



Kinerja Kotak Penyimpan Dingin Thermoelectric Pada Beberapa Beban Pendinginan Buah Apel Manalagi (*Malus sylvestris*)

Performance of Thermoelectric Cold Storage Box on Several Cooling Loads of Manalagi Apples (Malus sylvestris)

Muhammad Ridwan Hafiz¹, Ida Ayu Rina Pratiwi Pudja^{1,*}, I Gusti Ngurah Apriadi Aviantara¹ I Gusti Ketut Arya Arthawan¹

¹ Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Badung, Bali, Indonesia

ABSTRAK

Pendinginan krusial dalam mempertahankan mutu pascapanen komoditas hortikultura klimakterik seperti apel Manalagi. Kotak pendingin termoelektrik portabel menawarkan solusi ramah lingkungan tanpa refrigeran kimia. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi beban buah (1, 2, dan 3 kg) serta waktu pengamatan (20, 40, dan 60 menit) terhadap kinerja kotak penyimpanan dingin berbasis modul *Thermoelectric Cooler* (TEC) tipe TEC1-12715. Pengujian pada tegangan konstan 12 V dan arus listrik stabil berkisar 7,49 A menghasilkan konsumsi daya stabil 89,88 W. Parameter terukur meliputi dinamika penurunan suhu internal serta efisiensi termal melalui *Coefficient of Performance* (COP). Data dianalisis secara statistik dengan *Two-Way ANOVA* dan uji lanjut *Tukey Honestly Significant Difference* (HSD) pada taraf nyata 5%. Analisis ragam menunjukkan faktor beban, waktu pengamatan, dan interaksi keduanya berpengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap COP. Laju penurunan suhu udara kotak berlangsung lebih cepat daripada suhu pusat buah akibat inersia termal komoditas. Peningkatan beban buah terbukti meningkatkan efisiensi perpindahan kalor sistem. Rata-rata COP tertinggi diperoleh pada beban maksimum 3 kg sebesar 0,235, diikuti beban 2 kg (0,165) dan beban 1 kg (0,079). Berdasarkan waktu, COP tertinggi tercapai pada menit ke-20 sebesar 0,174, lalu menurun stabil pada menit ke-40 (0,152) dan ke-60 (0,154). Disimpulkan bahwa kotak penyimpanan dingin berbasis TEC1-12715 beroperasi paling efisien pada kapasitas beban penuh (3 kg).

Kata Kunci: Apel Manalagi, *Coefficient of Performance* (COP), Kotak Pendingin Portabel, TEC1-12715.

ABSTRACT

Cooling is a crucial method for maintaining the postharvest quality of climacteric horticultural commodities, such as Manalagi apples. Portable thermoelectric cooling boxes offer an eco-friendly solution without the use of chemical refrigerants. This study evaluates the effect of variation in fruit load (1, 2, and 3 kg) and observation time (20, 40, and 60 minutes) on the performance of a cold storage box based on the *Thermoelectric Cooler* (TEC) module type TEC1-12715. Testing conducted at a constant voltage of 12 V and a stable electrical current of around 7.49 A resulted in a steady power consumption of 89.88 W. Measured parameters included internal temperature reduction dynamics and thermal efficiency through the *Coefficient of Performance* (COP). Data were statistically analyzed using the *Two-Way ANOVA* method and *Tukey's Honestly Significant Difference* (HSD) post-hoc test at a 5% significance level. The analysis of variance showed that the load factor, observation time, and their interaction significantly affected the COP ($p < 0.05$). The rate of reduction in the box's air temperature occurred faster than the fruit's core temperature due to the thermal inertia of the commodity. Increasing the fruit load was proven to enhance the thermal transfer efficiency of the system. The highest average COP was obtained at the maximum load of 3 kg, at 0.235, followed by the 2 kg load (0.165) and the 1 kg load (0.079). Based on time, the highest COP was reached at the 20th minute at 0.174, then decreased steadily at the 40th minute (0.152) and the 60th minute (0.154). It is concluded that the TEC1-12715-based cold storage box operates most efficiently at full load capacity (3 kg).

Keywords: Manalagi apple, *Coefficient of Performance* (COP), Portable cooler box, TEC1-12715.

*Corresponding author: Ida Ayu Rina Pratiwi Pudjawati

Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Udayana, Badung, Bali, Indonesia. Email: rinaprawati@unud.ac.id

Masuk: 15 Januari 2026;

Direvisi: 17 Juli 2025;

Diterima: 30 September 2026;

Terbit: 30 September 2026

PENDAHULUAN

Pendinginan merupakan proses penting dalam kehidupan sehari-hari untuk menjaga kualitas kesegaran berbagai barang, terutama makanan, minuman, obat-obatan, serta bahan biologis yang membutuhkan suhu rendah agar tidak mudah rusak. Suhu dingin mampu memperlambat pertumbuhan bakteri dan pembusukan, sehingga pendinginan menjadi komponen vital sektor industri pangan, farmasi, dan kesehatan.

Secara umum, pendinginan menggunakan kulkas konvensional dengan sistem refrigerasi kompresi uap mekanis. Namun, kulkas jenis ini memiliki kelemahan seperti penggunaan CFC (*Chloro Fluoro Carbon*) yang tidak ramah lingkungan, serta dimensi besar dan berat. Sebagai solusi, dikembangkan sistem pendingin termoelektrik ramah lingkungan serta portabel (Ananta et al., 2017). Sistem ini sangat cocok untuk keperluan lapangan atau penyimpanan sementara karena memanfaatkan efek Peltier tanpa freon.

