



Pengaruh Ketebalan Dinding Kotak Pendingin Termoelektrik Terhadap Kinerja Kotak Penyimpanan Dingin Berbasis Tec1-12715

The Effect of Thermoelectric Cooler Box Wall Thickness on the Performance of a TEC1-12715-Based Cold Storage System

Sigit Aris Mahendra Putra, Ni Luh Yulianti*, Ida Ayu Gede Bintang Madrini

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

ABSTRAK

Penelitian untuk mengembangkan sistem pendingin yang ramah lingkungan terus dilakukan. Salah satu sistem pendingin ramah lingkungan yang banyak dikaji adalah sistem pendingin termoelektrik (Thermoelectric Cooler/TEC). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan dinding kotak pendingin dan lama pengoperasian alat terhadap kinerja pendinginan (COP) dan suhu di dalam ruangan penyimpanan kotak pendingin berbasis TEC1-12715. Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok (RAK) pola faktorial dua faktor. Perlakuan pertama berupa tiga variasi ketebalan dinding styrofoam, yaitu 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Perlakuan lainnya adalah lama pengamatan peroperasian alat dengan waktu pencatatan berkala 20, 40, dan 60 menit. Ruangan penyimpanan dari kotak pendingin bervolume 17,5 liter. Pengamatan dilakukan selama 60 menit dengan mengukur suhu di dalam kotak dan parameter kelistrikan seperti tegangan, dan arus DC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor ketebalan dinding kotak dan lama pengoperasian secara terpisah memberikan pengaruh yang sangat nyata ($p < 0,01$) terhadap nilai COP, namun interaksi keduanya tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Semakin tebal dinding kotak menyebabkan nilai COP menurun, sebaliknya semakin lama pengoperasian membuat COP meningkat. Nilai COP tertinggi yang berbeda nyata diperoleh pada ketebalan dinding 2 cm dengan nilai 0,123. Peningkatan ketebalan dinding kotak pendingin menyebabkan suhu ruangan penyimpanan kotak pendingin semakin tinggi. Suhu ruangan penyimpanan terendah diperoleh dari perlakuan ketebalan dinding kotak pendingin 2 cm yaitu sebesar 16,3°C.

Kata Kunci: ketebalan dinding, koefisien kinerja (COP), ketebalan dinding, kotak pendingin, pendinginan, termoelektrik

ABSTRACT

Research to develop environmentally friendly cooling systems continues to be carried out. One widely studied eco-friendly cooling system is the thermoelectric cooling (Thermoelectric Cooler/TEC) system. This study aims to determine the effect of cooler box wall thickness and device operating time on cooling performance (COP) and temperature inside the storage room of a TEC1-12715-based cooler box. The study utilized a two-factor factorial Randomized Block Design (RBD). The first treatment consisted of three variations of styrofoam wall thickness, namely 2 cm, 4 cm, and 6 cm. The other treatment was the device operating time with periodic recording intervals of 20, 40, and 60 minutes. The storage room of the cooler box had a volume of 17.5 liters. Observations were conducted for 60 minutes by measuring the temperature inside the box and electrical parameters such as DC voltage and current. The results showed that the factors of box wall thickness and operating time separately had a highly significant effect ($p < 0.01$) on the COP value, but their interaction had no significant effect ($p > 0.05$). Thicker box walls led to a decrease in the COP value; conversely, longer operating times increased the COP. The significantly highest COP value was obtained at a wall thickness of 2 cm with a value of 0.123. An increase in the cooler box wall thickness caused the storage room temperature to become higher. The lowest storage room temperature was obtained from the 2 cm cooler box wall thickness treatment, which was 16.3°C. (Roboto10 pt, Justify, Italic).

Keywords: Coefficient of performance, Cooler box, Cooling, Thermoelectric, Wall thickness

*Corresponding author:

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

Masuk: 01 Januari 2026;

Direvisi: 30 Februari 2025;

Diterima: 25 Maret 2025;

Terbit: 01 April 2025

PENDAHULUAN

Kebutuhan terhadap sistem penyimpanan berbasis kontrol suhu menjadi sangat krusial guna menjaga stabilitas mutu dan memperpanjang masa simpan berbagai komoditas pangan. Manajemen suhu yang baik di seluruh rantai pascapanen adalah kunci untuk menghindari kerugian pascapanen dan mempertahankan mutu bahan pangan segar (Mishra & Gamage, 2007). Salah satu bentuk dari manajemen mutu adalah pendinginan hasil pertanian segar. Pendinginan bahan segar dilakukan baik pada tahap masih di tempat produksi, di pengangkutan maupun di tahap penyimpanan.

Pendinginan dapat dilakukan dengan berbagai cara diantaranya dengan menggunakan mesin pendingin, es, atau es kering (Diputra et al., 2021). Mesin pendingin banyak dijadikan pilihan untuk menjaga suhu makanan dan minuman tetap dalam kondisi dingin (Mansyur, 2021). Kulkas adalah sebuah perangkat yang dirancang untuk menghasilkan suhu rendah atau suhu dingin (Priyono et al., 2014). Kelemahan dari kulkas adalah refrigeran yang mengandung CFC (Cloro Fluoro Carbon), ukurannya relatif besar dan berat. Untuk mengatasi masalah tersebut, diperlukan penggunaan kulkas yang tidak bergantung pada freon, seperti kulkas atau kotak pendingin berbasis termoelektrik (Ananta et al., 2017).

Thermoelectric Cooler (TEC) atau Peltier adalah suatu bagian dari perangkat elektronik yang memanfaatkan efek Peltier untuk menciptakan aliran panas (heat flux) di antara dua jenis material yang memiliki karakteristik yang berbeda (Ilham, 2021). Prinsip kerja termoelektrik didasarkan pada efek Seebeck, dengan aliran arus searah (DC) diterapkan pada elemen Peltier yang terdiri dari beberapa pasangan semikonduktor tipe p dan tipe n. Bila TEC diberikan catu daya DC maka mengakibatkan salah satu sisi elemen TEC menjadi dingin (menyerap panas), sementara sisi lainnya menjadi panas (melepas panas). Jika arah arus dibalik, efeknya juga terbalik, yaitu sisi yang sebelumnya dingin menjadi panas, dan sebaliknya (Delly et al., 2016). Teknologi pendingin termoelektrik adalah solid state technology yang dapat menjadi alternatif pengganti sistem kompresi uap dalam pendinginan. Jika dibandingkan dengan teknologi kompresi uap, teknologi pendingin termoelektrik lebih bersahabat dengan lingkungan, memiliki masa pakai yang panjang, ukurannya kompak, dan perawatannya mudah (Mirmanto et al., 2018).

