

**ANALISIS KINERJA *THERMOELECTRIC COOLER* (TEC)
SEBAGAI REFRIGERATOR DENGAN VARIASI LAJU
ALIRAN FLUIDA PENDINGIN**

SKRIPSI

OLEH:

**HARRI VALLEN SARAGIH
218130013**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2026**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 3/8/26

Access From (repository.uma.ac.id)3/8/26

HALAMAN JUDUL

ANALISIS KINERJA *THERMOELECTRIC COOLER* (TEC) SEBAGAI REFRIGERATOR DENGAN VARIASI LAJU ALIRAN FLUIDA PENDINGIN

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

OLEH:

**HARRI VALLEN SARAGIH
218130013**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2026**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

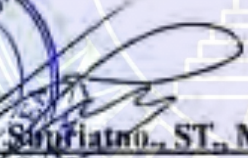
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Proposal : Analisis Kinerja *Thermoelectric Cooler* (TEC) Sebagai Refrigerator Dengan Variasi Laju Aliran Fluida Pendingin
Nama Mahasiswa : Harri Vallen Saragih
NIM : 218130013
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing


Indra Hermawan, ST., MT
Pembimbing


Dr. Eng. Supriatno, ST., MT
Dekan


Dr. Iswandi, ST., MT
Ka. Prodi

Tanggal Lulus: 18 Desember 2025

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana dan merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMISI

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan
dibawah ini:

Nama : Harri Vallen Saragih
NPM : 218130013
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

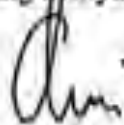
Demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada
Universitas Medan Area Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-
Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul: "ANALISIS KINERJA
*THERMOELECTRIC COOLER (TEC) SEBAGAI REFRIGERATOR DENGAN
VARIASI LAJU ALIRAN FLUIDA PENDINGIN* "

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan Hak Bebas Royalti
Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih
media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat,
dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan
nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta. Demikian
pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Dibuat di: Universitas Medan Area

Pada Tanggal : 18 Desember 2025

Yang menyatakan :



(Harri Vallen Saragih)

NPM: 218130013

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kinerja *Thermoelectric Cooler* (TEC) sebagai sistem pendingin alternatif ramah lingkungan dengan variasi laju aliran fluida pendingin. Latar belakang penelitian didasari keterbatasan sistem pendingin konvensional yang menggunakan refrigeran kimia, boros energi, dan kurang portabel. TEC dipilih karena berukuran kecil, portabel, serta tidak memerlukan refrigeran. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan tiga variasi debit fluida pendingin, yaitu 2×10^{-6} m³/s, 5×10^{-6} m³/s, dan 8×10^{-6} m³/s. Parameter yang diamati meliputi kalor yang diserap sistem (Q_c), *Coefficient of Performance* (COP) sistem, COP TEC, serta kestabilan suhu pendinginan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan debit aliran menghasilkan nilai Q_c dan COP sistem yang lebih tinggi, dengan COP maksimum diperoleh pada debit 8×10^{-6} m³/s. Namun, debit tinggi juga menimbulkan fluktuasi suhu yang lebih besar sehingga kestabilan menurun. Sebaliknya, debit rendah menghasilkan pendinginan lebih stabil meskipun kapasitasnya terbatas. Selain itu, COP TEC cenderung lebih rendah dibandingkan COP sistem karena hanya merepresentasikan kinerja ideal modul tanpa memperhitungkan rugi-rugi sistem. Kesimpulannya, laju aliran fluida sangat memengaruhi kinerja TEC, di mana debit tinggi sesuai untuk pendinginan maksimum, sedangkan debit rendah lebih tepat untuk aplikasi yang membutuhkan kestabilan suhu.

Kata Kunci: *Thermoelectric cooler*, Laju aliran fluida, *Coefficient of Performance*, Stabilitas suhu

ABSTRACT

This study analyzes the performance of a Thermoelectric Cooler (TEC) as an environmentally friendly alternative cooling system with variations in coolant flow rate. The research is motivated by the drawbacks of conventional refrigeration, which uses chemical refrigerants, consumes high electrical energy, and lacks portability. TEC was chosen for its compact size, portability, and refrigerant-free operation. Experiments were conducted with three coolant flow rates: $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, and $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. The parameters observed were system heat absorption (Q_c), system Coefficient of Performance (COP), TEC COP, and cooling temperature stability. The results indicate that higher coolant flow rates increase both Q_c and system COP, with the highest COP recorded at $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. However, this condition also led to greater temperature fluctuations, reducing stability. Conversely, lower flow rates produced more stable cooling performance but limited capacity. Additionally, TEC COP values were consistently lower than system COP, as they represent only the ideal performance of the module without accounting for heat losses in the system. In conclusion, coolant flow rate significantly affects TEC performance. High flow rates are suitable for applications requiring greater cooling capacity, while low flow rates are preferable when temperature stability is prioritized.

Keywords: Thermoelectric Cooler, Peltier Coefficient of Performance, coolant flow rate, temperature stability

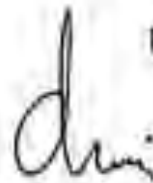
KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan karya tulis ilmiah (skripsi) dari tugas akhir, skripsi merupakan persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana di Fakultas Teknik Mesin Universitas Medan Area.

Dalam penulisan karya tulis ilmiah (skripsi) ini, penulis mendapatkan bantuan dan bimbingan dari banyak pihak. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc. Selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Bapak Dr. Eng. Supriatno, ST, MT. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
3. Bapak Dr. Iswandi, ST, MT. Selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
4. Bapak Indra Hermawan, ST, MT. Selaku Dosen Pembimbing Skripsi
5. Orang tua penulis (Halomoan Saragih dan Ibunda Ursulla Diani Purba) yang dengan begitu tulus memberikan semangat, dorongan dan doa kepada Penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini.
6. Sesama teman-teman mahasiswa Teknik mesin Universitas Medan Area.

Penulis



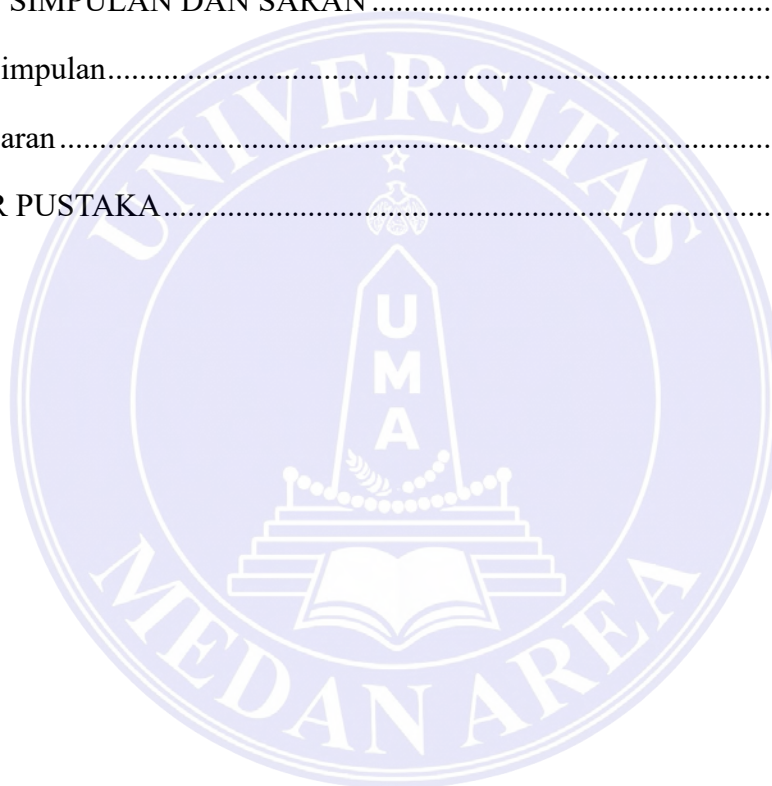
Harri Vallen Saragih
210130013

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMISI.....	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Hipotesis Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Teknik Pendingin.....	5
2.2 Thermoelektrik	6
2.2.1 Efek Seebeck.....	7
2.2.2 Efek Peltier	8
2.2.3 Efek Thomson.....	10

2.3 Thermoelectrik Cooler.....	11
2.4 Perpindahan Panas.....	14
2.4.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	15
2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi.....	17
2.4.3 Perpindahan Panas Radiasi	19
2.5 Heatsink.....	20
2.6 Coefficient Of Performance (COP)	22
2.6.1 Coefficient of Performance sistem pendinginan.....	23
2.6.2 Coefficient Of Performance peltier.....	24
2.7 Laju Aliran Fluida	25
2.7.1 Aliran Laminar.....	25
2.7.2 Aliran Transisi.....	26
2.7.3 Aliran Turbulen.....	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 Bahan dan Alat	28
3.2.1 Bahan	28
3.2.2 Alat.....	38
3.3 Metodologi Penelitian	41
3.4 Populasi dan Sampel	41
3.5 Prosedur kerja.....	42
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Data Hasil Pengujian	44
4.2 Analisis kinerja <i>thermoelectric cooler</i>	44
4.2.1 Terhadap <i>coefficient of performance</i> sistem pendinginan	44

4.2.2 Terhadap <i>coefficient of performance</i> peltier	46
4.2.3 kestabilan suhu pada sistem pendingin.....	48
4.3 Pembahasan	50
4.3.1 Laju Aliran terhadap COP Sistem pendinginan	51
4.3.2 Pengaruh Laju Aliran terhadap COP TEC	52
4.3.3 Kestabilan Suhu Sistem Pendingin	55
4.3.4 Implikasi hasil penelitian	59
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Simpulan.....	60
5.2 Saran	61
DFTAR PUSTAKA.....	62



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Efek seebeck pada perbedaan suhu logam A dan B	8
Gambar 2. 2 Prinsip kerja efek peltier	9
Gambar 2. 3 <i>Thermoelectric cooler</i>	12
Gambar 2. 4 Prinsip Kerja TEC	13
Gambar 2. 5 Keseimbangan energi TEC.....	13
Gambar 2. 6 Perpindahan panas	15
Gambar 2. 7 Aliran panas yang terjadi pada saat konduksi	16
Gambar 2. 8 Perpindahan panas konveksi	18
Gambar 2. 9 Perpindahan panas secara radiasi	19
Gambar 2. 10 <i>Heat sink</i>	21
Gambar 2. 11 Susunan sirip pada <i>Heat sink</i>	22
Gambar 2. 12 Aliran Laminar	26
Gambar 2. 13 Aliran Transisi	27
Gambar 2. 14 Aliran Turbulen	27
Gambar 3. 1 <i>Thermoelectric cooler</i>	29
Gambar 3. 2 Selang transparan	30
Gambar 3. 3 Keran fluida.....	30
Gambar 3. 4 Pompa fluida	31
Gambar 3. 5 <i>Power supply</i>	32
Gambar 3. 6 Kipas, a). kipas sisi panas. b). kipas sisi dingin	33
Gambar 3. 7 <i>Heat sink</i>	34
Gambar 3. 8 <i>Water block</i>	36
Gambar 3. 9 Wadah fluida.....	37
Gambar 3. 10 Kotak pendingin	38
Gambar 3. 11 Termokopel.....	39
Gambar 3. 12 Gelas ukur	40
Gambar 3. 13 <i>Wattmeter</i>	40
Gambar 4. 1 Grafik pengaruh debit terhadap COP sistem	51
Gambar 4. 2 Grafik pengaruh waktu terhadap COP TEC	53
Gambar 4. 3 Grafik kestabilan suhu pada laju aliran fluida pertama.....	55
Gambar 4. 4 Grafik kestabilan suhu pada laju aliran fluida ke dua	56