Thermoelectric Cooler (TEC) bekerja berdasarkan efek Peltier, di mana aliran arus listrik searah (DC) menghasilkan perbedaan suhu di antara dua sisi modul. Mekanisme ini menyebabkan satu sisi mendingin dan sisi lainnya memanaskan, tergantung arah arus (Patel et al., 2021; Shilpa et al., 2022). Tipe TEC di pasar antara lain TEC1-12705, TEC1-12706, TEC1-12710, dan TEC1-12715. Modul TEC1-12715 memiliki performa baik untuk aplikasi kotak pendingin portabel. Berdasarkan penelitian, suhu kotak tanpa beban mencapai rata-rata 17,08°C, sedangkan dengan beban air 2, 4, dan 6 botol mencapai 21,56°C, 23,08°C, dan 24,74°C (Sormin et al., 2021).

Penelitian ini menguji kinerja kotak pendingin termoelektrik tersebut menggunakan beban buah apel varietas Manalagi (*Malus sylvestris*). Apel Manalagi merupakan buah lokal populer karena rasa manis, aroma khas, serta daya simpan baik. Penyimpanan suhu rendah terbukti menekan laju respirasi dan memperpanjang kesegarannya, sehingga komoditas ini sesuai menjadi sampel mengevaluasi performa pendinginan termoelektrik pada berbagai tingkat beban.

METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Alat dan Ergonomika, Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana. Penelitian ini berlangsung pada bulan Desember- Februari 2025.

Bahan Dan Alat

Penelitian menggunakan bahan buah Apel Manalagi dengan berat 6 kg berdiameter rata-rata 5,3 cm sesuai dengan perlakuan beban yang berbeda-beda yaitu beban 1 kg, 2 kg, dan 3 kg, lem styrofoam sebagai bahan untuk menggabungkan lembaran styrofoam, plastisin untuk menutup lubang pada sensor suhu dan lembaran styrofoam dengan ketebalan 4 cm sebagai bahan dinding *cooler box*. Sedangkan, alat yang akan digunakan *cooler box* dengan dinding berbahan styrofoam bervolume 11 liter dengan ketebalan 4 cm, panjang 25 cm, lebar 20 cm, dan tinggi 22 cm yang menggunakan 1 buah TEC-12715 sebagai pendingin yang dilengkapi dengan heatsink bertipe pipe DC 12V 0,27A beserta kipas alseye berdimensi 90×90×25 mm dan plat cold sink beserta kipas kecil nihon DC 12V 0,14A 60×60×25mm, multimeter digital sebagai alat mengukur beda potensial dan arus DC, 3 buah termometer dengan sensor termistor tipe NCT (*Negative Coefisien Temperature*) sebagai alat pengukur suhu di dalam kotak, di luar dan suhu pusat buah.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang meliputi persiapan alat dan bahan, pemberian perlakuan beban pada kotak penyimpanan dingin, pengukuran variabel penelitian selama proses pendinginan, serta perhitungan parameter kinerja kotak penyimpanan dingin berdasarkan data hasil pengamatan.

Persiapan Alat dan Bahan

Adapun beberapa persiapan percobaan yang akan dilakukan, seperti buah apel Manalagi akan disortir untuk memilih buah yang utuh dan segar akan dijadikan buah pembeban pendinginan kotak, kotak penyimpanan berpendingin TEC-12715 dioperasikan dan bila ada komponen-komponennya yang tidak bekerja akan dilakukan perbaikan-perbaikan, pengecekan termometer dengan sensor termistor tipe NCT (*Negative Coefisien Temperature*) dicoba dengan melakukan pengukuran suhu.

Pemberian Perlakuan Beban Pada Kotak Penyimpan Dingin

Perlakuan dilakukan dengan memasukkan buah apel varietas Manalagi ke dalam kotak pendingin berbasis TEC1-12715 bervolume 11 liter. Variasi beban pengujian terdiri atas tiga taraf yaitu 1 kg, 2 kg, dan 3 kg. Setelah komoditas dimasukkan, sistem dioperasikan selama 60 menit. Data untuk analisis statistik diambil pada waktu pengamatan menit ke-20, ke-40, dan ke-60.

Pengukuran Variabel Penelitian Selama Proses Pendinginan

Pengukuran variabel penelitian mengacu pada suhu lingkungan (T_1), suhu di dalam kotak penyimpan dingin (T_2), suhu pusat buah (T_3), beda potensial (V), dan arus listrik searah (A). Pengukuran suhu menggunakan termometer yang dilengkapi sensor termistor tipe NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Untuk suhu lingkungan (T_1), sensor diletakkan di luar dengan jarak 10 cm dari dinding luar kotak. Sementara itu, pengukuran suhu di dalam kotak penyimpan dingin (T_2) dilakukan dengan meletakkan sensor pada atas kotak dengan posisi di atas berjarak 4 cm dari kipas, dimana pencatatan dilakukan setiap 2 menit selama 1 jam percobaan. Untuk suhu pusat buah (T_3), sensor NTC dipasang langsung pada bagian pusat atau di tengah-tengah buah apel Manalagi, dengan posisi buah diletakkan secara konsisten di tengah dasar kotak pada setiap variasi pembebanan. Selanjutnya, pengukuran tegangan dan arus listrik searah (DC) dilakukan menggunakan VA meter digital yang dipasang pada rangkaian *power supply* sehingga mampu menampilkan kedua nilai tersebut secara bersamaan selama sistem pendingin beroperasi. Nilai tegangan dan arus ini dicatat setiap 2 menit selama 60 menit pengamatan, kemudian data spesifik pada menit ke-20, 40, dan 60 diambil untuk digunakan dalam analisis statistik.