Beberapa tipe TEC sudah ada di pasaran, contohnya TEC-12705, TEC-12706, TEC-12710 dan TEC1-12715. Penelitian mengenai kinerja alat pendingin yang menggunakan TEC1-12715 dalam proses pendinginan ruang kotak styrofoam masih terbatas (Sormin et al., 2021). Lebih lanjut Sormin et al. (2021) melaporkan bahwa penurunan suhu udara di dalam kotak styrofoam berpendingin TEC1-12715 belum cukup besar bila dibandingkan dengan kapasitas pendinginan yang dapat dihasilkan oleh TEC1-12715.

Kekurangan dari penggunaan kotak styrofoam dengan ketebalan sisi 2,5 cm dilaporkan oleh Diputra et al. (2021). Dinyatakan bahwa sebanyak 72,4% dari energi pendinginan yang dihasilkan oleh es kering digunakan untuk mengatasi panas lingkungan yang masuk melalui dinding kotak ke dalam ruang kotak penyimpanan. Sementara hanya 27,6% yang digunakan untuk mendinginkan kubis selama masa penyimpanan. Hal ini menandakan bahwa ketebalan dinding kotak styrofoam dengan tebal 2,5 cm belum cukup untuk menahan aliran panas dari lingkungan ke dalam kotak penyimpanan.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa kinerja pendinginan TEC1-12715 yang masih rendah dan besarnya panas lingkungan yang masuk ke dalam kotak penyimpanan, memerlukan kajian lebih lanjut. Penelitian dipandang perlu dilakukan dengan mencoba beberapa ketebalan dinding kotak penyimpanan dingin yang terbuat dari bahan styrofoam.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh ketebalan dinding terhadap kinerja termal kotak penyimpanan dingin termoelektrik dan mengetahui pengaruh antara variasi ketebalan dinding terhadap nilai koefisien kinerja (COP) pada sistem pendingin termoelektrik.

METODE

Metode Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Alat dan Ergonomika, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana. Penelitian ini dilakukan mulai dari bulan Desember 2024 – Januari 2025.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah lembaran styrofoam dengan ketebalan 2 cm, 4 cm (serta kombinasinya untuk ketebalan 6 cm) dan lem Fox. Alat yang digunakan adalah sebagai berikut: Modul termoelektrik TEC1-12715 (buatan China), Pendingin CPU 2 Heat Pipes (JONSBO CR-1200E) dan Kipas. Alat Ukur Suhu Digital (Sensor NTC) (buatan china), VA-Meter Digital (buatan china), Catu Daya (Power Supply) 12V 15A (buatan china), Kabel dan Konektor Listrik.

Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan menggunakan rancangan acak kelompok (RAK) pola faktorial 2 faktor. Faktor pertama berupa perlakuan ketebalan dinding kotak pendingin (K) dan faktor kedua adalah lama pengamatan pengoperasian alat pendingin (S). Dengan 3 taraf yaitu pencatatan pengamatan pengoperasian pada menit ke-20, menit ke-40 dan menit ke-60. Dengan demikian ada 9 interaksi perlakuan. Setiap interaksi perlakuan diulang sebanyak 3 kali sehingga diperoleh 27 satuan percobaan.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian mencakup 6 tahap kegiatan yaitu: (1) pengumpulan alat dan bahan percobaan, (2) pembuatan kotak pendingin (cooler box) dengan tebal dinding sesuai perlakuan, (3) pemasangan alat, (4) pengoperasian kotak pendingin, (5) pengamatan variabel penelitian, dan (6) pengolahan data hasil penelitian. Pengumpulan alat dan bahan percobaan. Kegiatan ini meliputi pengadaan alat-alat penyusun sistem pendingin seperti TEC1-12715, kipas dan heatsink, catu daya, dan kabel. Disamping itu diadakan pula lembaran styrofoam 2 cm dan 4 cm yang digunakan untuk membuat kotak pendingin. Pembuatan kotak pendingin. Kotak pendingin dibuat dengan menggunakan lembaran styrofoam. Untuk membuat kotak pendingin dengan ketebalan dinding sesuai perlakuan, lembaran styrofoam ditumpuk dan diberikan lem Fox untuk ketebalan 6 cm. pada tutup kotak diberikan lubang persegi untuk menempatkan sistem pendingin TEC1-12715. Kotak pendingin dibuat dengan 3 ketebalan yang berbeda mulai dari 2 cm, 4 cm, dan 6 cm, dengan dimensi dalam kotak 25 cm x 20 cm x 35 cm. Dengan demikian volume ruang penyimpanan kotak adalah 17,5 liter. Pemasangan alat. Pada tutup kotak pendingin dipasang sistem pendingin TEC1-12715 yang sudah dirakit dengan cold sink dan kipas di dalam ruang penyimpanan, heat sink dan heat pipe di luar kotak pendingin. Kabel-kabel dihubungkan antara sistem pendingin dengan catu daya DC. Pengoperasian kotak pendingin. Setelah seluruh alat dipasang maka dilakukan pengoperasian kotak pendingin. Kotak pendingin dioperasikan selama 60 menit. Pengamatan variabel penelitian. Variabel-variabel penelitian yang diamati adalah suhu lingkungan di luar kotak pendingin, suhu udara di dalam ruang penyimpanan kotak pendinginan, voltase dan arus DC. Pengamatan variabel ini dilakukan setiap 5 menit selama 60 menit pengoperasian alat. Pengolahan data hasil penelitian. Data hasil penelitian yang sudah dikumpulkan digunakan untuk menghitung beban pendinginan dan daya DC yang digunakan untuk menggerakkan sistem pendinginan dari kotak pendingin. Analisis statistik digunakan untuk mengetahui kinerja dan penentuan suhu ruang penyimpanan dari kotak pendingin.