Gambar 4. 5 Grafik kestabilan suhu pada laju aliran fluida ke tiga.....	57
---	----



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian Tugas Akhir	28
Tabel 3. 2 Spesifikasi bagian peltier TEC1-12706.....	29
Tabel 3. 3 Spesifikasi kinerja peltier TEC1-12706	29
Tabel 3. 4 Spesifikasi pompa fluida	31
Tabel 3. 5 Spesifikasi <i>power supply</i>	33
Tabel 3. 6 Spesifikasi kipas.....	34
Tabel 3. 7 Spesifikasi <i>waterblock</i>	36
Tabel 3. 8 Spesifikasi kotak pendingin	38
Tabel 3. 9 Spesifikasi Termokopel	39
Tabel 3. 10 Populasi dan Sampel	41
Tabel 4. 1 data hasil pengujian dengan laju aliran fluida.....	44
Tabel 4. 2 Data hasil perhitungan COP sistem.....	46
Tabel 4. 3 Data hasil perhitungan COP TEC.....	48
Tabel 4. 4 Data hasil perhitungan simpang baku populasi.....	50

DAFTAR NOTASI

T	= Suhu umum ($^{\circ}\text{C}$ atau K)
T_h	= Suhu sisi panas (<i>hot side</i>) Thermoelectric Cooler (TEC)
T_c	= Suhu sisi dingin (<i>cold side</i>) TEC
ΔT	= Perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin ($T_h - T_c$)
Q_c	= Kalor yang diserap pada sisi dingin TEC (W)
V	= Tegangan listrik (V)
I	= Arus listrik (A)
R	= Hambatan listrik modul TEC (Ω)
P	= Daya listrik masukan (W)
α	= Koefisien Seebeck (V/K)
K	= konduktivitas termal (W/K)
m	= Massa beban (kg)
C_p	= Kapasitas kalor jenis fluida (J/kg.k)
σ	= Simpang baku populasi
$+\sigma$	= Simpang baku populasi di tambah suhu rata-rata
$-\sigma$	= Simpang baku populasi di kurang suhu rata-rata
N	= Jumlah data
x_i	= Data ke i
$\bar{x}$	= Suhu rata-rata data pendinginan
Δt	= Waktu pengujian

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia memiliki karakteristik iklim tropis, sehingga membutuhkan alat pendingin dimana pemanfaatan dapat digunakan sebagai pendingin ruangan dan penyimpanan. Mesin pendingin umumnya menggunakan refrijeran yang terisi di dalam kompresor, fungsi kompresor diperlukan untuk meningkatkan tekanan untuk mengalirkan refrijeran. Operasi kompresor membutuhkan energi listrik yang besar dan refrijeran merupakan bahan kimia yang tidak ramah lingkungan. Penggunaan lemari es bergantung pada tempat, besar, dan berat, sehingga memerlukan usaha dalam memobilisasinya. Sehingga perlu dilakukan kajian terkait alternatif penggunaan lemari es tanpa menggunakan bahan refrigeran, memiliki dimensi kecil, ringan dan praktis, bertujuan mudah dibawa untuk kegiatan diluar rumah (Setiawan, D.,2024). Selain daripada itu Kebutuhan akan teknologi pendinginan yang ramah lingkungan dan hemat energi terus meningkat seiring dengan kesadaran terhadap dampak negatif refrigeran berbasis CFC dan HCFC terhadap lingkungan. Teknologi pendinginan konvensional diketahui memberikan kontribusi pada pemanasan global dan perusakan lapisan ozon. Oleh karena itu, teknologi baru seperti *Thermoelectric Cooler* (TEC) menjadi salah satu alternatif yang menarik untuk dikembangkan, terutama karena sistem ini tidak memerlukan refrigeran kimia. Hal tersebut yang menjadi dasar dilakukannya kajian, dimana *Cooler Box* dengan teknologi termoelektrik dapat menghasilkan respon temperatur dingin yang dimanfaatkan untuk Industri penyimpanan makanan dan minuman.

Cooler box dengan menggunakan termoelektrik yang dimaksud adalah elemen peltier, *Thermoelectric Cooler* (TEC) bekerja berdasarkan efek Peltier, yang memungkinkan perpindahan panas dari satu sisi perangkat ke sisi lainnya menggunakan energi listrik. Dengan ukurannya yang kecil dan sifat ramah lingkungannya, TEC memiliki potensi untuk diaplikasikan pada sistem pendinginan skala kecil seperti refrigerator untuk kebutuhan rumah tangga, medis, atau industri elektronik. Namun, kelemahan utama TEC dibandingkan sistem refrigerasi konvensional adalah efisiensinya yang lebih rendah, terutama dalam hal pendinginan yang efektif dan konsumsi energi. Keuntungan *cooler box* dengan komponen termoelektrik peltier sebagai pendingin tidak menghasilkan suara bising seperti mesin pendingin yang menggunakan unit kompresor. *Cooler box* dengan komponen termoelektrik elemen peltier tidak lagi menggunakan unit kompresor, evaporator, katup ekspansi dan refrijeran. *Cooler box* dapat ditempatkan dalam posisi apapun. *Cooler box* aman digunakan karena tanpa bahan kimia seperti refrijeran, sehingga ramah lingkungan. Kelebihan lainnya dari sistem pendingin tersebut yaitu mudah dioperasikan dengan tegangan dan arus yang mudah di kontrol. Penggunaan peltier sebagai peralatan pendingin merupakan alternatif energi yang bersih dan aman. Pemakaian peltier dapat digunakan sebagai peralatan praktis.

Rendahnya Efisiensi dari *Thermoelectric Cooler* (TEC) menjadi salah satu kekurangan yang harus dicari solusinya. Adapun cara untuk meningkatkan kinerja *Thermoelectric Cooler* adalah dengan memperhatikan jenis fluida pendingin dan laju aliran fluida yang digunakan dalam proses pendinginan. Fluida seperti air, dan memiliki kemampuan perpindahan panas yang berbeda, sehingga variasi dalam laju

aliran fluida tersebut dapat mempengaruhi stabilitas suhu, waktu pendinginan, serta konsumsi energi. Penelitian ini berfokus pada analisis komprehensif mengenai kinerja TEC dengan menggunakan variasi laju aliran air sebagai fluida pendingin. Hal ini bertujuan untuk memahami bagaimana masing-masing fluida dan laju alirannya memengaruhi keseluruhan performa TEC sebagai sistem refrigerator.

Problem Statement : Pada tugas project sebelumnya saya telah melakukan penelitian tentang *cooler box* berbasis *Thermoelectric cooler*. Yang dimana pada penelitian tersebut Kinerja yang dihasilkan *cooler box* tersebut belum maksimal, dikarenakan pada sistem pendinginan nya hanya menggunakan *Heat sink* (sirip). Maka dari itu pada penelitian ini saya akan melakukan eksperimen dengan menambahkan Fluida untuk sistem pendinginan *cooler box*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana variasi laju aliran fluida (air) mempengaruhi *Coefficient Of Performance* (COP) kotak pendinginan berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC)?
2. Bagaimana variasi laju aliran fluida mempengaruhi stabilitas suhu dan dari kotak pendingin berbasis *Thermoelectric Cooler* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis nilai *Coefficient Of Performance* (COP) dari kotak pendinginan *Thermoelectric Cooler* (TEC) dengan variasi laju aliran fluida

2. Menganalisis stabilitas suhu sistem pendinginan TEC dengan variasi laju aliran fluida

1.4 Hipotesis Penelitian

Efek dari modul termoelektrik akan dapat digunakan sebagai pendingin dengan suhu pendinginan mencapai 10 C dan untuk variasi laju aliran fluida yang paling tinggi akan mempercepat proses pendinginan dan menghasilkan penurunan suhu yang stabil.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat digunakan untuk media mendinginkan makanan maupun kebutuhan medis
2. Menjadi salah satu alternatif dalam pengaplikasian alat pendingin yang ramah lingkungan dan hemat energi.
3. Menghasilkan alat pendingin yang dapat dibawa kemana saja (portable)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknik Pendingin

Teknik pendingin adalah disiplin ilmu yang berkaitan dengan pengaturan suhu dan proses pendinginan dalam berbagai aplikasi. Tujuan utamanya adalah untuk menurunkan suhu suatu objek atau ruang agar tetap pada level yang diinginkan. Teknik ini digunakan di berbagai sektor, termasuk industri, rumah tangga, transportasi, dan teknologi, untuk memastikan perangkat atau sistem berfungsi dengan efisien dan tidak mengalami *overheating*. Teknik ini melibatkan berbagai prinsip fisika, seperti perpindahan panas melalui konduksi, konveksi, atau radiasi, dan penggunaan zat pendingin yang dapat menyerap panas untuk kemudian dipindahkan dan dilepaskan ke lingkungan.

Sistem pendinginan berfungsi untuk menjaga suhu agar tetap berada pada kondisi yang ideal. Sistem ini, yang juga dikenal dengan istilah refrigrasi, adalah proses pengambilan kalor dari suatu benda atau ruang untuk menurunkan suhunya. Kalor, yang merupakan salah satu bentuk energi, dipindahkan dari molekul-molekul benda yang bersangkutan, sehingga penurunan suhu berarti mengurangi energi dari benda tersebut. Proses ini bertujuan untuk menurunkan temperatur ruang agar berada di bawah suhu lingkungan, dan dengan demikian, proses refrigrasi dapat dipahami sebagai proses pendinginan.

Refrigrasi adalah penerapan luas dari prinsip termodinamika, yang digunakan untuk menghasilkan dan mempertahankan suhu suatu benda atau ruang agar lebih rendah daripada suhu lingkungan sekitar, dengan cara menyerap kalor

dari benda atau ruang tersebut. Secara sederhana, refrigrasi juga dapat dipahami sebagai proses pemindahan kalor dari suatu tempat ke tempat lain.

