

Review Prototipe Pendingin Mesin Kecil Berbasis Teknologi Peltier

Agil Hidayatulloh, Dan Mugisidi

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika
Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA, Jl. Tanah Merdeka No. 6 Jakarta Timur, Indonesia
DKI Jakarta, Indonesia.

Email: agilhidayatulloh51@gmail.com

Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Teknologi Peltier menggunakan efek termoelektrik untuk mentransfer panas dari satu bagian modul ke bagian lainnya, sehingga dapat berfungsi sebagai alat pendingin atau pemanas tanpa komponen mekanis yang bergerak. Meskipun memiliki kelebihan dalam hal keandalan dan kesesuaian dengan lingkungan, efisiensi energi modul Peltier masih kurang efisien jika dibandingkan dengan sistem pendingin tradisional. Penelitian sebelumnya banyak berkonsentrasi pada peningkatan kinerja melalui inovasi bahan semikonduktor, rancangan sistem termal, dan teknik optimasi. Dalam penerapan pada mesin kecil, hambatan utama mencakup pengelolaan panas di sisi panas, penggabungan desain yang ringkas, serta pemeliharaan stabilitas suhu kerja. Akan tetapi, temuan penelitian mengindikasikan bahwa dengan rancangan yang sesuai dan kemajuan bahan, modul Peltier memiliki potensi untuk menyediakan solusi pendinginan yang efisien dan lestari bagi mesin berdaya rendah serta perangkat biomedis yang dapat dipindahkan.

Kata Kunci: Peltier, Pendingin mesin kecil, Kinerja, prototipe, Analisis.

Abstract

Peltier technology uses the thermoelectric effect to transfer heat from one part of the module to another, allowing it to function as a cooler or heater without moving mechanical components. Despite its advantages in terms of reliability and environmental compatibility, Peltier modules still lack energy efficiency compared to traditional cooling systems. Previous research has focused on improving performance through innovations in semiconductor materials, thermal system design, and optimization techniques. In applications to small machines, key challenges include managing the heat on the hot side, incorporating compact designs, and maintaining stable operating temperatures. However, research findings indicate that with appropriate design and material advancements, Peltier modules have the potential to provide efficient and sustainable cooling solutions for low-power machines and portable biomedical devices.

Keywords: Peltier, Small engine cooler, Performance, prototype, Analysis.

1. PENDAHULUAN

Di era kontemporer, efisiensi energi dan pengendalian panas menjadi masalah krusial di berbagai sektor, seperti otomotif dan produksi mesin ringkas. Salah satu inovasi yang semakin menarik perhatian dalam pengaturan panas adalah teknologi Peltier. Teknologi ini menggunakan efek termoelektrik untuk mentransfer panas dari satu bagian perangkat ke bagian lain, sehingga dapat berfungsi sebagai alat pendingin maupun pemanas. Pada mesin kecil, seperti motor atau generator portabel, pengaturan panas yang efektif sangat penting untuk mempertahankan performa maksimal

dan memperpanjang umur mesin. Namun, penerapan teknologi Peltier dalam pendinginan mesin kecil masih menghadapi berbagai tantangan terkait efisiensi energi. Modul Peltier dikenal memiliki efisiensi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan sistem pendingin tradisional, seperti pendingin udara atau pendingin cair. Hal ini disebabkan karena konversi energi listrik menjadi energi panas tidak sepenuhnya optimal. Selain itu, modul Peltier membutuhkan pengendalian panas yang baik di sisi panasnya untuk menghindari *overheating* yang dapat menurunkan performa perangkat. Tantangan lain adalah pengintegrasian teknologi Peltier ke dalam rancangan mesin kecil