Perhitungan Kinerja Alat Penyimpanan Berpendingin TEC

Kinerja kotak penyimpanan dingin dihitung dengan mempertimbangkan beban panas dari lingkungan yang memasuki ruang penyimpanan kotak melalui dinding kotak, beban panas udara di dalam kotak, panas sensibel buah, respirasi buah, panas total, daya DC dan koefisien kinerja sistem sebagai efisiensi keseluruhan sistem. Persamaan matematika yang digunakan untuk menghitung kinerja kotak penyimpanan dingin.

Panas Udara di dalam kotak (Q_u)

Menurut Mirmanto et al. (2019), perpindahan panas dari dalam ruangan *cooler box* dan panas yang masuk ke dalam *cooler box* merupakan beban panas yang harus dipindahkan dari dalam ruangan *cooler box* ke lingkungan. Beban panas tersebut dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_{u(i)} = \frac{m_{(i)} c_{p(i)} (T_{(i-1)} - T_{(i)})}{(t_{(i)} - t_{(i-1)})} \quad [1]$$

Dengan keterangan:

$Q_{u(i)}$ = panas udara di dalam kotak (W)

$m_{(i)}$ = massa udara (kg)

$c_{p(i)}$ = panas jenis udara ($J/kg^{\circ}C$)

$T_{(i-1)}$ = suhu udara pada waktu $t_{(i-1)}$ ($^{\circ}C$)

$T_{(1)}$ = suhu udara pada waktu $t_{(i)}$ ($^{\circ}C$)

t = waktu (s)

Panas Sensibel buah (Qb)

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Mirmanto et al. (2019), untuk menghitung panas sensibel buah yang akan menjadi beban, dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{b(i)} = \frac{m_{(i)} c_{p(i)} (T_{(i-1)} - T_{(i)})}{(t_{(i)} - t_{(i-1)})} \quad [2]$$

Dengan keterangan:

$Q_{b(i)}$ = panas buah di dalam kotak (W)

$m_{(i)}$ = massa buah (kg)

$c_{p(i)}$ = panas jenis buah ($J/kg^{\circ}C$)

$T_{(i-1)}$ = suhu buah pada waktu $t_{(i-1)}$ ($^{\circ}C$)

$T_{(1)}$ = suhu buah pada waktu $t_{(i)}$ ($^{\circ}C$)

t = waktu (s)

Panas konduksi melalui dinding kotak (Qk)

Mirmanto et al. (2019) menjelaskan karena ruangan *cooler box* temperaturnya lebih rendah dari pada temperatur lingkungan, maka terjadilah perpindahan panas konduksi dari lingkungan menuju ruangan *cooler box* dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{k(i)} = \frac{(T_{wi(i)} - T_{wo(i)})}{R} \quad [3]$$

Dengan keterangan:

$Q_{k(i)}$ = panas konduksi pada dinding (W)

$T_{wi(i)}$ = Suhu di permukaan bagian luar ($^{\circ}C$)

$T_{wo(i)}$ = Suhu di permukaan bagian dalam ($^{\circ}C$)

Untuk mencari nilai R (resistansi termal) dengan persamaan:

$$R = \frac{x}{kA} \quad [4]$$

Dengan keterangan:

R = Resistansi termal dinding ($^{\circ}C/W$)

x = Ketebalan dinding (m)

k = Konduktivitas termal bahan dinding ($W/m^{\circ}C$)

A = Luas permukaan dinding (m^2)

Panas Respirasi Buah (Qres)

Panas respirasi adalah jumlah panas yang dilepaskan oleh buah selama proses respirasi. proses ini melibatkan pemecahan gula menjadi energi yang dibutuhkan buah untuk tumbuh dan matang. Menurut Teledo dalam penelitian Diputra. (2021) mengatakan bahwa panas respirasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$Q_{res} = a \exp(bT) \quad [5]$$

Dengan keterangan:

Q_{res} = Panas respirasi

Nilai a dan b didapatkan dari *ASHRAE Handbook 2014*

T = suhu awal buah ($^{\circ}C$)

ΔT = pengurangan suhu awal buah ke menit setelah ($^{\circ}C$)

Panas Total (Qc)

Menurut Mirmanto et al. (2019) semua laju aliran panas (panas total) dalam *cooler box* menggunakan persamaan untuk menghitung kontribusi dari konveksi, radiasi, dan konduksi guna mendapatkan total panas dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_c = Q_u + Q_b + Q_k + Q_{res} \quad [6]$$

Dengan keterangan:

Q_c = panas total

Q_u = panas udara di dalam kotak

Q_a = panas sensibel buah yang disimpan

Q_k = panas konduksi

Q_{res} = panas respirasi

Daya DC yang diperlukan sistem (Pin)

Penelitian yang dilakukan Pujiyatmoko et al. (2014) menghitung daya listrik pada catu daya DC (*Direct Current*), menggunakan persamaan di bawah untuk menganalisis kebutuhan daya dari berbagai komponen sistem.

$$P_{in} = VI \quad [7]$$

Dengan keterangan:

P_{in} = Daya listrik yang diperlukan oleh sistem (W)

V = Tegangan listrik pada sistem (V)

I = Arus listrik yang mengalir melalui sistem (A)

Koefisien kinerja sistem (COP)

Mirmanto et al. (2019) menganalisis kinerja COP (*Coefficient of Performance*) dihitung untuk menilai efisiensi keseluruhan sistem, menggunakan persamaan berikut.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad [8]$$

Dimana COP adalah indikator kinerja dari kotak pendingin.