2.2 *Thermoelectrik*

Termoelektrik merupakan konversi langsung yang dapat mengubah energi panas menjadi energi listrik. Selain mengkonversi energi panas menjadi energi listrik, termoelektrik juga bisa mengkonversi energi listrik menjadi dingin. Termoelektrik umumnya menggunakan bahan yang bersifat semikonduktor (Larasati. R., 2020). termoelektrik pertama kali ditemukan oleh ilmuwan berkebangsaan Jerman, Thomas Johann Seebeck, pada tahun 1821. Dalam penelitiannya, Seebeck melakukan percobaan dengan menghubungkan dua jenis logam, yaitu tembaga dan besi, dalam suatu rangkaian tertutup. Ketika salah satu sisi sambungan dipanaskan dan sisi lainnya didinginkan, terjadi perbedaan suhu yang menimbulkan gaya gerak listrik dan menghasilkan aliran arus listrik. Fenomena tersebut kemudian dikenal sebagai Efek Seebeck, yang selanjutnya menjadi dasar prinsip kerja termokopel dalam pengukuran suhu. Pada tahun 1834, ilmuwan berkebangsaan Prancis Jean Charles Athanase Peltier melakukan penelitian lanjutan terhadap fenomena yang ditemukan oleh Seebeck dan mengidentifikasi gejala kebalikannya. Jean Charles Athanase Peltier menemukan bahwa ketika arus listrik searah dialirkan pada suatu rangkaian tertutup yang terdiri dari dua material logam berbeda, salah satu sambungan mengalami penyerapan panas, sedangkan sambungan lainnya mengalami pelepasan panas. Apabila arah arus listrik dibalik, maka arah perpindahan panas juga akan berbalik. Fenomena ini kemudian dikenal sebagai Efek Peltier. Selanjutnya, pada tahun 1854, William Thomson memperdalam kajian terhadap kedua fenomena tersebut dengan

memberikan penjelasan teoretis yang lebih komprehensif. Ia berhasil menunjukkan hubungan timbal balik antara Efek Seebeck dan Efek Peltier, serta memperkenalkan konsep baru yang dikenal sebagai Efek Thomson, yang menggambarkan keterkaitan termodinamika antara aliran panas dan arus listrik dalam material konduktor. (Selviana, W., 2017)

2.2.1 Efek Seebeck

Proses konversi perbedaan suhu menjadi energi listrik dikenal sebagai efek Seebeck. Fenomena ini terjadi ketika dua material berbeda dihubungkan pada kedua ujungnya dan mengalami perbedaan suhu, sehingga menghasilkan tegangan listrik akibat gradien temperatur tersebut. Menurut (Ansyori, 2017), setiap material termoelektrik memiliki nilai koefisien Seebeck yang bervariasi. Besarnya energi listrik yang dihasilkan bergantung pada perbandingan antara koefisien Seebeck masing-masing material dan beda potensial yang muncul akibat perbedaan suhu (Wibowo, T., N., 2021). Efek Seebeck terjadi ketika 2 logam konduktor yang berbeda disatukan pada salah-satu ujungnya kemudian diberikan stimulus panas, maka pada ujung yang lain akan menghasilkan beda potensial. (Aziz, R., 2017)

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B = \frac{V}{T_a - T_b} \dots\dots\dots (2.1)$$

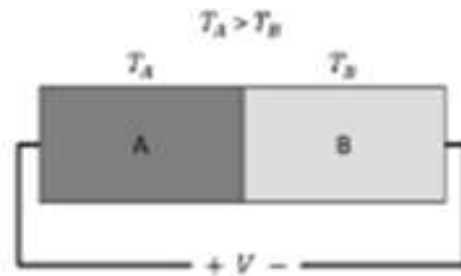
Keterangan:

α_{AB} = Efek Seebeck

V = Tegangan Listrik

T = Suhu mutlak logam A

T_B = Suhu mutlak logam B

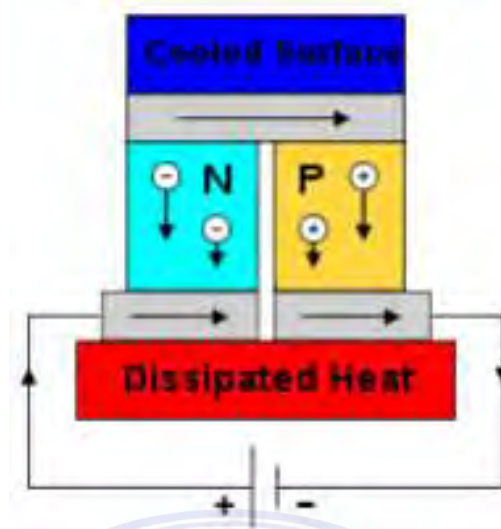


Gambar 2. 1 Efek seebeck pada perbedaan suhu logam A dan B
(Sumber: Selviana, W. 2017)

Dengan α_{AB} adalah koefisien seebeck, V adalah tegangan listrik serta T_A dan T_B adalah suhu pada logam A dan B. Koefisien seebeck relatif mudah diukur sehingga koefisien ini sering digunakan sebagai salah satu parameter sistem pendingin. (Selviana, W., 2017)

2.2.2 Efek Peltier

Efek Peltier merupakan fenomena perpindahan kalor yang terjadi akibat adanya aliran arus listrik melalui dua jenis logam atau material konduktor yang berbeda. Ketika arus listrik mengalir, perpindahan panas pada sambungan kedua logam tersebut berlangsung sebanding dengan besar arus yang melewatinya. Artinya, semakin tinggi suhu pada logam, maka semakin besar pula laju perpindahan kalor yang terjadi. Pada prinsipnya, efek Peltier muncul ketika dua konduktor berbeda disusun berdampingan dan dihubungkan dengan sumber listrik, sehingga elektron bergerak dari konduktor dengan ikatan elektron yang lebih lemah menuju konduktor dengan ikatan elektron yang lebih kuat. Perpindahan elektron ini terjadi karena adanya perbedaan tingkat energi Fermi antara kedua material konduktor tersebut. (Selviana, W., 2017).



Gambar 2. 2 Prinsip kerja efek peltier
(Sumber: Ibrahim, B, I, F. 2017)

Fermi merupakan tingkat energi tertinggi yang masih ditempati oleh elektron pada suatu material pada kondisi suhu nol absolut. Perbedaan tingkat Fermi digunakan untuk menggambarkan variasi distribusi energi elektron antara dua material konduktor. Ketika dua konduktor dengan tingkat Fermi yang berbeda disatukan, elektron akan berpindah dari konduktor yang memiliki tingkat Fermi lebih tinggi menuju konduktor dengan tingkat Fermi lebih rendah. Proses perpindahan ini berlangsung hingga tercapai keseimbangan, yaitu ketika perbedaan potensial elektrostatis yang terbentuk menyebabkan kedua tingkat Fermi menjadi sama. Efek Peltier (π_{AB}) dapat dihitung menggunakan laju aliran kalor (q) dibagi dengan arus listrik (I). (Aziz, R., 2017)

$$\pi_{AB} = \frac{q}{I} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

q = laju aliran kalor

I = Kuat arus listrik

Perpindahan panas yang terjadi dengan cara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas konduksi terjadi pada heat sink sisi panas peltier dan pada heat sink sisi dingin peltier. Sementara perpindahan panas konveksi terjadi pada udara yang melewati heat sink, dan udara dalam ruangan atau alat uji (Selviana, W., 2017).

2.2.3 Efek Thomson

William Thomson fisikawan asal Inggris Raya menyelidiki lebih lanjut termoelektrisitas dan menemukan efek ketiga dari termoelektrik, efek Thomson. Sebuah konduktor (kecuali superkonduktor) yang dialiri arus listrik dan perbedaan temperaturnya terjaga dapat melepaskan atau menyerap panas di sepanjang konduktor tersebut. Atau bisa dikatakan bahwa terdapat penyerapan atau pelepasan panas bolak-balik dalam konduktor homogen yang terkena perbedaan panas dan perbedaan arus listrik secara simultan (Busthomy, L., P., 2020).

Pada material logam seperti seng dan tembaga, apabila salah satu ujung material memiliki suhu lebih tinggi dengan potensial yang juga lebih tinggi, sedangkan ujung lainnya bersuhu lebih rendah dengan potensial lebih rendah, maka ketika arus listrik mengalir dari sisi panas menuju sisi dingin, arah aliran arus bergerak dari potensial rendah ke potensial tinggi. Kondisi ini menimbulkan pelepasan energi panas yang dikenal sebagai efek Thomson positif. Sebaliknya, pada logam seperti kobalt, nikel, dan besi, ujung dingin memiliki potensial yang lebih tinggi sedangkan ujung panas memiliki potensial yang lebih rendah. Ketika arus listrik mengalir dari ujung panas ke ujung dingin, arus tetap bergerak dari potensial rendah ke potensial tinggi, namun menghasilkan efek Thomson negatif, di mana terjadi penyerapan panas. Koefisien Thomson dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\mu = \frac{\bar{Q}}{I} \Delta T \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan $\bar{Q}$ adalah jumlah perpindahan panas yang diserap oleh konduktor ketika arus listrik mengalir ke arah suhu yang lebih tinggi. Hubungan koefisien Thomson dengan *seebeck* dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$\mu = T \frac{dS}{dT} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

μ = Koefisien Thomson (V/K)

ΔT = Beda temperatur (K)

I = Arus listrik (Ampere, A)

$\bar{Q}$ = Panas peltier (watt)

S = Koefisien *seebeck* (volt/K)

T = Temperatur mutlak (K)

2.3 Thermoelectric Cooler

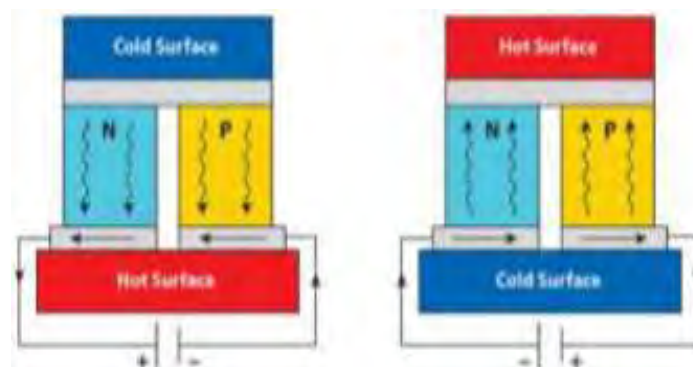
Thermoelectric cooler merupakan salah satu alat pendingin yang sederhana. Mekanisme pendinginan yang bekerja pada TEC adalah dengan mengkonversi energi listrik menjadi energi panas. Maka akan terdapat perbedaan temperatur pada sisi TEC. Beda potensial pada TEC sangat mempengaruhi waktu perubahan temperatur yang dihasilkan. TEC dapat membuang panas dibagian sisi panasnya, sedangkan sisi lainnya akan menghasilkan efek pendinginan karena penyerapan panas. Elemen utama TEC merupakan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang dihubungkan dalam suatu rangkaian tertutup yang dilapisi kramik, dari perbedaan temperatur pada semikonduktor tersebut akan menyebabkan elektron berpindah dari sisi panas menuju sisi dingin. Apabila pada logam semikonduktor berlaku efek

seeback dan efek peltier, maka elektron pada sisi panas semikonduktor akan bergerak aktif dan memiliki kecepatan aliran yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi dingin (Sucipta, M., I., dkk. 2022).