Variabel yang diamati

Variabel yang diamati meliputi suhu lingkungan di luar kotak pendingin, dan suhu di dalam ruang penyimpanan dari kotak pendingin. Di samping suhu, diukur pula voltase DC dan arus DC yang digunakan oleh sistem pendingin selama pengoperasian alat.

Pengukuran Suhu

Suhu udara lingkungan dan suhu udara di dalam ruang penyimpanan dari kotak pendingin diukur dengan alat pengukur suhu digital. Pengukuran dilakukan dengan cara meletakkan sensor suhu NTC

di lokasi yang sudah ditetapkan. Untuk mengukur suhu lingkungan, sensor suhu diletakkan 10 cm di atas kotak pendingin, sedangkan untuk mengukur suhu di dalam ruangan penyimpanan kotak, suhu diletakkan di tengah-tengah ruangan kotak. Pengukuran dilakukan setiap 5 menit selama 60 menit pengoperasian alat. Suhu dicatat dari peraga alat ukur digital.

Pengukuran tegangan dan Arus DC

Untuk mengukur voltase DC dan arus DC yang digunakan oleh sistem pendingin, dipasang alat pengukur VA-meter digital. Pada layar alat pengukur dapat dilihat nilai voltase dan arus DC setiap 5 menit selama 60 menit pengoperasian alat.

Perhitungan untuk Pengukuran Kinerja Alat Pendingin

Perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) sampai (6) sebagaimana dijelaskan oleh Ananta et al. (2017), Mirmanto et al. (2018), Mirmanto et al. (2019a), Mirmanto et al. (2019b), dan Munawir (2020). Namun persamaan (2) tidak digunakan karena dalam penelitian ini tidak menggunakan air sebagai beban pendinginan. Dengan demikian sumber panas yang Menyusun panas total sebagai beban pendinginan hanya berupa panas dari udara (Q_u) di dalam ruangan penyimpanan kotak dan panas konduksi (Q_k).

COP

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad [1]$$

Beban panas udara

$$Q_u = m_u c p_u dT_u \quad [2]$$

beban panas air

$$Q_a = m_a c p_a dT_a \quad [3]$$

beban panas konduksi

$$Q_k = \frac{k A d T_u}{x} \quad [4]$$

Beban pendinginan

$$Q_c = Q_u + Q_a + Q_k \quad [5]$$

Daya DC yang diperlukan oleh sistem pendingin

$$P_{in} = VI \quad [6]$$

Dimana:

Q_u = beban panas udara di dalam ruang penyimpanan dingin kotak (W)

Q_a = beban panas air di dalam ruang penyimpanan dingin kotak (W)

Q_k = beban panas konduksi melalui dinding kotak (W)

Q_c = beban panas total yang merupakan beban pendinginan (W)

m_u, m_a = berat udara, berat air (kg)

$c p_u, c p_a$ = panas jenis udara, panas jenis air (kJ/kg°C)

dT_u, dT_a = perbedaan suhu udara, perbedaan suhu air (°C)

A = luas permukaan kotak (m²)

x = tebal dinding kotak (m)

P_{in} = daya DC yang diperlukan oleh sistem pendingin (W)

V, I = voltase DC (volt), arus DC (ampere)

Beban panas yang masuk dari lingkungan ke dalam kotak melalui dinding kotak pendingin

Panas yang mengalir dari lingkungan ke dalam kotak penyimpanan dingin melalui dinding kotak dianggap hanya terjadi secara konduksi. Pindah panas secara konduksi dihitung dengan rumus berikut ini (Cengel & Ghajar, 2015).

$$Q_k = -kA_d \frac{\Delta T_{u(t)}}{\Delta x} \quad [7]$$

Dimana :

Q_k = jumlah panas yang dimasuki ruang penyimpanan kotak pendingin (W)
 A_d = luas permukaan dinding kotak pendingin (m²)
 k = koefisien pindah panas konduksi bahan dinding kotak pendingin (W/m.oC)
 Δx = tebal dinding kotak pendingin (m)
 ΔT_u = perbedaan suhu udara lingkungan dengan udara di dalam kotak (oC)

Beban panas dari udara di dalam ruang penyimpanan kotak pendingin

$$Q_u = m_{ui} x c p_u \frac{(T_{ui(t)} - T_{ui(t+1)})}{\Delta t} \quad [8]$$

Dimana:

Q_u = Beban panas udara dalam ruang penyimpanan kotak pendingin (W)
 m_{ui} = Masa udara di dalam kotak pendingin (W/moC)
 $c p_u$ = panas jenis udara (J/kg oC) = 1005 J/kg oC
 $T_{ui(t)}$ = suhu udara saat t (oC)
 $T_{ui(t+1)}$ = suhu udara saat t+1 (oC)
 Δt = selang waktu pengamatan (detik)

Beban panas pendinginan

$$Q_{tot} = Q_w + Q_{ai} \quad [9]$$

Dimana:

$Q_{cooling}$ = beban panas pendinginan ()

Daya Listrik DC

$$P = V \cdot I \quad [10]$$

Dimana:

P = daya (W)
 V = beda potensial (V)
 I = Arus (A)

Koefisien kinerja kotak pendingin

$$COP = \frac{Q_{tot}}{P} \quad [11]$$

Dimana:

COP = Koefisien kinerja
 Q_{tot} = Beban pendinginan (W)
 P = Daya (W)