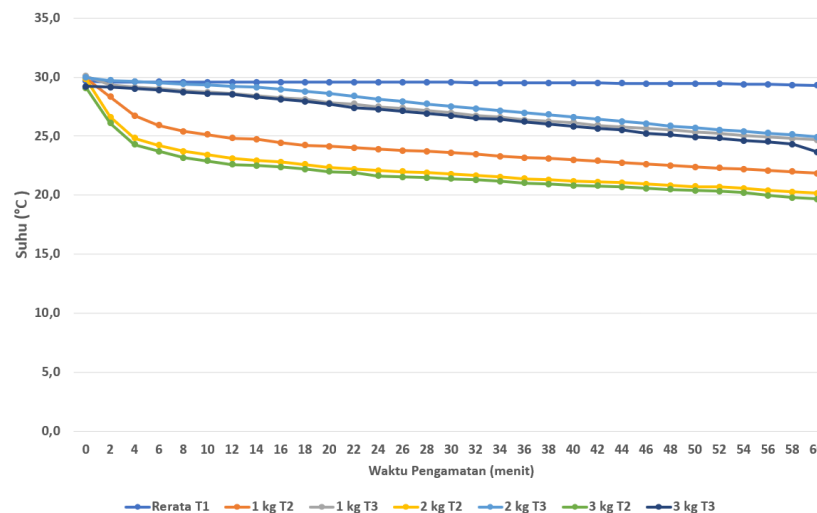
Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengujian kemudian dianalisis berdasarkan beban pendinginan (1 kg, 2 kg, dan 3 kg) dan lama waktu pendinginan (20 menit, 40 menit, dan 60 menit). Metode analisis yang digunakan adalah *Two Way ANOVA (Analysis of Variance)* karena terdapat dua faktor yang diuji dan keduanya diduga berpengaruh terhadap *Coefficient of Performance (COP)* sistem (Junaidi et al., 2021). Apabila hasil analisis menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan ($p < 0,05$), maka dilakukan uji lanjut menggunakan *Tukey Honestly Significant Difference (HSD)* untuk mengetahui perbedaan nyata antar kelompok perlakuan. Seluruh proses analisis statistik dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SPSS versi 20 (Arif et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Suhu Di Luar, Di Dalam Kotak, Suhu Pusat Buah, Volt dan Ampere.

Pada Gambar 1, beban pendinginan 1 kg suhu dalam kotak (T_2) menurun dari 29,9 °C menjadi 21,9 °C dalam 60 menit, dengan penurunan tercepat pada 10 menit pertama sebelum mencapai kondisi stabil. Suhu pusat buah (T_3) turun lebih lambat, dari 29,9 °C menjadi 24,7 °C, karena apel memiliki kapasitas panas lebih tinggi (3,6–3,8 kJ/kg·°C) dibandingkan udara (1,006 kJ/kg·°C). Hal ini sesuai dengan data ASHRAE Handbook yang menjelaskan bahwa bahan dengan kapasitas panas tinggi, seperti apel, membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai keseimbangan termal dengan lingkungannya.



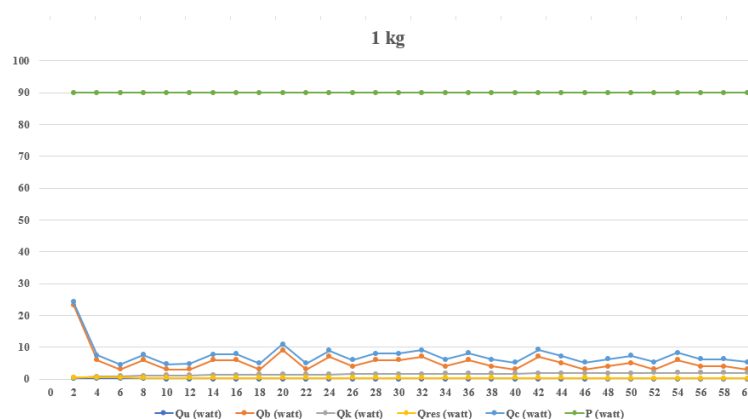
Gambar 1. Grafik pengukuran suhu pada setiap beban.

Pada beban pendinginan 2 kg, suhu dalam kotak (T2) turun dari 29,9 °C menjadi 20,2 °C selama 60 menit, dengan penurunan tercepat pada 10 menit pertama sebelum mendekati kondisi stabil. Suhu pusat buah (T3) juga menurun dari 30,0 °C menjadi 24,9 °C. Suhu dalam kotak (T2) lebih rendah dibandingkan beban 1 kg, menunjukkan bahwa massa beban yang lebih besar mempercepat pelepasan panas ke sistem pendingin. Namun, suhu buah tetap lebih tinggi karena kapasitas panas apel yang besar, sehingga pendinginan bagian dalam berlangsung lebih lambat (Hussain et al., 2021).