Gambar 2. 3 *Thermoelectric cooler*
(Sumber: Putra Cahaya, F. 2015)

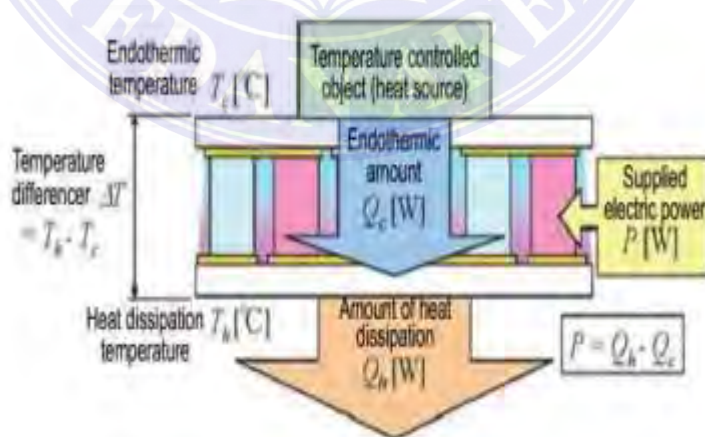
Salah satu bentuk penerapan dari efek Peltier adalah pada *Thermoelectric Cooler* (TEC), yaitu perangkat yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi panas atau dingin. TEC tersusun atas sejumlah thermokopel atau pasangan elemen semikonduktor yang bekerja berdasarkan prinsip efek Peltier. Setiap *thermokopel* terdiri dari dua kaki semikonduktor yang disebut pellet, yaitu kaki bertipe-n (negatif) dan kaki bertipe-p (positif). Kedua kaki semikonduktor tersebut dihubungkan secara elektris seri namun termal paralel, sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara efisien antara sisi panas dan sisi dingin perangkat. Material semikonduktor yang umum digunakan dalam pembuatan TEC adalah bismuth telluride. (Ibrahim. B., I., F., 2017). Hal ini dikarenakan memiliki sifat termoelektrik yang baik, seperti konduktivitas listrik tinggi dan konduktivitas termal rendah, yang mendukung kinerja optimal dalam proses konversi energi listrik menjadi perbedaan suhu.



Gambar 2. 4 Prinsip Kerja TEC

(Sumber: Ibrahim, B, I, F. 2017)

Ketika arus listrik mengalir dan tegangan diterapkan pada TEC, muatan listrik dalam pellet akan bergerak ke salah satu sisi sesuai dengan arah arus. Pada gambar 2.4 sebelah kiri, muatan bergerak ke bawah, menyebabkan pemanasan pada sisi bawah. Hal ini terjadi karena muatan membawa energi panas dari sisi atas. Sebaliknya, jika arah arus dibalik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 sebelah kanan, muatan bergerak ke arah sebaliknya, sehingga arah perpindahan panas juga terbalik, menyebabkan pemanasan pada sisi atas dan pendinginan pada sisi bawah.



Gambar 2. 5 Kestimbangan energi TEC

(Sumber: Ibrahim, B, I, F. 2017)

$$Q_c = A T_{cl} - 0,5 I^2 R - K \Delta T \dots\dots\dots (2.5)$$

$$Q_h = A T_{hl} + 0,5 I^2 R - K \Delta T \dots\dots\dots (2.6)$$

$$P = Q_h - Q_c \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

A = Koefisien seeback (V/K)

R = Tahanan elektris (Ω)

K = Konduksi Termal (W/K)

P = Daya listrik (Watt)

Q_h = Energi panas yang dihasilkan (Watt)

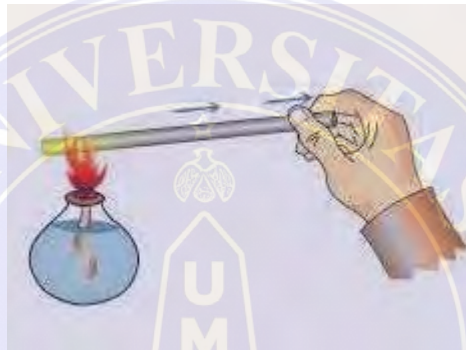
Q_c = Energi panas yang diserap (Watt)

Ketika aliran listrik mengalir melalui TEC, energi yang diterima akan dikonversi menjadi bentuk energi lainnya. Pada satu sisi, panas dihasilkan, yang dipengaruhi oleh sifat material semikonduktor yang digunakan. Di sisi lain, panas dari lingkungan sekitar diserap, sehingga permukaan TEC menjadi lebih dingin dibandingkan suhu udara di sekitarnya.

2.4 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan cabang ilmu yang mempelajari proses dan mekanisme perpindahan energi akibat adanya perbedaan suhu antara dua benda atau material. Ilmu ini tidak hanya berfokus pada penjelasan mengenai bagaimana energi kalor berpindah dari satu objek ke objek lainnya, tetapi juga berfungsi untuk memprediksi laju perpindahan panas yang terjadi di bawah kondisi tertentu. Secara alami, panas selalu berpindah dari daerah dengan temperatur lebih tinggi ke daerah dengan temperatur lebih rendah. Fenomena percampuran panas terjadi karena

adanya aliran energi kalor antar benda dengan suhu berbeda, sedangkan dalam sistem kalorimeter, perpindahan panas dapat melibatkan pertukaran energi antara sistem dengan lingkungan. Dengan demikian, penambahan atau pengurangan panas tidak hanya mengubah suhu atau fase suatu zat secara lokal, tetapi juga menyebabkan rambatan energi ke bagian lain dari sistem. Proses ini secara umum dikenal sebagai perpindahan panas. Menurut penyelidikan, perpindahan tenaga panas dapat dibagi dalam beberapa golongan cara perpindahan (Rafiq, I., M., 2021).



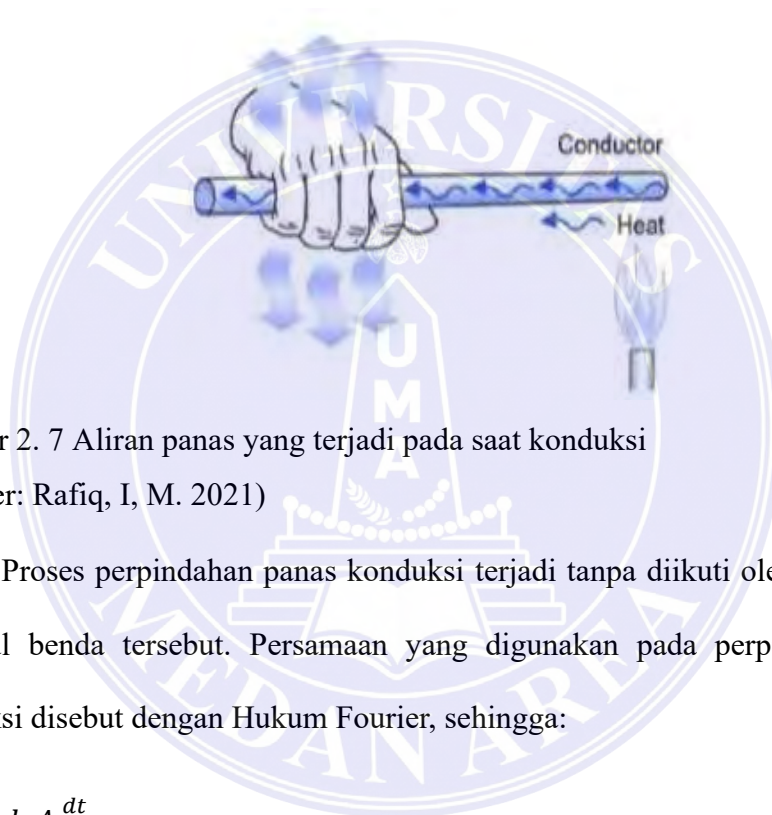
Gambar 2. 6 Perpindahan panas
(Sumber: Rafiq, I, M. 2021)

Perpindahan panas terjadi secara bersamaan melalui tiga mekanisme ini. Mekanisme pertama adalah perpindahan panas melalui konduksi, yang kedua melalui konveksi, dan yang ketiga melalui radiasi.

2.4.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi merupakan proses aliran panas yang terjadi dari daerah dengan temperatur tinggi menuju daerah dengan temperatur lebih rendah di dalam suatu medium (padat, cair, maupun gas) atau antara dua medium berbeda yang saling bersentuhan secara langsung. Pada mekanisme ini, perpindahan energi panas terjadi akibat tumbukan dan interaksi langsung antar molekul, tanpa disertai perpindahan massa atau perpindahan molekul dalam jumlah

besar. Material yang memiliki kemampuan tinggi dalam menghantarkan kalor, seperti besi, baja, perak, tembaga, dan aluminium, dikategorikan sebagai konduktor panas. Sebaliknya, material yang memiliki kemampuan rendah dalam menghantarkan kalor, seperti karet, plastik, dan kaca, disebut sebagai isolator panas, karena hambatan termalnya yang tinggi menghalangi aliran energi panas (Alfiansyah, I., 2021).



Gambar 2. 7 Aliran panas yang terjadi pada saat konduksi
(Sumber: Rafiq, I, M. 2021)

Proses perpindahan panas konduksi terjadi tanpa diikuti oleh perpindahan molekul benda tersebut. Persamaan yang digunakan pada perpindahan panas konduksi disebut dengan Hukum Fourier, sehingga:

$$q_r = -k A \frac{dt}{dx} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

q_k = Laju perpindahan kalor konduksi (W/m)

k = Konduktivitas bahan (W/m°C)

A = Luas penampang (m^2)

dt/dx = Gradien temperatur kearah x (°C/m)

Dimana q merupakan laju perpindahan kalor dan $\Delta T/\Delta x$ merupakan gradien suhu katakan perpindahan kalor. Konstanta positif k disebut konduktivitas thermal benda atau material, nilai minus diselipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala suhu (Holman, 1997).

2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi

Sudah cukup diketahui bahwa plat logam panas akan lebih cepat menjadi dingin bila ditaruh didepan kipas angin dibandingkan dengan bilamana ditempatkan diudara biasa. Kita katakan kalor dikonveksi atau diili keluar, dan proses ini dinamakan perpindahan kalor secara konveksi atau ilian. Istilah konveksi atau ilian, barangkali sudah memberi gambaran tentang apa yang terjadi dalam proses perpindahan kalor (Ali. M., dkk., 2022).