yang sudah ada. Mesin kecil sering kali memiliki ruang terbatas untuk menambahkan komponen tambahan. Oleh karena itu, desain prototipe pendingin berbasis Peltier harus mempertimbangkan aspek dimensi dan bobot agar tidak mengganggu fungsi mesin secara keseluruhan. Selain itu, biaya produksi dan operasional juga menjadi faktor penting yang harus diperhatikan dalam *implementasi* teknologi ini. Meski demikian, manfaat potensial dari penggunaan teknologi Peltier dalam pendinginan mesin kecil tidak boleh diabaikan. Dengan kemajuan dan inovasi lebih lanjut, teknologi ini berpotensi memberikan solusi pendinginan yang lebih ramah lingkungan dan hemat energi dibandingkan sistem pendingin konvensional. Teknologi Peltier juga unggul karena tidak memiliki komponen bergerak, sehingga risiko kerusakan mekanis dan kebutuhan pemeliharaan dapat berkurang. Dalam industri saat ini, di mana keberlanjutan dan *efisiensi* energi menjadi prioritas utama, riset dan pengembangan teknologi pendingin berbasis Peltier sangat relevan. Banyak studi telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan performa modul Peltier, termasuk dengan pemanfaatan bahan baru dan rancangan sistem yang lebih inovatif. Oleh karena itu, *evaluasi* performa prototipe pendingin mesin kecil berbasis teknologi Peltier merupakan topik penting yang berpotensi memberikan kontribusi besar bagi industri [1].

2. PELTIER DAN TEKNOLOGI TERMoeLEKTRIK

A. EFEK PELTIER DAN TEKNOLOGI TERMoeLEKTRIK

Efek Peltier merupakan fenomena termoelektrik yang terjadi ketika arus listrik mengalir melalui dua bahan konduktor dengan sifat berbeda, memicu transfer panas. Dalam aplikasi pendinginan, modul Peltier menggunakan efek ini untuk memindahkan panas dari satu sisi perangkat ke sisi lainnya, yang kemudian harus dilepaskan ke lingkungan. Teknologi termoelektrik, seperti modul Peltier, menawarkan keuntungan berupa absennya komponen bergerak, sehingga meminimalkan risiko kerusakan mekanis dan kebutuhan pemeliharaan. Meski demikian, tantangan utama tetap efisiensi konversi energi listrik menjadi pendinginan, yang biasanya lebih rendah daripada sistem pendingin tradisional.

B. TEKNOLOGI PELTIER DALAM SISTEM PENDINGIN

Teknologi Peltier telah diimplementasikan dalam berbagai aplikasi pendinginan, mulai dari pendingin CPU komputer hingga sistem pendingin portabel. Pada mesin kecil, seperti motor atau generator portabel, penggunaan teknologi ini berpotensi meningkatkan efisiensi pengaturan panas dan memperpanjang masa pakai mesin. Pemasangan modul Peltier ke dalam rancangan mesin kecil memerlukan perhatian khusus terhadap aspek ukuran, bobot, dan pengendalian panas [2].

C. TANTANGAN DAN PELUANG PENERRAPAN TEKNOLOGI PELTIER

Salah satu hambatan utama dalam penerapan teknologi Peltier adalah efisiensi energi yang kurang memadai. Modul Peltier membutuhkan pengendalian panas yang efektif di sisi panasnya untuk menghindari overheating yang bisa menurunkan performa. Selain itu, pemasangan modul Peltier ke dalam rancangan mesin kecil yang sudah ada memerlukan perhatian khusus terhadap aspek ruang dan bobot. Namun, teknologi Peltier memberikan peluang besar, terutama dalam hal keberlanjutan dan efisiensi energi. Dengan inovasi bahan baru dan rancangan sistem yang lebih kreatif, efisiensi dan performa modul Peltier bisa ditingkatkan. Bidang ini sangat penting dalam konteks industri yang semakin menekankan keberlanjutan, menekan keinginan dan efisiensi energi [3].