Pada beban pendinginan 3 kg, suhu udara dalam kotak turun (T2) dari 29,1 °C menjadi 19,7 °C, sedangkan suhu pusat buah (T3) menurun dari 29,3 °C menjadi 23,7 °C selama 60 menit. Penurunan suhu udara lebih cepat dibandingkan suhu buah, menunjukkan adanya kelembaman termal pada buah yang menyebabkan pendinginan inti berlangsung lebih lambat (Hussain et al., 2021).

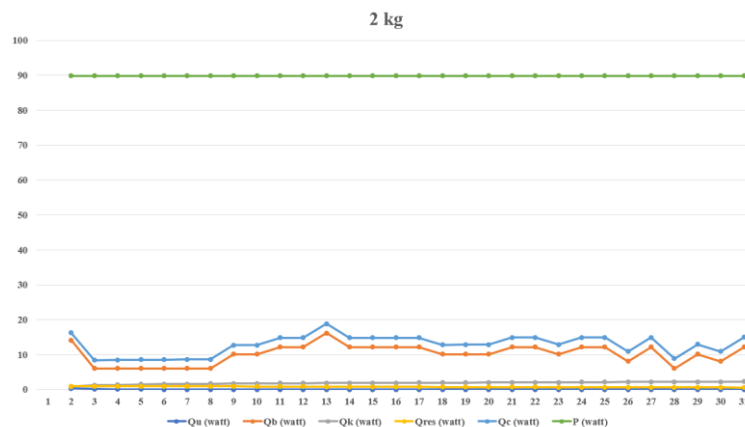
Pengujian variasi beban pendinginan 1–3 kg menunjukkan daya listrik sistem relatif konstan sebesar 89,88 W pada tegangan 12 V dan arus rata-rata 7,49 A. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan massa buah tidak memengaruhi konsumsi daya modul thermoelectric karena tegangan masukan dipertahankan tetap. Temuan ini sejalan dengan Dąbrowska et al. (2023) dan Siahmargoi et al. (2019) yang menyatakan konsumsi daya TEC lebih dipengaruhi karakteristik listrik modul. Penelitian ini berkontribusi menunjukkan bahwa variasi beban memengaruhi performa termal dan nilai COP tanpa meningkatkan kebutuhan daya listrik.

Hasil Perhitungan Panas Udara Di Dalam Kotak, Panas Sensibel Buah, Panas Konduksi Melalui Dinding Kotak, Panas Respirasi Buah, Panas Total, Daya dan COP.



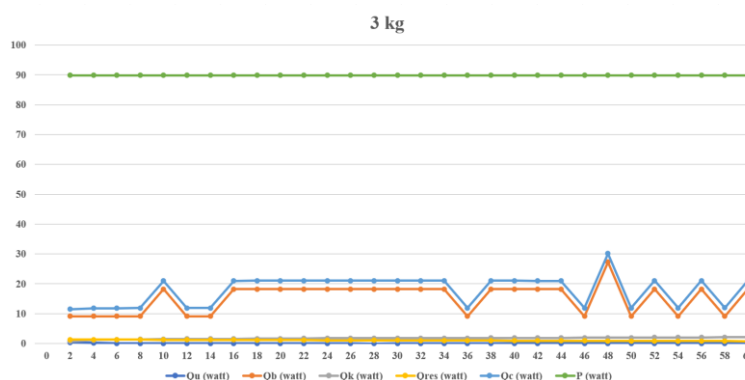
Gambar 1. Grafik hasil perhitungan panas dan daya pada beban 1 kg.

Pada Gambar 2, beban pendinginan 1 kg, distribusi antar komponen menunjukkan dinamika termal sistem yang seimbang. Panas sensibel buah (Q_b) awalnya tinggi sebesar 17,19 W, lalu menurun ke kisaran 3,03–9,10 W seiring turunnya suhu inti buah. Panas udara di dalam kotak (Q_u) sangat kecil, dari 0,17 W menjadi 0,01–0,03 W, karena kapasitas panas udara rendah (ASHRAE, 2018). Panas konduksi dinding (Q_k) meningkat dari 0,35 W menjadi 2,02 W akibat perbedaan suhu dalam–luar kotak, sedangkan panas respirasi buah (Q_{res}) menurun dari 0,48 W ke 0,28 W seiring turunnya aktivitas respirasi pada suhu rendah (Nugraha et al., 2024). Total panas (Q_c) menurun dari 18,19 W menjadi sekitar 4–9 W, sementara daya listrik (P) stabil di 89,88 W. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan panas antar komponen disebabkan oleh redistribusi panas, bukan daya listrik, sesuai prinsip pendinginan termoelektrik (Enescu et al., 2018).



Gambar 2. Grafik hasil perhitungan panas dan daya pada beban 2 kg.

Pada Gambar 3, beban pendinginan 2 kg, daya listrik sistem tetap stabil pada 89,88 W selama pengujian, menandakan bahwa perubahan panas antar komponen disebabkan oleh distribusi panas, bukan daya (Enescu et al., 2018). Panas udara (Q_u) awalnya 0,35 W lalu menurun ke 0,01–0,02 W, menunjukkan pendinginan cepat karena udara memiliki kapasitas panas kecil (ASHRAE, 2018). Panas sensibel buah (Q_b) berada pada kisaran 6–16 W, mencerminkan inersia termal buah yang membuat pelepasan panas dari inti berlangsung lebih lambat, dan meningkatnya massa beban memperbesar kebutuhan pendinginan (James et al., 2010). Panas konduksi dinding (Q_k) naik dari 0,76 W menjadi 2,25 W akibat meningkatnya gradien suhu (Aziz et al., 2017), sedangkan panas respirasi buah (Q_{res}) menurun dari 0,97 W menjadi 0,58 W seiring penurunan suhu (Ferdousi et al., 2024). Panas total (Q_c) antara 8,4–18,8 W dan mengikuti pola Q_b , menunjukkan bahwa panas sensibel buah menjadi komponen utama beban pendinginan.