Perpindahan kalor secara konveksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi akibat pergerakan partikel-partikel atau massa fluida dari suatu zat. Mekanisme ini umumnya terjadi pada interaksi antara permukaan padat dengan fluida (cair maupun gas). Apabila fluida yang terlibat berupa zat cair atau gas, maka perpindahan panas berlangsung bersamaan dengan perpindahan massa fluida itu sendiri. Proses konveksi merupakan kombinasi antara perpindahan panas secara konduksi dan pergerakan fluida yang membawa energi panas. Sebagai contoh, sebuah pelat logam panas akan lebih cepat mengalami pendinginan ketika diletakkan di depan kipas angin dibandingkan bila dibiarkan pada udara diam. Hal ini disebabkan oleh aliran udara yang bergerak melewati permukaan pelat, yang mempercepat proses perpindahan kalor. Dengan demikian, semakin besar kecepatan udara yang mengalir, maka semakin tinggi pula laju perpindahan panas

yang terjadi pada permukaan tersebut (Alfiansyah, I., 2021). Pada perpindahan kalor konveksi berlaku hukum Newton tentang pendinginan yaitu :

$$q = h \cdot A (T_w - T_{\infty}) \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

q = Laju perpindahan panas Konveksi (J/d)

h = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)

T_w = Temperatur dinding ($^\circ C$)

T_{∞} = Temperatur sekeliling ($^\circ C$)

Laju perpindahan kalor dihubungkan dengan beda suhu menyeluruh antara dinding dan fluida, dan luas permukaan A . Besaran h disebut koefisien perpindahan kalor konveksi. Dengan satuan h adalah watt per meter persegi derajat Celcius.



Gambar 2. 8 Perpindahan panas konveksi
(Sumber: Ali, H. 2022)

Jika suatu plat panas dibiarkan di udara sekitar tanpa ada sumber gerakan dari luar, maka udara itu akan bergerak sebagai akibat terjadinya gradien densitas di dekat plat tersebut. Peristiwa ini dinamakan konveksi alamiah atau konveksi

bebas untuk membedakannya dari konveksi paksa yang terjadi apabila udara itu dihembuskan diatas plat itu dengan kipas (Holman, 1997).

2.4.3 Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan panas dimana panas tersebut mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah, bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan bila terdapat ruang hampa diantara bendabenda tersebut (Alfiansyah, I., 2021).



Gambar 2. 9 Perpindahan panas secara radiasi
(Sumber: Ali, H. 2022)

Perpindahan kalor secara radiasi terjadi melalui gelombang elektromagnetik dan dapat berlangsung meskipun antara dua benda tidak terdapat medium perantara, bahkan dalam ruang hampa. Setiap benda secara kontinu memancarkan energi panas dalam bentuk radiasi, dengan intensitas pancaran yang bergantung pada temperatur permukaan serta sifat material benda tersebut. Energi radiasi merambat dengan kecepatan cahaya dan menunjukkan perilaku yang serupa dengan radiasi optik. Berdasarkan teori elektromagnetik, perbedaan utama antara keduanya terletak pada panjang gelombang yang dipancarkan, di mana radiasi panas umumnya memiliki panjang gelombang yang lebih besar dibandingkan radiasi

cahaya tampak (Alfiansyah, I., 2021). Adapun persamaan yang diberikan pada perpindahan panas secara Radiasi adalah sebagai berikut:

$$q_r = \sigma A (T)^4 \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan:

σ = Konstanta Stefan Boltzman ($5,669 \times 10^{-8} \text{ watt/m}^2 \text{ K}^4$)

A = Luas permukaan (m^2)

T = Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

2.5 Heatsink

Heat sink merupakan komponen pemindah panas pasif yang berfungsi untuk mentransfer panas dari suatu perangkat elektrik maupun mekanik ke media lain, seperti udara atau cairan pendingin (*coolant*). Disebut pasif karena dalam prosesnya tidak terdapat bagian atau medium yang bergerak di dalam heat sink; perpindahan panas terjadi secara alami melalui konduksi dan konveksi. Dalam sistem komputer, heat sink berperan penting dalam mendinginkan komponen utama seperti *Central Processing Unit* (CPU) dan *Graphics Processing Unit* (GPU), guna mencegah terjadinya overheating yang dapat menurunkan kinerja atau merusak komponen. Sementara itu, pada sistem mekanik, heat sink juga digunakan pada *Thermoelectric Cooler* (TEC) untuk perangkat seperti pendingin ruangan portabel atau sistem pendingin (*cool case*) pada kendaraan (Ibrahim. B., I., F., 2017).

Heatsink umumnya terbuat dari aluminium karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan bobot yang ringan. Komponen ini ditempatkan pada sisi panas modul termoelektrik (TEC) untuk membantu melepaskan panas yang

dihasilkan selama proses kerja perangkat. Ketika terminal positif dan negatif dari modul termoelektrik dihubungkan dengan sumber daya arus searah (DC), sisi panas dari modul akan menghasilkan energi panas yang kemudian disalurkan ke heatsink. Heatsink berfungsi sebagai tahap peralihan dalam proses perpindahan panas, di mana panas terlebih dahulu mengalir ke dalam heatsink melalui mekanisme konduksi, kemudian dilepaskan ke lingkungan eksternal melalui konveksi atau media pendingin lainnya. Berdasarkan mekanisme pembuangan panasnya, heatsink dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu konveksi alami, konveksi paksa, dan pendinginan cair. Pemilihan jenis heatsink umumnya disesuaikan dengan ukuran serta kapasitas sistem pendingin yang digunakan, seperti pada kulkas mini atau perangkat termoelektrik berdaya tinggi (Ilham, M., R., 2016).



Gambar 2. 10 *Heat sink*
(Sumber: Ilham, M, R. 2016)

Sebuah *Heat sink* didesain dengan memaksimalkan luas permukaan yang kontak dengan sumber atau perangkat dan juga dengan medium yang disalurkan panas dari perangkat tersebut. Bentuk sirip, celah antar sirip, dan juga panjang dari sirip merupakan salah satu desain yang diperhitungkan dalam memperbaiki kinerja dari *Heat sink*. Dalam penggunaannya, heat sink harus diolesi dengan *thermal grease* pada bagian yang menempel pada sisi perangkat. *Thermal grease* digunakan

sebagai katalis atau media untuk mempercepat penyaluran (Ibrahim. B., I., F., 2017).

Sirip pada heat sink adalah elemen memanjang yang terhubung dengan dasar *heat sink* dan disusun dalam pola tertentu. Beberapa jenis susunan sirip yang biasa digunakan antara lain pin, lurus, dan flare (mengembang). Susunan pin dapat berbentuk silindris atau persegi dengan jarak yang seragam antar pin. Susunan lurus terdiri dari sirip persegi panjang yang memanjang, sedangkan susunan flare memiliki sirip yang mengembang atau melebar.



Gambar 2. 11 Susunan sirip pada *Heat sink*

(Sumber: Ibrahim, B, I, F. 2017)

2.6 Coefficient Of Performance (COP)

Coefficient Of Performance (COP) atau koefisien kinerja adalah perbandingan antara kalor yang dihasilkan oleh sistem refrigerasi dengan energi yang disuplai berupa masukan arus listrik. Nilai ini dapat menunjukkan tingkat kualitas dari suatu sistem refrigerasi. Nilai COP yang tinggi menunjukkan kualitas sistem refrigerasi yang baik, sebaliknya nilai COP yang rendah menunjukkan sistem refrigerasi yang kurang baik. Perhitungan eksperimental COP pada kotak pendinginan didasarkan pada persamaan berikut (Mirmanto et al., 2019):

$$COP = \frac{Q_c}{(P)} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana Q_c merupakan Energi kalor yang diserap oleh sisi dingin per satuan waktu, P merupakan besar daya yang dikonsumsi per satuan waktu. Maka COP merupakan nilai perbandingan antara energi kalor yang dapat diserap oleh sisi dingin peltier dibagi besar konsumsi daya yang digunakan.

2.6.1 *Coefficient of Performance* sistem pendinginan

Pada *Coefficient Of Performance* sistem yaitu perbandingan efek pendinginan yang dihasilkan atau banyaknya kalor yang berhasil dipindahkan terhadap beban pendinginan dengan seluruh konsumsi daya yang digunakan masing-masing komponen alat. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai Q_c nya adalah

$$Q_c = m \times C_p \times \frac{T_h - T_c}{\Delta t} \dots \dots \dots (2.12)$$

Keterangan:

m = massa fluida

C_p = Kapasitas kalor jenis fluida

T_h = Suhu beban (air) masuk

T_c = suhu beban (air) keluar

Δt = waktu pengujian

Untuk menghitung P (daya listrik) yang digunakan pada perhitungan *Coefficient Of Performance* sistem yaitu dengan persamaan berikut:

$$P = V \times I \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan:

P = Tegangan (V)

I = Kuat arus (A)

2.6.2 *Coefficient Of Performance* peltier

Coefficient Of Performance peltier adalah perbandingan antara daya pendinginan yang dihasilkan oleh peltier dengan konsumsi daya listrik peltier itu sendiri. untuk menghitung nilai Q_c pada *Coefficient Of Performance* peltier yaitu menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_c = \alpha IT_c - 0,5I^2R - K(T_h - T_c) \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan:

COP = *Coefficient of performance*

α = Koefisien Seebeck (volt/K)

I = Kuat arus listrik (Ampere, A)

Q_c = Energi panas yang diserap (watt)

K = Konduktivitas Termal (W/K)

R = Tahanan arus (Ohm, Ω)

T_h = Suhu sisi panas peltier

T_c = Suhu sisi dingin peltier

Untuk menghitung nilai P (daya listrik) pada perhitungan *Coefficient Of Performance* peltier yaitu menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P = \alpha . I (T_h - T_c) + I^2R \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan:

α = Koefisien Seebeck (volt/K)

I = Kuat arus listrik (Ampere, A)

R = Tahanan arus (Ohm, Ω)

T_h = Suhu sisi panas peltier

T_c = Suhu sisi dingin peltier

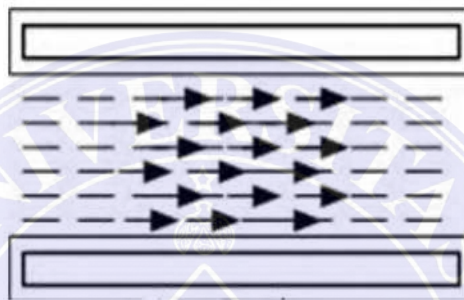
2.7 Laju Aliran Fluida

Fluida, yang mencakup zat cair, uap air, dan gas, memiliki kemampuan untuk mengalir, sehingga berbeda dengan benda padat. Kemampuan ini disebabkan oleh ikatan antar molekul fluida yang jauh lebih lemah dibandingkan dengan ikatan molekul pada zat padat. Akibatnya, fluida memiliki hambatan yang relatif kecil terhadap perubahan bentuk, karena gaya gesekan internalnya rendah. Sementara itu, zat padat cenderung mempertahankan bentuk dan volumenya meskipun diberikan gaya yang cukup besar, sehingga sulit mengalami deformasi. Sebaliknya, zat cair dan gas bersifat lebih fleksibel, zat cair tidak memiliki bentuk tetap dan akan mengikuti bentuk wadahnya, sedangkan volumenya hanya dapat berubah bila diberikan tekanan yang sangat besar. Laju aliran fluida pada sebuah penampang terbagi dalam tiga jenis antara lain sebagai berikut.