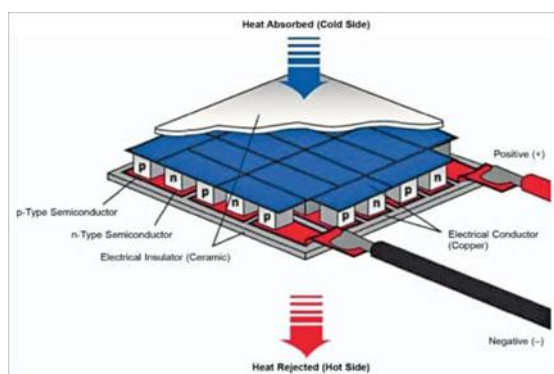
D. TERMoeLEKTRIK PELTIER

Menjelaskan potensi penggunaan bahan baru untuk memperbaiki efisiensi termoelektrik. Di sisi lain, mengulas berbagai desain sistem yang bertujuan mengoptimalkan kinerja modul Peltier, terutama dalam fungsi pendinginan. Pengembangan dan penerapan elemen Peltier, baik sebagai alat pendingin maupun generator energi, telah dilakukan secara luas hingga kini. Di Laboratorium Perpindahan Kalor, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia, penelitian tentang pemanfaatan elemen Peltier dilakukan secara mendalam, termasuk aplikasinya sebagai pompa kalor. Penelitian berikutnya melibatkan pembuatan sistem pendingin yang menggunakan satu unit Peltier sebagai pompa kalor untuk kotak vaksin dan kotak transportasi sampel darah portabel, yang mulai dikembangkan. Sistem ini memanfaatkan pendinginan air untuk mendinginkan sisi panas Peltier. Untuk memperbaiki kemampuan pendinginan dan kemudahan transportasi, inovasi lanjutan mencakup desain kotak pembawa sampel darah dengan sistem Peltier ganda, yang dikombinasikan dengan heatsink, kipas, heatpipe,

serta penerapan vakum. Hasil pengembangan ini menunjukkan kemajuan besar, dengan suhu dalam kabin mencapai 0°C untuk kotak pembawa sampel darah po dan -10°C untuk kotak pembawa vaksin portabel. Dengan suhu yang sangat rendah ini, sistem tidak hanya berfungsi sebagai wadah penyimpanan darah portabel, tetapi juga berpotensi untuk menyimpan organ tubuh, sampel air liur, vaksin dalam skala besar, dan aplikasi biomedis lainnya [4].

3. PERANCANGAN PELTIER

Beberapa elemen atau sistem yang diperlukan untuk menciptakan sebuah struktur yang dirancang secara menyeluruh.



Gambar 1 desain perancangan peltier [1]

Modul Peltier terbuat dari dua pelat keramik eksternal yang dipisahkan oleh rangkaian pelet semikonduktor yang dihubungkan secara seri dengan doping PN. Saat arus listrik mengalir melalui susunan ini, gradien suhu terbentuk berdasarkan efek Peltier. Akibatnya, satu sisi modul mendingin, sehingga mampu menarik panas dari sumber tertentu (seperti permukaan komponen seperti chip atau dioda laser), sedangkan sisi lainnya memanaskan dan dapat mengalirkan panas ke udara sekitar atau heatsink. Dengan mekanisme ini, panas dapat diekstraksi secara efektif dari komponen yang dipasang, memastikan bahwa panas yang diambil dan panas yang dihasilkan oleh arus operasional dapat dibuang ke permukaan berlawanan. Desain sistem pendingin termoelektrik perlu mempertimbangkan bahwa elemen Peltier tidak berperan dalam menyerap panas. berfungsi sebagai alat transfer panas. Oleh karena itu, penting untuk membuang panas dari bagian yang panas. Untuk merancang sistem yang mampu menurunkan suhu komponen hingga level yang diperlukan, beberapa parameter kunci harus diketahui: 1. Suhu target pada sisi dingin modul. 2. Selisih suhu di seluruh modul. 3. Suhu pada sisi panas modul. 4. Luas permukaan modul. 5. Arus yang dibutuhkan untuk pengoperasian. 6. Tegangan yang