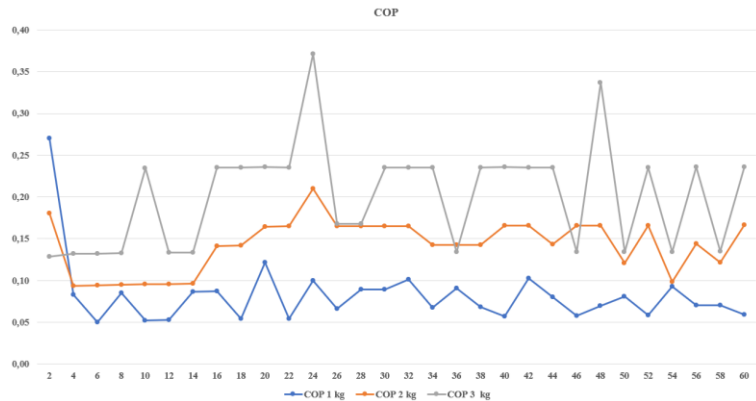


Gambar 3. Grafik hasil perhitungan panas dan daya pada beban 3 kg.

Gambar 4 memperlihatkan variasi komponen laju perpindahan panas (Q_u , Q_b , Q_k , Q_{res} , Q_c) dan daya listrik (P_{in}) beban 3 kg. Nilai Q_u relatif kecil (0,33–0,07 W) dan cepat mendekati nol karena kapasitas panas spesifik udara rendah, sehingga lebih cepat mencapai kesetimbangan termal dibanding buah (ASHRAE, 2018). Komponen terbesar didominasi Q_b yang melandai seiring penurunan suhu pusat

apel Manalagi akibat pengaruh inersia termal inti buah (Hussain et al., 2021). Secara kumulatif, kontribusi energi Q_b hingga menit ke-48 menjadi beban termal dominan terhadap Q_c . Sementara itu, Q_k relatif kecil dan stabil (0,76–2,19 W), membuktikan material styrofoam memiliki konduktivitas termal rendah yang efektif menghambat aliran kalor masuk (Bae et al., 2022). Nilai Q_{res} juga kecil (0,76–1,38 W) dan menurun seiring suhu kotak, sesuai teori bahwa penyimpanan dingin menekan laju respirasi komoditas klimakterik (Ferdousi et al., 2024). Q_c bergerak turun stabil menuju kondisi steady state, sedangkan daya sangat konstan pada 89,88 W. Konsistensi daya ini memperkuat teori bahwa dinamika pendinginan termoelektrik murni dipengaruhi karakteristik termal, massa, dan kapasitas panas spesifik beban (Chavan et al., 2022).

Coefficient of Performance (COP)



Gambar 4. Coefficient of Performance (COP) pada setiap beban.

Gambar 5 memperlihatkan nilai *Coefficient of Performance* (COP) ketiga variasi beban berfluktuasi karena panas total (Q_c) terus berubah mengikuti gradien suhu, sementara daya listrik konstan. Pada beban 1 kg, grafik COP konsisten terendah di bawah 0,10—menyentuh angka 0,06 pada menit ke-40 dan ke-60—menunjukkan ekstraksi kalor kecil sehingga pemanfaatan energi belum optimal. Sebaliknya, pada beban 2 kg, COP meningkat signifikan mencapai 0,16 pada menit ke-20 dan stabil di kisaran 0,17 hingga menit ke-60, membuktikan peningkatan massa menaikkan efisiensi penyerapan kalor. Nilai COP tertinggi dicapai beban 3 kg di posisi teratas, mencatat angka 0,24 pada menit ke-20, ke-40, dan ke-60. Fenomena ini selaras dengan teori bahwa COP berbanding lurus dengan beban kalor; saat sistem mengatasi kapasitas beban masif dengan daya tetap, rasio unjuk kerja meningkat otomatis. Hasil ini sejalan dengan optimalisasi modul TEC1-12715 (Pathak et al., 2017) dan kapasitas pembebanan yang mendongkrak nilai COP (Ananta et al., 2017). Ringkasan nilai COP disajikan pada Tabel 1.

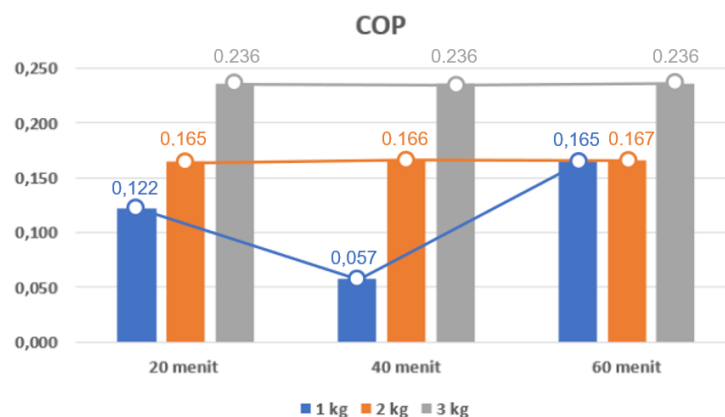
Tabel 1. Rata-rata dan Standar Deviasi Nilai COP Kotak Penyimpan Dingin pada Berbagai Beban Buah Apel Manalagi dan Waktu Pengamatan.