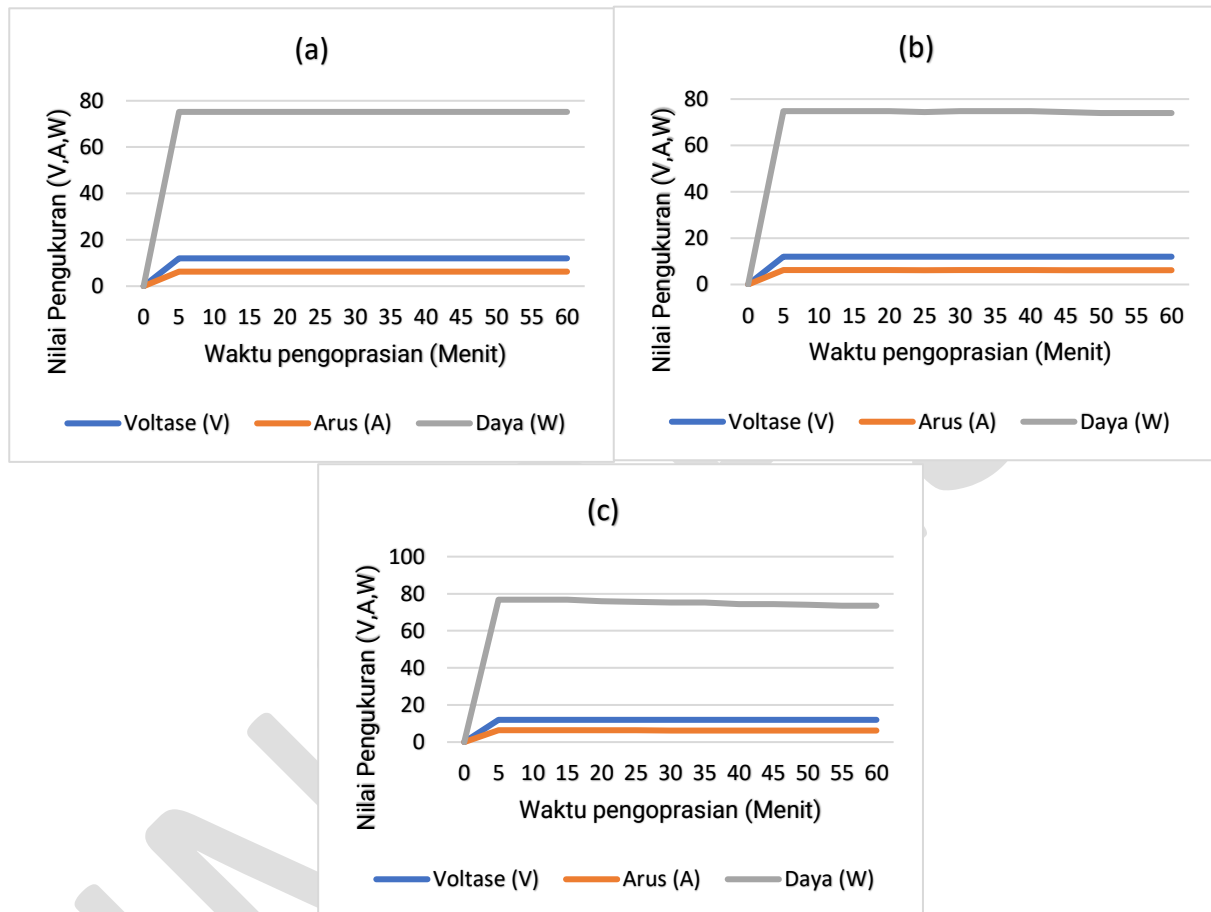
Analisis Data

Data hasil penelitian untuk kinerja yang berupa koefisien kinerja (COP) dan data suhu udara di dalam ruangan penyimpanan kotak pendingin dianalisis dengan menggunakan sidik ragam (ANOVA). Bila perlakuan memberikan pengaruh nyata atau sangat nyata maka analisis dilanjutkan dengan menggunakan uji BNT 5%. Analisis statistik dilakukan dengan menggunakan software Excel. Untuk data hasil pengukuran lainnya disajikan dalam bentuk uraian deskriptif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tegangan, Arus, dan Daya Catu Daya Alat Pendingin selama Pengamatan

Daya adalah besaran yang menunjukkan laju perubahan energi atau laju penggunaan energi dalam suatu sistem per satuan waktu. Besarnya daya DC dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti tegangan (V) dan Arus (I) DC. Semakin tinggi tegangan, semakin besar daya yang dapat dihasilkan, dengan asumsi arusnya tetap, sedangkan semakin besar arus listrik yang mengalir, semakin besar daya yang digunakan. Grafik dalam gambar di bawah ini menunjukkan perubahan tegangan, arus, dan daya DC selama pengamatan untuk setiap perlakuan.



Gambar 1 Nilai rata-rata Voltase, Arus, dan Daya Catu Daya Alat Pendingin Cooler box selama Pengamatan

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tegangan pada setiap kotak pendingin dan percobaan tetap stabil, yaitu 12 V. Sementara itu, rata-rata arus listrik pada kotak pendingin dengan tebal dinding 2 cm di kisaran 6,3 A, sedangkan pada kotak pendingin dengan tebal dinding 4 cm berkisar 6,2 A, untuk kotak pendingin dengan tebal dinding 6 cm berada dalam rentang 6,1 A hingga 6,4 A. Secara keseluruhan, arus listrik DC cenderung meningkat seiring berjalannya waktu.

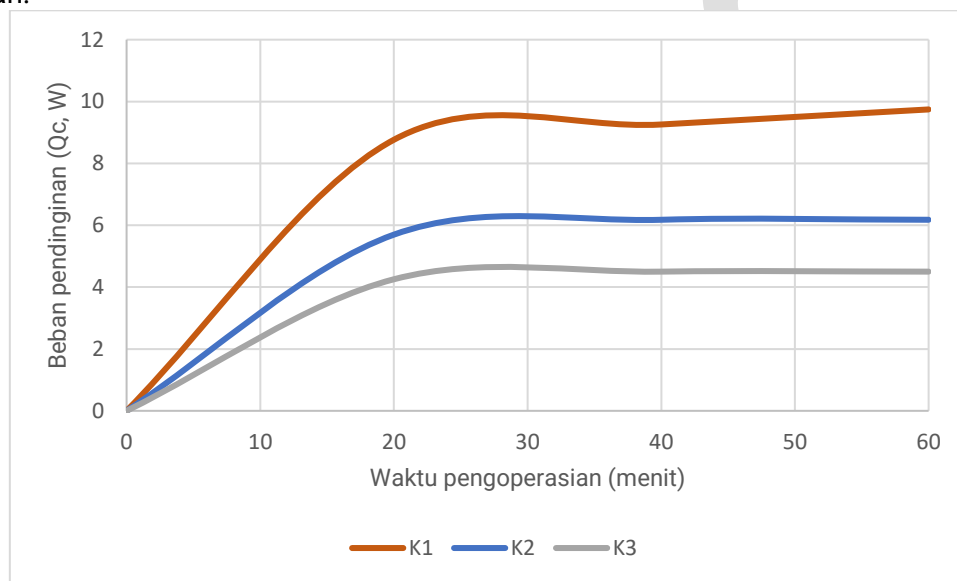
Peningkatan tegangan dan arus listrik berhubungan langsung dengan daya DC yang dikonsumsi oleh kotak pendingin untuk mendinginkan ruang di dalamnya. Grafik di atas menunjukkan bahwa perubahan rata-rata daya DC untuk kotak pendingin dengan tebal dinding 2 cm adalah 75,2 Watt, untuk kotak pendingin dengan tebal dinding 4 cm 74,5 Watt, dan kotak pendingin dengan tebal dinding 6 cm 75,2 Watt.