2.7.1 Aliran Laminar

Aliran laminar adalah jenis aliran fluida di mana partikel-partikel di dalamnya bergerak secara teratur dalam lapisan-lapisan sejajar (laminar), sehingga setiap lapisan fluida dapat meluncur dengan halus tanpa terjadi pencampuran antara lapisan yang satu dengan lainnya. Pada kondisi ini, arah dan kecepatan aliran fluida bersifat stabil serta tidak mengalami perubahan signifikan terhadap waktu. Aliran

laminar biasanya terjadi ketika kecepatan fluida rendah, viskositas tinggi, dan diameter saluran relatif kecil, sehingga gaya gesek antar molekul lebih dominan daripada gaya inersia. Secara matematis, aliran dikategorikan laminar apabila bilangan Reynolds (Re) memiliki nilai kurang dari 2300 ($Re < 2300$), yang menandakan bahwa pergerakan fluida berlangsung secara stabil dan teratur tanpa gangguan turbulensi.



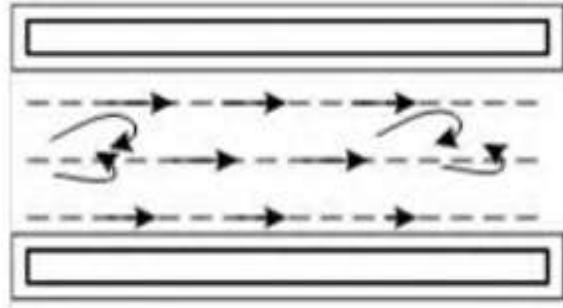
Gambar 2. 12 Aliran Laminar

(Sumber: Sa'adah, N. Nur. 2016)

2.7.2 Aliran Transisi

Aliran transisi adalah tahap peralihan antara aliran laminar dan aliran turbulen, di mana pola gerak fluida mulai berubah dari aliran yang teratur menjadi tidak stabil. Pada kondisi ini, sebagian daerah aliran masih menunjukkan karakteristik laminar, sementara bagian lainnya mulai memperlihatkan tanda-tanda turbulensi. Terjadinya aliran transisi sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti viskositas fluida, kecepatan aliran, serta geometri saluran tempat fluida mengalir. Secara umum, aliran dikatakan berada dalam kondisi transisi apabila bilangan Reynolds (Re) bernilai antara 2300 hingga 4000 ($2300 < Re < 4000$). Dalam rentang ini, kestabilan aliran mudah terganggu oleh perubahan kondisi fisik

atau gangguan eksternal, yang kemudian dapat berkembang menjadi aliran turbulen sepenuhnya.

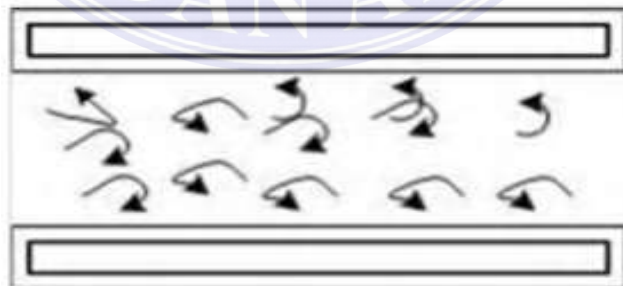


Gambar 2. 13 Aliran Transisi

(Sumber: Sa'adah, N. Nur. 2016)

2.7.3 Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah jenis aliran fluida dengan pergerakan partikel yang acak dan tidak beraturan, disertai pusaran yang menyebabkan pencampuran intensif antar lapisan fluida. Kondisi ini terjadi pada kecepatan tinggi, ketika gaya inersia lebih dominan daripada gaya viskos, dan ditandai dengan bilangan Reynolds (Re) > 4000 , yang menunjukkan fluida telah beralih dari aliran laminar menjadi aliran yang tidak stabil.



Gambar 2. 14 Aliran Turbulen

(Sumber: Sa'adah, N. Nur. 2016)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Tempat penelitian ini dilaksanakan di *workshop* Jln. Merak II No. 250, Tegal Sari Mandala II. Dan jadwal penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian Tugas Akhir

		Tahun 2024-2025																			
No	Nama Kegiatan	November			Desember				Januari				Februari				Maret				
		2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	Pengajuan judul																				
2	Penulisan proposal																				
3	Seminar proposal																				
4	Proses penelitian																				
5	Pengolahan data																				
6	Penyelesaian laporan																				
7	Seminar hasil																				
8	Evaluasi dan persiapan sidang																				
9	Sidang sarjana																				

3.2 Bahan dan Alat

3.2.1 Bahan

a. Peltier

Peltier merupakan modul TEC (*Thermoelectric Cooler*), umumnya dibungkus keramik tipis yang berisikan *bismuth telluride* di dalamnya. Pada komponen peltier ini jika diberi tegangan 12 VDC maka salah satu sisi akan menjadi dingin dan salah satu sisinya lagi menjadi panas. Peltier ini memiliki 2 sisi, ketika dialiri oleh tegangan DC maka sisi satunya akan menghasilkan panas dan sisi

lainnya akan menghasilkan dingin, dapat membuang panas dibagian sisi panasnya sebanyak mungkin maka, sisi lainnya akan menghasilkan dingin yang jauh lebih dingin. Transfer panas dari elemen peltier dapat dilakukan dengan beberapa cara seperti dengan menggunakan kipas dan *heatsink*.



Gambar 3. 1 *Thermoelectric cooler*

Adapun spesifikasi dari peltier pendingin tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Spesifikasi bagian peltier TEC1-12706

No.	Spesifikasi	Nilai
1.	Model	TEC1-12706
2.	Dimensi	(40 x 40) mm
3.	Operasi tegangan dan arus	0-15,2 V dan 0-6 A
4.	Operasi suhu	(-30) -70 °C
5.	Konsumsi daya maksimal	60 Watt

Tabel 3. 3 Spesifikasi kinerja peltier TEC1-12706

No.	Spesifikasi	25 °C	50 °C
1.	Q_{max} (watt)	50	57
2.	ΔT_{max} (°C)	66	75
3.	I_{max} (Ampere)	6,4	6,4
4.	V_{max} (Volt)	14,4	16,4
5.	Modul resistansi (Ohm)	1,98	2,30

b. Selang Transparan

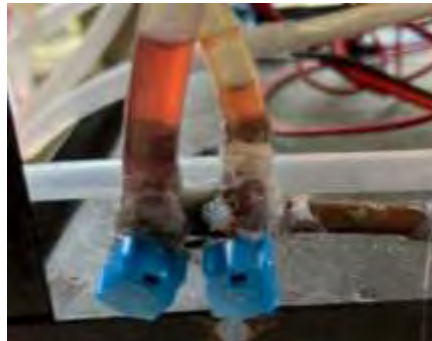
sistem pendinginan termoelektrik yang memanfaatkan cairan sebagai pendingin, selang berperan untuk mengalirkan cairan melalui elemen termoelektrik dan bagian-bagian lainnya. Tujuannya adalah untuk mengalihkan panas yang diserap oleh elemen Peltier ke area yang lebih dingin. Selang transparan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut:



Gambar 3. 2 Selang transparan

c. Keran fluida pendingin

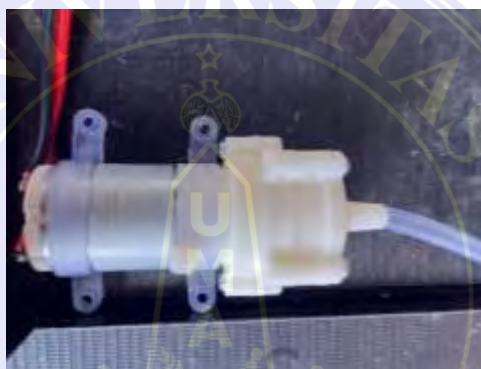
Pada kotak pendingin berbasis TEC, keran berfungsi untuk mengecilkan dan membesarkan laju aliran fluida sesuai yang di butuhkan. Berikut Gambar keran yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3. 3 Keran fluida

d. Pompa

Pompa adalah perangkat yang digunakan untuk memindahkan atau mengalirkan fluida (seperti cairan atau gas) dari satu tempat ke tempat lain. Pada sistem pendingin ini Pompa digunakan untuk mengalirkan fluida melalui elemen termoelektrik dan *heatsink*. Pompa membantu memastikan bahwa cairan pendingin mengalir dengan kecepatan yang cukup untuk memastikan pertukaran panas yang efektif antara elemen Peltier dan *heatsink*. Pompa yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3. 4 Pompa fluida

Adapun spesifikasi dari pompa fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Spesifikasi pompa fluida

No.	Kategori	Keterangan
1.	Dimensi	(92x 46 x 35) mm
2.	Material	Plastic ABS
3.	<i>Input voltage</i>	DC 6-12 V
4.	<i>Power consumption</i>	8,4 W
5.	<i>Max flow rate</i>	1,5 L/min

e. Power supply

Power supply (sumber daya listrik) adalah perangkat yang menyediakan listrik untuk mengoperasikan perangkat elektronik atau sistem lainnya. *Power supply* mengubah energi listrik dari sumber listrik utama, seperti listrik AC (arus bolak-balik) dari jaringan listrik, menjadi energi DC (arus searah). pada sistem pendingin termoelektrik *power supply* berfungsi untuk menyediakan energi listrik yang dibutuhkan oleh elemen Peltier agar dapat menghasilkan efek termoelektrik, yang pada gilirannya mendinginkan objek yang diinginkan. Selain itu, *power supply* memastikan stabilitas, keamanan, dan pengaturan daya yang tepat untuk seluruh sistem pendingin.