Beban Buah Apel Manalagi (B)	Waktu Pengamatan (L)	Rata-rata	STd ±
1 kg	20 menit	0,122	0,119±0,125
	40 menit	0,057	0,053±0,061
	60 menit	0,059	0,056±0,063
2 kg	20 menit	0,165	0,163±0,166
	40 menit	0,166	0,164±0,167

	60 menit	0,167	0,165±0,168
3 kg	20 menit	0,236	0,234±0,237
	40 menit	0,236	0,234±0,237
	60 menit	0,236	0,233±0,237

Keterangan: STd adalah *Standard Deviation* (Standar Deviasi)

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata COP beban 1 kg berkisar 0,057–0,122, beban 2 kg sebesar 0,165–0,167, dan beban 3 kg mencapai 0,235–0,236. Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan keragaman rendah dan data konsisten. Secara umum, nilai COP meningkat seiring bertambahnya massa beban buah apel Manalagi dan berubah responsif terhadap setiap interval pengamatan



Gambar 5. Rerata nilai COP pada setiap beban pendinginan.

Nilai *Coefficient of Performance* (COP) tertinggi diperoleh pada beban 3 kg sebesar 0,236 (menit ke-20 dan ke-40) serta 0,235 (menit ke-60). Sebaliknya, COP terendah terjadi pada beban 1 kg sebesar 0,057 di menit ke-40, sementara beban 2 kg relatif stabil pada rentang 0,165–0,167. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar beban buah Manalagi, COP sistem termoelektrik cenderung meningkat. Sebagai indikator efisiensi, beban masif memiliki kapasitas panas tinggi yang menyerap kalor lebih besar, sehingga meningkatkan rasio kapasitas refrigerasi terhadap daya input konstan. Fenomena ini selaras dengan teori bahwa COP berbanding lurus dengan beban kalor yang dipindahkan selama pelepasan panas sisi panas dan dingin optimal. Temuan ini didukung oleh studi optimalisasi modul TEC1-12715 (Pathak et al., 2017) dan kapasitas pembebanan (Ananta et al., 2017). Hasil *Two-Way ANOVA* menunjukkan faktor beban, waktu, dan interaksinya berpengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap fluktuasi nilai COP pada Gambar 6. Perbedaan signifikan antar perlakuan tersebut kemudian divalidasi menggunakan uji lanjut *Tukey Honestly Significant Difference* (HSD) sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 . Hasil Uji Lanjut Tukey HSD terhadap Nilai COP pada Faktor Beban Buah Apel Manalagi dan Waktu Pengamatan.

Tukey HSD					
Beban	Rerata	Notasi	Waktu	Rerata	Notasi
1 kg (B1)	0,079	a	40 menit (L1)	0,152	a
2 kg (B2)	0,165	b	60 menit (L3)	0,154	a
3 kg (B3)	0,235	c	20 menit (L2)	0,174	b

Keterangan: Notasi huruf berbeda menunjukkan perbedaan signifikan ($P < 0,05$), sedangkan notasi sama menunjukkan tidak ada perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey HSD.

Uji Tukey HSD 5% menunjukkan beban 3 kg menghasilkan rata-rata COP tertinggi (0,235; notasi c), diikuti beban 2 kg (0,165; notasi b), dan beban 1 kg (0,079; notasi a) yang berbeda nyata (Ibikunle et al., 2022). Sementara itu, waktu 20 menit memberikan COP tertinggi (0,174; notasi b), sedangkan waktu 40 dan 60 menit tidak berbeda nyata (Chavan et al., 2022).

KESIMPULAN

Hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa variasi beban buah apel Manalagi (*Malus sylvestris*) berpengaruh signifikan terhadap kinerja kotak penyimpanan dingin berbasis TEC1-12715. Peningkatan beban dari 1 kg menjadi 3 kg menghasilkan penurunan suhu yang lebih besar serta meningkatkan kapasitas pendinginan dan nilai *Coefficient of Performance* (COP), sedangkan daya listrik sistem tetap relatif konstan sebesar 89,88 W. Selama pengamatan 60 menit, penurunan suhu udara di dalam kotak dan suhu buah terjadi pada seluruh perlakuan, dengan kinerja terbaik diperoleh pada beban 3 kg yang menghasilkan nilai COP rata-rata tertinggi sebesar 0,236. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi beban memengaruhi kinerja sistem pendingin termoelektrik tanpa meningkatkan konsumsi daya listrik, sehingga tujuan penelitian mengenai pengaruh variasi beban dan evaluasi kinerja sistem pada setiap waktu pengamatan telah tercapai.