Beban pendinginan

Beban pendinginan (Q_c) merupakan penjumlahan dari beberapa jenis panas seperti panas udara di dalam ruang penyimpanan dari kotak pendingin (Q_u) dan panas konduksi (Q_k) yang mengalir melalui

dinding kotak pendingin. Gambar 6 di bawah menggambarkan beban panas dari sistem pendinginan selama pengoperasian alat 60 menit. Dari grafik terlihat bahwa beban pendinginan untuk kotak yang dibuat dari dinding dengan tebal 2 cm bernilai paling tinggi, beban pendingin untuk kotak pendingin dengan tebal dinding 4 cm lebih rendah, sedangkan beban pendinginan terendah adalah dari kotak dengan tebal dinding 6 cm.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa ketebalan dinding mempengaruhi beban pendinginan yang harus dibuang oleh sistem pendinginan. Semakin tebal dinding kotak pendingin maka semakin kecil beban panas pendinginan. Berdasarkan pada jenis panas dari sistem pendinginan, ternyata panas konduksi merupakan sumber panas terbesar dari panas total yang menjadi beban pendinginan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Sormin et al. (2021). Mereka melaporkan bahwa energi lebih banyak digunakan untuk mengatasi panas yang berasal dari lingkungan. Panas ini masuk ke dalam sistem penyimpanan dingin melalui dinding alat penyimpanan.



Gambar 2 Beban pendinginan (W) selama pengoperasian alat pendingin

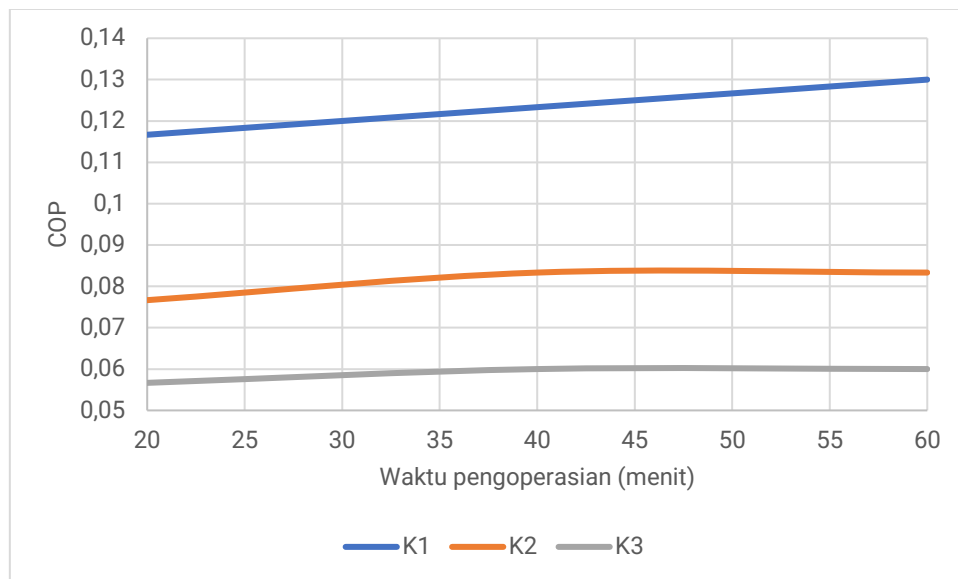
Muharom & Rifky. (2022) mengatakan bahwa direkomendasikan menggunakan lebaran styrofoam sebagai penyusun dinding alat penyimpanan dingin, karena jenis lembaran ini memiliki konduktivitas termal yang rendah. Nilai konduktivitas yang rendah menyebabkan laju perpindahan panas menjadi rendah. Dengan demikian, semakin tebal lapisan dinding styrofoam, semakin kecil perpindahan panas yang terjadi, sehingga beban pendinginan juga menjadi semakin kecil.

Kinerja Kotak Pendingin

Koefisien kinerja (COP) merupakan seberapa banyak panas (energi berguna) yang dipindahkan dibandingkan dengan energi yang digunakan untuk melakukannya. Koefisien kinerja kotak pendingin dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 1. Gambar 3 memperlihatkan bahwa selama pengoperasian alat 60 menit nilai kinerja dari kotak pendingin yang dibuat dengan tebal dinding 2 cm (K1) memiliki nilai kinerja paling tinggi. Selanjutnya disusul oleh nilai kinerja dari kotak pendingin dengan ketebalan dinding 4 cm (K2). Koefisien terendah diperoleh dari kotak kinerja yang dibuat dengan ketebalan dinding 6 cm (K3).

Koefisien kinerja adalah perbandingan antara beban panas dengan daya yang dibutuhkan untuk memindahkan beban panas dari ruang penyimpanan dingin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panas yang dipindahkan dari kotak dengan ketebalan dinding yang lebih tipis lebih besar daripada kotak dengan dinding lebih tebal, pada keadaan daya listrik yang dibutuhkan relatif sama. Terkait hubungan antara pindah panas dengan ketebalan dinding, menurut Cengel & Ghajar (2015) selalu

terjadi bahwa semakin tebal dinding tempat pindah panas maka pindah panas yang terjadi semakin menurun. Jadi terjadi perbedaan dan dengan demikian temuan ini perlu dikonfirmasi lebih lanjut.



Gambar 3 Kurve koefisien kinerja (COP) kotak pendingin selama pengoperasian 60 menit

Berdasarkan hasil sidik ragam (Lampiran 1) interaksi perlakuan (KS) tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap nilai koefisien kinerja (COP) alat. Perlakuan ketebalan dinding kotak (K) dan perlakuan lama pengoperasian alat (S) berpengaruh sangat nyata ($p < 0,01$) terhadap koefisien kinerja alat. Tabel 2 menunjukkan hasil uji BNT 5% dari data koefisien kinerja kotak pendingin.