Gambar 3. 5 *Power supply*

Adapun spesifikasi dari *power supply* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 5 Spesifikasi *power supply*

No.	Kategori	Keterangan
1.	Dimensi	(20 x 5 x 4,5) cm
2.	<i>Input voltage</i>	AC 100 V & 2 V
3.	<i>Output</i>	DC 12 V
4.	<i>Ampere</i>	33.3 A

f. Kipas

Kipas adalah perangkat mekanis yang digunakan untuk menggerakkan udara, menciptakan sirkulasi udara, atau menghasilkan aliran udara untuk berbagai tujuan. Kipas bekerja dengan memutar baling-baling atau bilah yang terhubung ke motor, sehingga menghasilkan aliran udara yang bergerak ke suatu arah. Pada sistem pendingin ini kipas berfungsi untuk mengalirkan udara di sekitar *heatsink* (pendingin panas) yang terpasang di sisi panas elemen Peltier, membantu membuang panas ke udara sekitar. Adapun kipas yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut:



Gambar 3. 6 Kipas, a). kipas sisi panas. b). kipas sisi dingin

Adapun spesifikasi dari kipas yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

Tabel 3. 6 Spesifikasi kipas

No.	Kategori	Keterangan
1.	Jumlah Unit	a). 4 b). 4
2.	Model	a). KLOP8025HS b). FAN4010DC
3.	Dimensi	a). (8 x 8 x 2,5) cm b). (4 x 4 x 2,5) cm
4.	Tegangan	a). 12 V b). 12 V
5.	Arus	a). 0.14 A b). 0.09 A

g. Heatsink

Heatsink adalah komponen yang digunakan untuk mengalirkan atau menyebarkan panas dari perangkat elektronik atau sistem lainnya. Fungsi utama heatsink adalah untuk mencegah perangkat menjadi terlalu panas dengan meningkatkan area permukaan yang dapat melepaskan panas ke udara sekitarnya. *Heatsink* memiliki desain yang khusus (biasanya terdiri dari beberapa sirip atau fin) untuk meningkatkan luas permukaan yang bersentuhan dengan udara. *Heatsink* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.10 di atas.



Gambar 3. 7 Heat sink

h. Fluida pendingin

Fluida pendingin adalah cairan atau gas yang digunakan untuk menyerap, mentransfer, atau membuang panas dari suatu sistem atau perangkat yang menghasilkan panas. Tujuan utama fluida pendingin adalah untuk menjaga suhu perangkat agar tetap dalam rentang yang aman dan efisien, mencegah *overheating* yang dapat merusak komponen. Pada penelitian ini fluida yang digunakan sebagai media pendingin yaitu air.

i. Kabel dan konektor

Kabel dan konektor adalah dua komponen penting dalam sistem kelistrikan dan elektronik yang berfungsi untuk mentransmisikan daya atau sinyal dari satu perangkat ke perangkat lainnya.

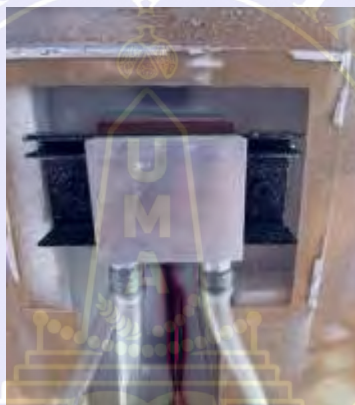
j. *Water block*

Water block pada Peltier adalah komponen yang digunakan untuk membantu mengelola panas yang dihasilkan oleh modul Peltier. Modul Peltier bekerja dengan prinsip termoelektrik, di mana ia dapat menghasilkan perbedaan suhu antara dua sisi (sisi dingin dan sisi panas) ketika arus listrik mengalir melaluinya. Namun, sisi panas Peltier akan menghasilkan banyak panas yang perlu dibuang untuk mencegah kerusakan pada modul atau sistem secara keseluruhan. Di sinilah peran *water block* sangat penting. *Water block* pada Peltier bertindak sebagai pendingin aktif yang terhubung ke sisi panas modul Peltier. Berikut adalah cara kerjanya:

1. Koneksi ke sisi panas Peltier: *Water block* terpasang pada sisi panas modul Peltier untuk menyerap panas yang dihasilkan. Biasanya, *water block*

terbuat dari bahan yang memiliki konduktivitas termal tinggi, seperti tembaga atau aluminium.

2. Sirkulasi air: Air mengalir melalui saluran di dalam *water block*, menyerap panas dari modul Peltier dan membawa panas tersebut keluar dari sistem. Proses ini membantu menurunkan suhu sisi panas modul Peltier dan menjaga sistem tetap efisien.
3. Pengeluaran panas: Air yang telah menyerap panas kemudian dibawa ke radiator atau *heat exchanger* untuk dibuang ke udara. Ini membantu menjaga suhu sistem tetap stabil.



Gambar 3. 8 *Water block*

Adapun spesifikasi dari *water block* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 7 Spesifikasi *Water block*

No.	Kategori	Keterangan
1.	Jumlah Unit	8
2.	Dimensi	(40 x 40 x 13) mm

k. Wadah fluida

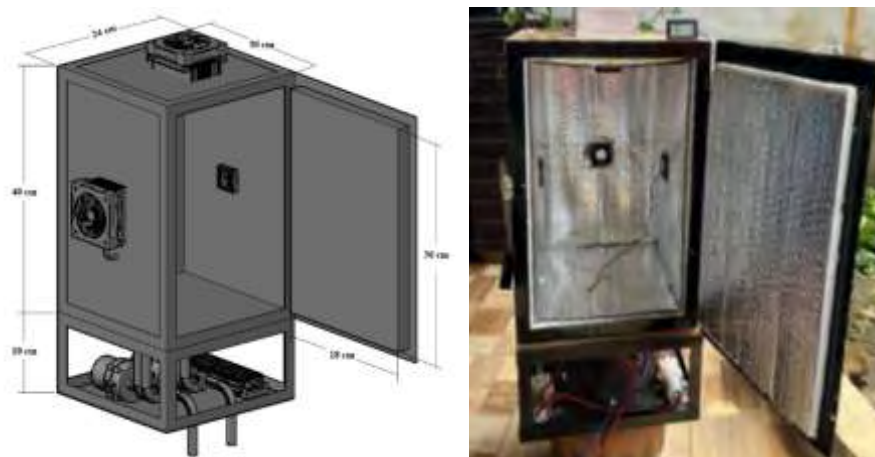
Wadah fluida merupakan wada yang digunakan sebagai tempat fluida pendingin pada aplikasi sistem pendingin berbasis TEC. Wadah yang digunakan dalam pengujian Adalah wadah jenis plastic dengan kapasitas tamping fluida sebesar 4 liter. Wadah penampung fluida dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut



Gambar 3. 9 Wadah fluida

1. Kotak Pendingin

Kotak pendingin, atau sering disebut *Cooler box* atau *Ice box*, adalah sebuah wadah yang dirancang untuk mempertahankan suhu dingin di dalamnya. Biasanya, kotak ini digunakan untuk menyimpan makanan atau minuman agar tetap dingin selama perjalanan, berkemah, piknik, atau aktivitas luar ruangan lainnya. Kotak pendingin dilengkapi dengan lapisan isolasi yang membantu menjaga suhu tetap dingin atau mempertahankan suhu rendah. Tersedia dalam berbagai ukuran dan bahan, seperti plastik atau logam, kotak pendingin dirancang agar ringan dan tahan lama. Kotak pendingin dapat dilihat pada gambar 3.10



Gambar 3. 10 Kotak pendingin

Adapun spesifikasi dari kotak pendingin yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 8 Spesifikasi kotak pendingin

No.	Kategori	Keterangan
1.	Dimensi	(24 x 30 x 50) cm
2.	Volume kotak pendinginan	(18 x 26 x 36) cm
3.	Material dalam	Triplek
4.	Material luar	Polystyrene foam

3.2.2 Alat

a. Termokopel

Termokopel adalah alat pengukur suhu yang bekerja berdasarkan prinsip efek termoelektrik, yaitu perubahan tegangan listrik yang terjadi ketika dua logam berbeda disambungkan pada dua titik dengan suhu berbeda. Termokopel terdiri dari dua kawat logam yang berbeda jenis, yang disatukan di satu titik yang disebut titik pengukuran atau junction. Ketika ada perbedaan suhu antara kedua titik tersebut, terjadi perbedaan tegangan listrik yang dapat diukur dan dikonversi menjadi nilai suhu. Berikut ini adalah gambar termokopel yang digunakan pada penelitian ini:



Gambar 3. 11 Termokopel

Adapun spesifikasi dari termokopel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 9 Spesifikasi Termokopel

No.	Kategori	Keterangan
1.	Model	Lutron BTM-4208SD
2.	Tipe	K
3.	Jumlah chanel	12

b. Gelas ukur (500 ml)

Gelas ukur adalah alat laboratorium yang digunakan untuk mengukur volume cairan secara kasar atau semi-akurat. Gelas ini biasanya terbuat dari gelas (kaca borosilikat) atau plastik (seperti polipropilena), dan memiliki tanda-tanda ukur (skala) di sisi luarnya



Gambar 3. 12 Gelas ukur

c. *Wattmeter*

Wattmeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur daya listrik pada suatu beban dalam sebuah sistem kelistrikan. Daya ini dihitung dalam satuan watt (W), yang merupakan hasil perkalian antara tegangan (volt) dan arus (ampere) yang mengalir melalui beban. *Wattmeter* sering digunakan dalam aplikasi industri, laboratorium, atau sistem distribusi energi untuk memonitor penggunaan daya, efisiensi energi, dan kinerja perangkat listrik.



Gambar 3. 13 *Wattmeter*

d. *Data logger*

Data logger adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk merekam dan menyimpan data secara otomatis dalam jangka waktu tertentu. Pada penelitian

ini data yang direkam adalah suhu, waktu, kecepatan aliran. Data logger bekerja dengan memonitor kondisi ini secara terus-menerus dan menyimpan hasil pengukuran dalam memori internalnya untuk dianalisis nanti.

3.3 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen faktorial dengan variabel utama yaitu laju aliran fluida (rendah, sedang, tinggi). Pengujian dilakukan untuk mengukur kinerja TEC pada masing-masing variasi laju aliran fluida. Parameter yang diukur adalah suhu pendinginan, stabilitas suhu, waktu pendinginan, dan konsumsi energi. Data yang dikumpulkan akan dianalisis untuk mengevaluasi performa TEC pada setiap kombinasi laju aliran fluida.

3.4 Populasi dan Sampel

Populasi dan sampel dalam penelitian Analisis Kinerja *Thermoelectric Cooler* (TEC) Sebagai Refrigerator Dengan Variasi Laju Aliran Fluida Pendingin ini di deskripsikan pada tabel 3.10 sebagai berikut.