diperlukan untuk penggerak. Lembar spesifikasi modul Peltier menunjukkan selisih suhu yang diukur pada permukaan luar pelat keramik modul. Perlu ada lapisan tipis bahan antarmuka termal di titik kontak modul dengan komponen dan unit pendingin, sehingga efek ini harus diperhitungkan dalam perancangan sistem. Mengetahui suhu sisi panas krusial karena spesifikasi modul Peltier bervariasi berdasarkan suhu operasionalnya. Luas permukaan modul Peltier idealnya cocok dengan permukaan sumber panas. Ketidaksesuaian yang besar dapat diatasi dengan menggunakan penyebar panas, yang biasanya terbuat dari aluminium atau tembaga. Seperti LED, modul termoelektrik adalah perangkat yang digerakkan oleh arus listrik. Cara termudah untuk mencapai performa yang diinginkan adalah menggunakan sumber arus terkontrol yang stabil untuk memberikan tegangan beban yang sesuai, yang dapat ditentukan dari spesifikasi modul dan batasan operasionalnya. Teknologi pendinginan yang akan diterapkan adalah modul termoelektrik (termasuk efek Peltier) yang dipasang pada sistem pendingin mesin kecil (seperti mesin bensin atau diesel kecil) untuk mengangkat atau mengalirkan panas dari mesin ke permukaan pendingin atau heatsink, yang kemudian dibuang ke udara atau cairan. Mesin kecil menghasilkan banyak panas limbah; misalnya, proporsi kehilangan panas ke sistem pendingin pada mesin pembakaran dalam bisa mencapai 20-35% dari energi bahan bakar. Dasar prinsip desain: 1. Hitung jumlah panas yang harus dikeluarkan dari mesin ke sistem pendingin. 2. Pilih modul Peltier (Kulkas Termoelektrik, TEC) dengan kapasitas pendingin maksimum yang memadai untuk menangani beban panas dan selisih temperatur antara bagian panas dan dingin. 3. Rancang sistem antarmuka (antara mesin ↔ pendingin ↔ modul Peltier ↔ heatsink/udara) dengan mempertimbangkan konduksi, konveksi, dan resistansi termal. Rancang aliran fluida pendingin (air/pendingin) dan aliran udara (heatsink), sehingga panas yang diserap oleh modul Peltier dapat sepenuhnya dibuang ke lingkungan. Integrasikan sensor (suhu, aliran) dan kontrol (kontrol arus modul Peltier) untuk mencegah pendinginan berlebih atau kerusakan modul Peltier akibat selisih suhu yang terlalu besar atau sisi panas yang terlalu tinggi [4].

4. SISTEM PENDINGIN/PEMANAS PELTIER

Prototipe sistem pendingin dan pemanas ini dirancang dengan menggunakan pendinginan pada sisi panas sel melalui blok air atau reservoir panas. Untuk mempercepat respon termal sistem, diterapkan reservoir panas berkapasitas rendah yang umum

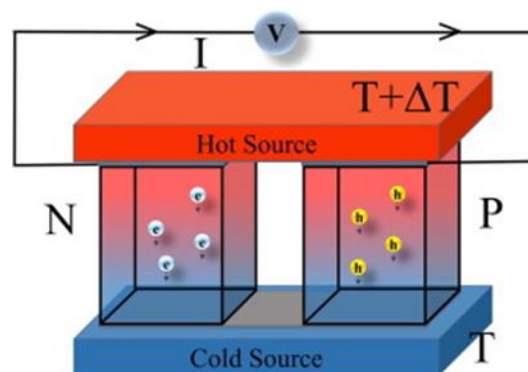
digunakan di perangkat komputer untuk mendinginkan prosesor. Dua blok tembaga ekstra dipasang pada bangku uji internal guna mengukur daya termal yang diserap dan dikeluarkan dari sel Peltier. Pengukuran suhu dilakukan dengan sensor suhu dan sistem LabVIEW [5].