Tabel 1 Nilai rata-rata koefisien kinerja (COP) kotak pendingin

Tebal dinding	Lama pengoperasian (menit)			Rata-rata
	20	40	60	
2 cm	0.12	0.12	0.13	0.123 ^a
4 cm	0.08	0.08	0.08	0.081 ^b
6 cm	0.06	0.06	0.06	0.059 ^c
Rata-rata	0.083 ^b	0.089 ^{ab}	0.091 ^a	

Keterangan: Nilai rata-rata pada kolom dan baris yang diikuti dengan huruf yang sama menyatakan tidak berbeda nyata ($p > 0,05$)

Berdasarkan data di dalam Tabel 1, COP tertinggi yang berbeda nyata ($p < 0,05$) tercatat pada kotak pendingin dengan tebal dinding 2 cm (K1), dengan rata-rata sebesar 0,123. Nilai COP terendah yang berbeda nyata ($p < 0,05$) dengan perlakuan tebal dinding lainnya ditemukan pada kotak dengan tebal dinding 6 cm (K3) dengan nilai COP rata-rata 0,059.

Dari perlakuan lama pengoperasian alat diketahui bahwa COP alat dari perlakuan S1 berbeda nyata ($p < 0,05$) dengan S3 (pengoperasian alat 60 menit), tetapi tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) pada lama pengoperasian 40 menit (S2). yaitu pengoperasian 20 menit dengan rata-rata 0,06. Penurunan nilai COP mengindikasikan penurunan kinerja mesin, yang terlihat dari semakin sedikitnya panas yang berhasil dibuang. Hasil penelitian yang dilaporkan oleh Ashari et al. (2020) juga menunjukkan temuan serupa, yaitu terjadinya penurunan pada nilai COP. Anwar (2010) menjelaskan bahwa penurunan koefisien kinerja (COP) pada sistem pendingin kompresi uap disebabkan oleh meningkatnya daya yang dibutuhkan oleh kompresor, yang lebih besar dibandingkan dengan

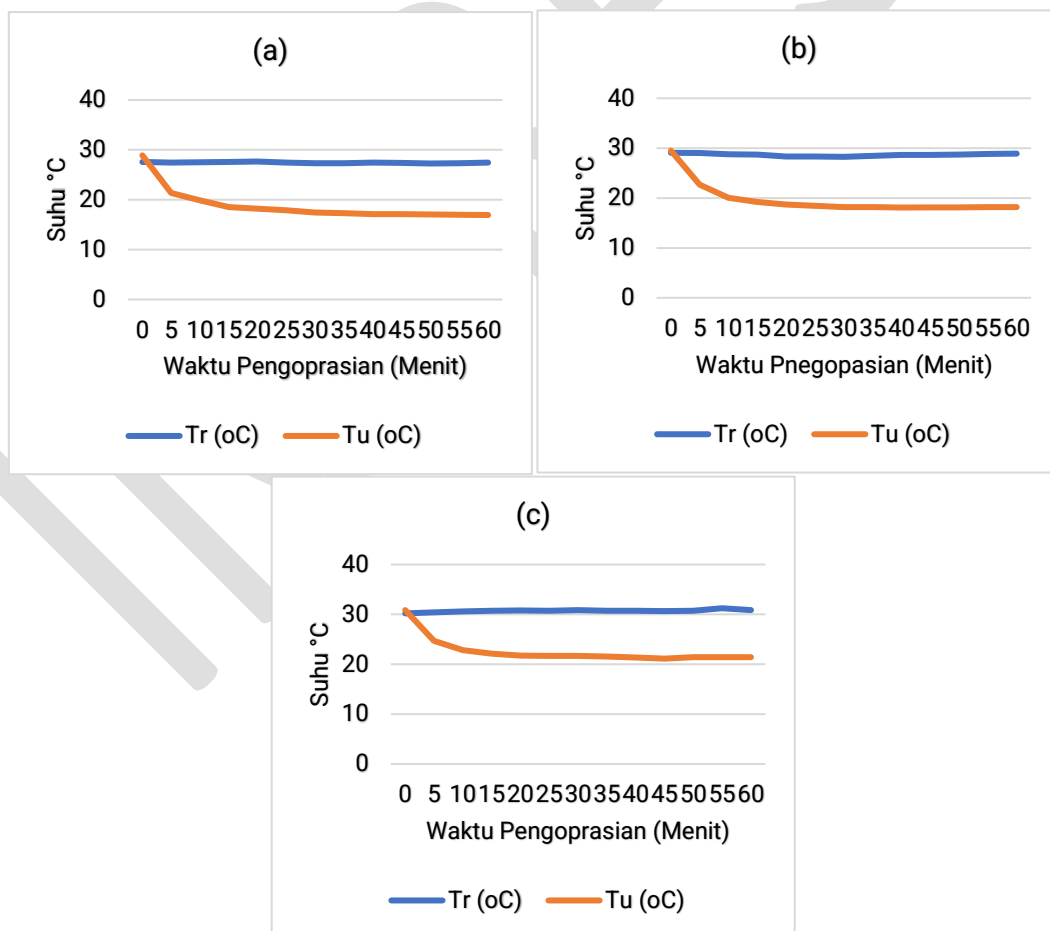
kapasitas refrigerasi yang dihasilkan. Seiring bertambahnya beban pendingin, kapasitas refrigerasi cenderung menurun, sementara suhu dan tekanan pada kompresor meningkat secara signifikan, sehingga menyebabkan konsumsi daya kompresor juga bertambah.

Nilai COP dipengaruhi oleh besar kapasitas pendinginan dan energi kompresi; semakin tinggi nilai COP, menandakan bahwa mesin pendingin bekerja dengan konsumsi energi kompresi yang lebih rendah. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Mainil et al. (2018) dalam penelitian mengenai kinerja kotak pendingin termoelektrik dengan variasi daya input dan beban pendingin. Penurunan nilai COP terjadi akibat peningkatan daya input. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya penyerapan panas seiring dengan bertambahnya daya input.