DAFTAR PUSTAKA

- Ananta, Hendra, Yesung Allo Padang, and M. Mirmanto. 2017. "Unjuk Kerja Kulkas Termoelektrik Dengan Rangkaian Seri Dan Paralel Pada Beban Air 1500 Ml." *Dinamika Teknik Mesin* 7(2). doi:10.29303/d.v7i2.157.
- Arif, Dzaki Ade Alfarez, and M. Rizky Ramadhan. 2023. "Anova Dan Tukey HSD Perbandingan Produksi Padi Antara Tiga Kabupaten Di Provinsi Jambi." *Multi Proximity: Jurnal Statistika Universitas Jambi* 2(1).
- ASHRAE, 2006. *ASHRAE Handbook: Refrigeration*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE, 2018. *ASHRAE handbook: Refrigeration* (SI edition). Chapter 34: Thermal properties of foods. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Aziz, Azridjal, Rahmat Iman Mainil, Afdhal Kurniawan Mainil, Sayfri Syafri, and Muhammad Faizal Syukrillah. 2017. "Design of Portable Beverage Cooler Using One Stage Thermoelectric Cooler (TEC) Module." *Aceh International Journal of Science and Technology* 6(1):29–36. doi:10.13170/aijst.6.1.5427.
- Bae, Minjung, Hosang Ahn, Jaesik Kang, Gyeongseok Choi, and Hyunjung Choi. 2022. "Determination of the Long-Term Thermal Performance of Foam Insulation Materials through Heat and Slicing Acceleration." *Polymers* 14(22). doi:10.3390/polym14224926.
- Brahmanda Diputra, Bagus Made, Ida Bagus Putu Gunadnya, and I. Putu Gede Budisanjaya. 2021. "Modifikasi Kotak Polistiren Untuk Penyimpanan Dingin Sayur Kubis Dengan Menggunakan Es Kering Sebagai Media Pendingin." *Jurnal BETA (Biosistem Dan Teknik Pertanian)* 9(2). doi:10.24843/jbeta.2021.v09.i02.p08.
- Chavan, Prasad, Gagandeep Kaur Sidhu, and Amit K. Jaiswal. 2022. "Performance Evaluation of Mobile Liquid Cooled Thermoelectric Refrigeration System for Storage-Cum-Transportation of Fruits and Vegetables." *Foods* 11(13). doi:10.3390/foods11131896.
- Dąbrowska, Anna, Monika Kobus, Łukasz Starzak, and Bartosz Pękosiński. 2023. "Evaluation of Performance and Power Consumption of a Thermoelectric Module-Based Personal Cooling System—A Case Study." *Energies* 16(12). doi:10.3390/en16124699.
- Enescu, Diana. 2018. "Thermoelectric Refrigeration Principles." in *Bringing Thermoelectricity into Reality*.
- Ferdousi, J., M. I. Hossain, S. R. Saha, M. Rob, T. Afroz, S. Pramanik, M. R. Islam, and D. D. Nath. 2024. "POSTHARVEST PHYSIOLOGY OF FRUITS AND VEGETABLES AND THEIR MANAGEMENT TECHNOLOGY: A REVIEW." *Journal of Animal and Plant Sciences* 34(2).
- Hussain, Taliv, Mohd Ahsan Kamal, and Adnan Hafiz. 2021. "Comparative Analysis of Apple and Orange during Forced Convection Cooling: Experimental and Numerical Investigation." *AIMS Energy* 9(2). doi:10.3934/energy.2021011.

- Ibikunle, Rotimi Adedayo, Mutalubi Aremu Akintunde, Isaac Femi Titiladunayo, and Adekunle Akanni Adeleke. 2022. "Estimation of Coefficient of Performance of Thermoelectric Cooler Using a 30 W Single-Stage Type." *International Review of Applied Sciences and Engineering* 13(2). doi:10.1556/1848.2021.00322.
- James, S. J., and C. James. 2010. "The Food Cold-Chain and Climate Change." *Food Research International* 43(7). doi:10.1016/j.foodres.2010.02.001.
- Junaidi, Junaidi, Akhmad Asyari, Ulfa Lu'luilmaknun, Nilza Humaira Salsabila, and Ratna Yulis Tyaningsih. 2021. "The Application Two-Way of Analysis of Variance with Gender and Years Class." *AlphaMath : Journal of Mathematics Education* 7(1). doi:10.30595/alphamath.v7i1.9641.
- Mirmanto, M., S. Syahrul, and Yusi Wirdan. 2019. "Experimental Performances of a Thermoelectric Cooler Box with Thermoelectric Position Variations." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 22(1). doi:10.1016/j.jestch.2018.09.006.
- Nugraha, Bayu, An-Nidaa' Fatkhur Rahmah, Ira Ayuningsih, Devi Priyanti, and Fahrizal Yusuf Affandi. 2024. "A Comparative Study of Respiratory Activity of Tropical Products under Two Storage Conditions." *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)* 13(1). doi:10.23960/jtep-l.v13i1.269-277.
- Prashant Kumar Pathak, and Dr Lokesh Boriwal. 2017. "Performance Analysis of Water Cooled Thermoelectric Module TEC- 12715." *International Journal of Engineering Research And* V6(04). doi:10.17577/ijertv6is040333.
- Pujiyatmoko, Heru, Mochammad Facta, and Agung Warsito. 2014. "Perancangan Catu Daya Dc Terkontrol Untuk Rangkaian Resonansi Berbasis Kumparan Tesla." *Transient* 3(3).
- Siahmargoi, Marzieh, Nader Rahbar, Hadi Kargarsharifabad, Seyed Esmaeil Sadati, and Amin Asadi. 2019. "An Experimental Study on the Performance Evaluation and Thermodynamic Modeling of a Thermoelectric Cooler Combined with Two Heatsinks." *Scientific Reports* 9(1). doi:10.1038/s41598-019-56672-9.