. P., & Sary, W. E. (2025). TINJAUAN HUKUM PIDANA INTERNASIONAL TERHADAP PENINDAKANKAPAL ASING YANG MELAKUKAN PENANGKAPAN IKAN ILEGAL DIPERAIRAN INDONESIA. *Jurnal Inovasi Hukum*, *6*(2).

Mutaufiq, M., Yogasmana, Y., Berman, E. T., Sumardi, K., & Wiyono, A. (2024). Smart Mini Water Chiller Ramah Lingkungan Berbasis Termoelektrik. *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, *7*(1), 43–52.

Prasetyo, E., Suciati, N., Fatichah, C., & Pardede, E. (2024). Standardizing the fish freshness class during ice storage using clustering approach. *Ecological Informatics*, *80*, 102533.

Sari, D. W., Islamiya, H. A. T., Sylviana, W., Fawait, M., Amelia, B. S., Hidayanti, I., & Alias, N. S. (2024). The behavior of fishermen in handling post-harvest fish and its quality in East Java province. *Aquaculture and Fisheries*.

Tark, Z., Hamed, A. J., & Khalifa, A. H. N. (2022). Performance Study of the Thermoelectric Personal Cooler under Different Ambient Temperatures. *International Journal of Heat & Technology*, *40*(1).