Munawir et al. (2023), dengan lama percobaan selama 5 jam menggunakan modul termoelektrik yang dirangkai secara paralel. Dalam penelitian tersebut, dihasilkan daya sebesar 76,129 Watt, menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan dinding berdampak pada efisiensi kinerja sistem pendingin. Hasil penelitian oleh Zurahma dan Utami (2021), di mana lapisan styrofoam dengan ketebalan 5 cm menunjukkan transfer panas paling rendah, membuktikan bahwa ketebalan material berbanding terbalik dengan laju perpindahan panas.

Suhu Udara lingkungan dan suhu di dalam ruangan kotak pendingin

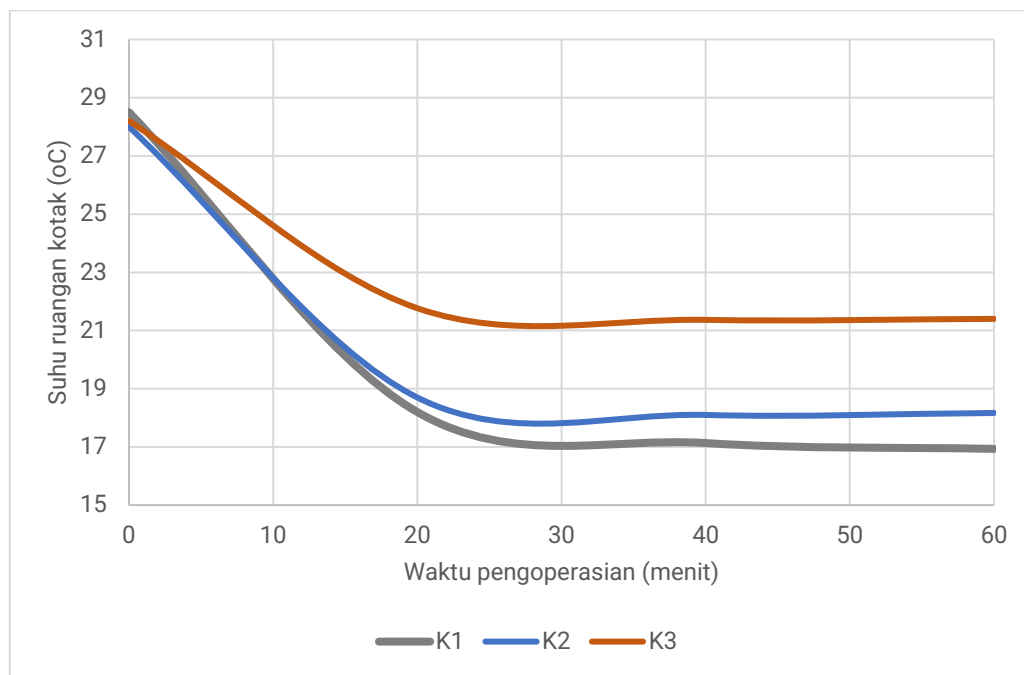
Berdasarkan hasil pengamatan, seluruh percobaan menunjukkan terjadinya penurunan suhu yang signifikan pada rentang waktu menit ke-0 hingga menit ke-5. Setelah itu, laju penurunan suhu melambat dan cenderung stabil hingga menit ke-60.



Gambar 4 Perubahan suhu lingkungan dan suhu di dalam kotak pendingin

Penurunan suhu ini terjadi akibat perpindahan panas dari dalam kotak pendingin ke sisi dingin termoelektrik melalui heat sink. Suhu cenderung terus menurun seiring waktu karena ruang tertutup

dan material dinding kotak berupa styrofoam yang berfungsi sebagai isolator panas. Grafik perubahan suhu lingkungan dan suhu dalam kotak pendingin dari masing-masing perlakuan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 5 Suhu udara di dalam ruang penyimpanan kotak pendingin selama 60 menit pengoprasian alat untuk kotak dengan tebal dinding 2 cm (K1), 4 cm (K2), dan 6 cm (K3)

Gambar 5 memperlihatkan perbandingan suhu udara di dalam ruang penyimpanan kotak pendingin dari ketiga perlakuan ketebalan dinding kotak, K1, K2, dan K3. Pada gambar terlihat suhu di dalam ruang penyimpanan kotak pendingin yang dibuat dengan ketebalan dinding 2 cm (K1) secara konsisten selalu bernilai paling kecil, kemudian disusul oleh kotak pendingin dengan ketebalan dinding 4 cm (K2). Suhu udara di dalam ruang penyimpanan dari kotak pendingin dengan nilai terbesar diukur pada ruang penyimpanan dari kotak dengan ketebalan dinding 6 cm (K3). Seperti dijelaskan oleh Cengel & Ghajar (2015), bahwa semakin tebal dinding maka pindah panas secara konduksi akan semakin kecil. Dengan demikian diduga ada sumber panas lain yang tidak diamati memasuki ruang penyimpanan dari kotak pendingin selama pengoperasian alat.

Lama pengoperasian pada menit terakhir (menit ke-60) untuk masing-masing kotak pendingin menunjukkan bahwa suhu yang dicapai pada pengujian dengan ketebalan dinding 2 cm (K1) memiliki rata-rata 16,9°C, ketebalan 4 cm (K2) memiliki rata-rata 18,1°C, dan ketebalan 6 cm (K3) memiliki rata-rata 21,4°C. Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan dinding berpengaruh terhadap pendinginan, Dinding yang lebih tipis lebih cepat menurunkan suhu dibandingkan dinding yang lebih tebal.