Tabel 3. 10 Populasi dan Sampel

Jenis Fluida	Variasi laju aliran fluida (m ³ /s)	Waktu pendinginan (menit)	kestabilas suhu (σ)	COP TEC	COP sistem
air	8×10^{-6}	60	1.15	0,30	0.02
	5×10^{-6}	60	0.74	0,29	0.012
	2×10^{-6}	60	0.51	0,29	0.006

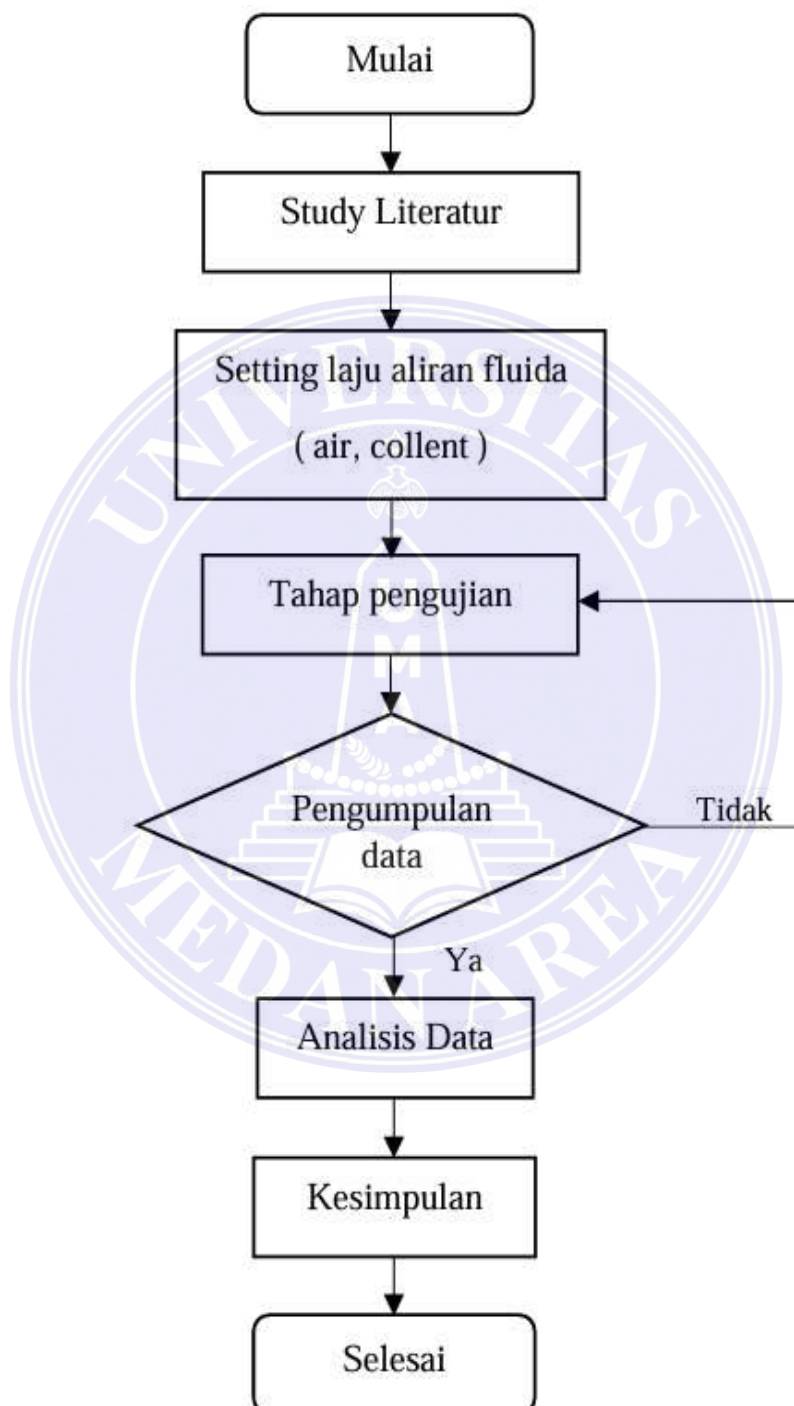
3.5 Prosedur kerja

Adapun prosedur kerja atau tahapan yang harus dilakukan dalam penelitian optimasi laju aliran fluida pada sistem *Thermoelectric cooler* (TEC) untuk meningkatkan efisiensi refrigerator ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan segala alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, dan memeriksa semua alat sebelum memulai pengujian.
2. Pengoperasian alat penelitian yaitu dengan melakukan variasi laju aliran fluida terhadap kotak pendingin termoelektrik. Dengan variasi laju aliran fluida $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
3. Mencatat data hasil penelitian, yaitu meliputi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu target, dan konsumsi energi untuk setiap variasi laju aliran fluida. serta dengan mencatat kestabilan suhu yang dianalisa dengan memantau perubahan suhu setiap 5 menit pengujian, dari setiap variasi laju aliran fluida (air) yang dilakukan
4. Melakukan analisis data, seperti menghitung *Coefficient of Performance* (COP) dan membandingkan hasil antara laju aliran fluida yang berbeda untuk menghasilkan kombinasi terbaik dalam hal stabilitas suhu, waktu pendinginan, dan penurunan suhu maksimal.
5. Membuat Kesimpulan dari hasil penelitian analisis kinerja termoelektrik cooler dengan variasi laju aliran fluida yang telah dilakukan

3.6 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada diagram berikut:



BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

1. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan, nilai COP pada kotak pendingin berbasis TEC ini sangat di pengaruhi oleh laju aliran fluida pendingin yang digunakan. Dimana pada laju aliran pertama nilai COP sistemnya sebesar 0,02, pada laju aliran ke dua nilai COP sistemnya 0,012, dan pada laju aliran ke tiga nilai cop sistemnya 0,006
2. Berdasarkan analisis Kestabilan suhu yang telah dilakukan maka didapatkan simpang baku populasi pada setiap laju aliran fluida, dimana pada laju aliran pertama simpang baku populasinya yaitu 1,15 °C, pada laju aliran ke dua sebesar 0,74 °C, dan pada laju aliran ke tiga hanya sebesar 0,51 °C, hal ini menunjukkan bahwa stabilitas penurunan suhu paling bagus pada laju aliran ter rendah yaitu $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
3. Pada laju aliran rendah $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ menghasilkan ketabilan suhu yang paling tinggi, namun pendinginan kurang optimal karena fluida cepat jenuh dengan kalor. Pada laju menengah $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ sistem mulai stabil. Sedangkan pada laju lebih tinggi $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ diperoleh COP sistem yang paling tinggi, namun mempunyai nilai flukstuasi suhu yang paling besar sehingga mengakibatkan penurunan suhu yang tidak stabil.

5.2 Saran

1. Disarankan untuk menambahkan fin atau sirip pendingin yang lebih luas pada sisi panas agar pembuangan kalor lebih maksimal.
2. Penggunaan water block dengan material konduktivitas tinggi (misalnya tembaga) dapat meningkatkan transfer kalor sehingga kinerja TEC lebih stabil.
3. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan variasi arus listrik dan tegangan untuk mengetahui pengaruh daya input terhadap COP sistem.
4. Analisis dapat diperluas dengan menghitung efisiensi exergy untuk mengetahui kerugian energi yang terjadi pada sistem.
5. Sistem sirkulasi fluida sebaiknya menggunakan pompa dengan kontrol kecepatan agar variasi laju aliran lebih presisi.

DFTAR PUSTAKA

- Aziz, R., Tanwirul Afkar, M., Teknik Pendingin dan Tata Udara, J., Negeri Indramayu, P., Raya Lohbener Lama no, J., & Lohbener Kab Indramayu, K (2017). Sistem Kontrol Suhu Penyimpanan Buah-Sayur Pada Mesin Prndingin Termoelektrik. *Jurnal Teknologi Terapan* |, 3(2).
- Akbar, M., Rizal, T. A., & Syntia, R. (2021). Pengujian Kinerja Pendingin *Thermoelectric Cooler* (TEC) Menggunakan Heatsink Dengan Variasi Dimensi dan Jenis Material.
- Alfalah, Y. (2023a). Pengaruh Variasi Jumlah TEC Pada Box Pendingin Terhadap Tempratur Dan Tegangan. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 16(1), 24–28. <https://doi.org/10.24843/JEM.2023.v16.i01.p05>
- Alfiansyah, I. (2021). *Studi Eksperimental Modul Thermoelectric TEC-12706 dan TEG-27145 Sebagai Pendingin Pengganti Refrigeran*.
- Artikel, R., & Kunci, K. (2356). Rancang Bangun dan Evaluasi Kinerja Kotak Pendingin Berbasis Termoelektrik. <https://ejurnalunsam.id/index.php/jurutera>
- Aziz, A., Subroto, J., & Silpana, V. (2015). Aplikasi Modul Pendingin Termoelektrik Sebagai Media Pendingin Kotak Minuman (Hal 33-40 Azridjal Aziz,Joko Subroto, Villager Silpana UNRI). <http://en.wikipedia.org/wiki/>
- Agus Salim, A. T., & Indarto, B. (2018). Studi Eksperimental Karakterisasi Elemen Termoelektrik Peltier Tipe TEC. *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, 3(1), 179–182. <https://doi.org/10.32486/jeecae.v3i1.211>
- Darmawan, R., Veranika, R. M., Ali, H., & Fauzie, M. A. (2022). Perancang dan Pembuatan Alat Pendingin Air Aquaescape Dengan Kapasitas Air 10 Liter.
- Faizal, R., Agus Sahbana, M., & Risdiyanto Ismail, N. (2022). Analisa VariasiI Heatsink Processor Terhadap Unjuk Kerja Sistem Pendingin Portable Thermoelectric. *Jurnal SIMETRIS*, 13.
- Fauzia, N., Mutini, M. S., Anggoro, D., & Indarto, B. (2018). Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik Cooler Menggunakan Material Semikonduktor Bismuth Telluride (Bi₂Te₃) dan Software ANSYS.
- Gökçek, M., & Şahin, F. (2017). *Experimental performance investigation of minichannel water cooled-thermoelectric refrigerator. Case Studies in Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.03.004>
- Haryanto, H., Rifa Makhsun, M., & Saraswati, I. (2015). Perancangan Modul Termoelektrik Generator Menggunakan Peltier.
- Ibrahim, F. L. B., & Setiyawan, A. (2017). Studi Eksperimental Karakteristik dan Performa TEC (Thermoelectric Cooler) 1-12706.

- Ilham, R. M., & Pirngadi, H. (2016). Rancang Bangun Kulkas Portable Menggunakan Termoelektrik Berbasis Mikrokontroler
- Larasati, R. (2020). Analisis Sifat Termoelektrik Material Bulk Mn₄Si₇ Menggunakan Metode DFT (Density Functional Theory).
- Ley Busthomy, P., & Widyartono, M. (2020). Generator Termoelektrik dengan Memanfaatkan Panas yang Terbuang dari Api Pembakaran Untuk Pengisian Baterai Handphone
<http://www.learnaboutelectronics.org/PSU/psu3>
- Mirmanto, M., Syahrul, S., & Wirdan, Y. (2019). *Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(1), 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.09.006>
- Setiawan, D., Hasudungan Siahaan, H., Wibowo, C., & Syafitri Kurniasetiawati, A. (2024). Pengaruh *Power Supply* Terhadap Kinerja Cooler Box Mini Pada Sistem Termoelektrik Peltier. *In Technology. Education and Mechanical Engineering* (Vol. 3, Issue 1).
- Sucipta, I. M., Astika, I. M., & Santika, I. G. Y. D. (2022). Pengaruh Penggunaan *Thermoelectric Cooler* Terhadap Unjuk Kerja Kotak Pendingin Portable
- Wibowo, N. T., Aribowo, W., Widyartono, M., & Chandra Hermawan, A. (2021). Rancang Bangun Thermoelectric Generator Sebagai Pembangkit Listrik Dengan Memanfaatkan Panas Matahari.