Tabel 2 Nilai rata-rata suhu udara di dalam ruang penyimpanan kotak pendingin

Tebal dinding	Lama pengoperasian (menit)			Rata-rata
	20	40	60	
2 cm	18.90	17.13	16.93	17,66°
4 cm	17.90	18.10	18.17	18,06°
6 cm	21.80	21.37	21.40	21,52°
Rata-rata	19,53	18,87	18,83	

Keterangan: Nilai rata-rata pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama menunjukkan perbedaan tidak nyata ($p > 0,05$)

Tabel 2 memperlihatkan bahwa perlakuan ketebalan dinding menyebabkan perbedaan nyata ($p < 0,05$) suhu udara di dalam ruangan penyimpanan kotak pendingin. Kotak pendingin dengan tebal dinding 2 cm (K1) menyebabkan suhu udara ruangan terendah yang berbeda nyata ($p < 0,05$) dengan nilai rata-rata suhu udara dari perlakuan K lainnya, yaitu bernilai 17,66 oC. Berikutnya nilai rata-rata suhu dari perlakuan K2 adalah 18,06 oC, dan suhu udara di dalam ruangan penyimpanan dengan nilai tertinggi dan berbeda nyata ($p < 0,05$) diperoleh dari perlakuan K3 dengan nilai 21, 52 oC. Hasil percobaan seperti ini belum pernah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya seperti oleh Ananta et al. (2017), dan Mirmanto et al. (2018)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh ketebalan dinding kotak pendingin termoelektrik terhadap kinerja kotak penyimpanan dingin berbasis TEC1-12715, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut: Perlakuan ketebalan dinding kotak pendingin berpengaruh terhadap beban pendinginan (Q_c) yang dihasilkan. Semakin tebal dinding kotak pendingin styrofoam, maka beban panas pendinginan yang harus dibuang oleh sistem menjadi semakin kecil. Sumber beban panas terbesar didominasi oleh panas konduksi yang masuk dari lingkungan melalui dinding kotak. Perlakuan ketebalan dinding kotak pendingin berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap suhu udara di dalam ruang penyimpanan, di mana peningkatan ketebalan dinding menyebabkan suhu di dalam ruangan justru semakin tinggi. Suhu ruangan penyimpanan terendah yang berbeda nyata diperoleh dari perlakuan ketebalan dinding 2 cm yaitu sebesar 16,3°C. Perlakuan ketebalan dinding kotak pendingin (K) dan lama pengoperasian alat (S) secara mandiri berpengaruh sangat nyata ($p < 0,01$) terhadap nilai koefisien kinerja (COP), namun interaksi antara kedua faktor tersebut tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Semakin tebal dinding kotak pendingin, nilai COP alat justru semakin menurun. Nilai COP tertinggi diperoleh pada perlakuan ketebalan dinding 2 cm dengan rata-rata sebesar 0,123, sedangkan COP terendah diperoleh pada ketebalan dinding 6 cm sebesar 0,059. Sebaliknya, semakin lama pengoperasian alat (dari 20 menit hingga 60 menit) menyebabkan nilai COP alat semakin meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- D Ananta, H., Padang, Y. A., & Mirmanto, M. (2017). Unjuk kerja kulkas termoelektrik dengan rangkaian seri dan paralel pada beban air 1500 ml. *Dinamika Teknik Mesin*, 7(2):7-12.
- Anwar, K. (2010). Efek beban pendingin terhadap performa sistem mesin pendingin. *J. Smartek*. 8(3): 203-214.
- Ashari, Y., Widjonarko dan B. Rudiyanto. (2020). Rancang bangun cool case portabel menggunakan modul TEC1-12710. *NCIET* 1:B99-B110.
- Aziz, A., Subroto, J., & Silpana, V. (2015). Aplikasi modul pendingin termoelektrik sebagai media pendingin kotak minuman. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 10(1):32-38.
- Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill Education, New York.
- Delly, J., Hasbi, M., & Alkhoiron, I. F. (2016). Studi penggunaan modul termoelektrik sebagai sistem pendinginn portable. *ENTHALPY*, 1(1):50-55.
- Diputra, B. M. B., Gunadnya, I. B. P., & Budisanjaya, I P. G. (2021). Modifikasi kotak polistiren untuk penyimpanan dingin sayur kubis dengan menggunakan es kering sebagai media pendingin. *JBETA*, 9(2):212-222.
- Ilham, F. (2021). Analisa pemanfaatan termoelektrik sebagai sumber energi listrik. *Jurnal EEICT (Electric, Electronic, Instrumentation, Control, Telecommunication)*, 4(1):22-27.
- Mainil, A.K., A. Aziz dan M. Akmal. (2018). Portable thermoelectric cooler box performance with variation of input power and cooling load. *Aceh Int. J. Technol.* 7(2):85-92.

- Mansyur, A. (2021). Rancang bangun cooler box berbasis termoelektrik dengan variasi heatsink. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 9(1):10-14.
- Mirmanto, M., Sutanto, R., & Putra, D. K. (2018). Unjuk Kerja Kotak Pendingin Termoelektrik dengan Varuasi Laju Aliran Massa Air Pendingin. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1):44-49.
- Mirmanto, M., Joniarta, I W., Wijayanta, A. T., Pranowo, & Habiburrahman, M. (2019a). Experimental performance of a cooler box with heat dissipation unit variations. *International Journal of Heat and Technology*, 37(4), 991-998.
- Mishra, V. K., & Gamage. T. V. (2007). *Postharvest Physiology of Fruit and Vegetables*. In *Handbook of Food Preservation*. M. S. Rahman. CRC Press, Boca Raton. pp 19-48.
- Muharom, V., & Rifky, M. (2022). Analisis perbandingan daya keluaran termoelektrik dengan variasi bahan isolator pada cooler box. *Jurnal Teknik Mesin dan Energi*, 10(1), 14–20.
- Munawir, M., Sasongko, M. N., & Hamidi, N. (2020). Unjuk kerja cool box berbasis termoelektrik cooler dengan single dan multi-stage termoelektrik. *Rotor*, 12(2), 28-33.
- Munawir, M., & Aziz, A. (2023). Studi eksperimental variasi beban pada konsumsi energi pendingin termoelektrik berbasis styrofoam. *Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 11(2), 45–53.
- Priyono, B. W., Hasbi, M., & Tomo, S. (2014). Sistem pakar deteksi kerusakan kulkas. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Komunikasi (TIKomSiN)*, 2(1):1-5.
- Sormin, I. A., Gunadnya, I. B. P., & Aviantara, I. G. N. A. (2021). Kinerja Kotak Pendingin (Cooler Box) Berpendingin TEC1-12715 Pada Beberapa Beban Pendinginan. *Jurnal BETA (Biosistem Dan Teknik Pertanian)*, 11(1), 29.
- Zurahma, S. B., & Utami, W. (2021). Pemanfaatan limbah styrofoam sebagai isolator panas. *Jurnal Sains dan Sistem Informasi Terapan (JSSIT)*, 3(2), 101–107.