5.EFEK PELTIER

Efek Peltier adalah fenomena yang bertentangan dengan Efek Seebeck. Saat arus listrik mengalir melalui rangkaian tertutup, panas dapat terserap di satu sisi logam dan dilepaskan di sisi lainnya. Konfigurasi termokopel dimodifikasi untuk menciptakan berbagai bentuk yang menghasilkan dampak Peltier. Pada saat tegangan (E_{in}) diterapkan, arus listrik (I) yang mengalir melalui terminal T1 dan T2 menyebabkan pendinginan ringan (QC) di sambungan termokopel A, sedangkan di sambungan B terjadi pemanasan (QH) dengan pelepasan panas. Fenomena ini reversibel, sehingga membalikkan arah arus akan mengubah arah aliran panas. Pemanasan yang timbul sebanding dengan $I^2 \times R$, di mana R adalah resistansi listrik konduktor [2]. Efek Joule ini bertentangan dengan Efek Peltier dan menurunkan efisiensi pendinginan. Secara matematis, Efek Peltier dapat dinyatakan sebagai: $QH = \beta \times I = \alpha \times I \times T$. Dalam rumus ini, β adalah koefisien diferensial bahan A dan B. Arus listrik (I) dalam ampere, sedangkan laju pendinginan (QC) dan pemanasan (QH) dalam watt. Nilai koefisien Peltier β menunjukkan efektivitas pendingin termoelektrik. Jika β positif ($\beta > 0$), energi bergerak searah dengan aliran panas dan arus listrik [6]. Kinerja sistem termoelektrik dalam aplikasi tertentu bergantung pada tiga faktor utama. Sisi panas berperan sebagai lokasi pembuangan panas saat sistem mendapat daya arus searah (DC) dan biasanya terhubung dengan unit pendingin [7]. Dengan menggunakan heatsink yang didinginkan udara—baik melalui konveksi natural maupun paksa—suhu sisi panas dan laju transfer panasnya dapat dihitung lewat persamaan: $TH = T_{amb} + \theta QH$, di mana TH adalah suhu sisi panas, T_{amb} adalah suhu sekitar, dan θ adalah resistansi termal dari penukar panas ($^{\circ}C/W$). Radiasi memicu transfer panas antara objek dengan suhu berbeda, konveksi terjadi melalui udara dengan variasi suhu, sedangkan konduksi menyebabkan hilangnya panas melalui kabel atau komponen yang bersentuhan. Kerugian akibat isolasi timbul dari kebocoran panas pada lapisan pelindung, sementara kerugian transien muncul selama perubahan suhu [8].

6.EFEK SEEBECK

Membuat sebuah rangkaian tertutup di mana salah satu sambungan berfungsi sebagai referensi dan dijaga pada suhu rendah (T_C), sementara sambungan lainnya berada pada suhu yang lebih tinggi. Selisih suhu di antara kedua sambungan tersebut menghasilkan beda potensial listrik atau tegangan output (E_{out}) di terminal T1 dan T2. Pada rangkaian tertutup, tegangan ini mendorong aliran arus listrik yang berkelanjutan. Tegangan tersebut dikenal sebagai gaya gerak listrik Seebeck (Seebeck EMF) [9].



Gambar 2 efek seebeck [4]

7. TERMO ELEKTRIK PERLTIER

Dua sambungan logam yang terbuat dari jenis logam berbeda dialiri arus listrik, hal itu menghasilkan perbedaan suhu, dan fenomena ini dikenal sebagai Efek Peltier. Penemuan ini menjadi dasar penting bagi kemajuan teknologi bahan semikonduktor, yang kemudian menghasilkan alat pendingin termoelektrik. Perkembangan di bidang ini berlangsung sangat cepat, terutama dalam penerapan pendinginan dan pemanasan, sejak bahan semikonduktor mulai diintegrasikan ke dalam sistemnya [10]. Efek Peltier adalah fenomena di mana panas muncul di satu sisi sambungan dan pendinginan terjadi di sisi lainnya saat arus listrik searah (DC) mengalir melalui sambungan tersebut. Perangkat termoelektrik adalah komponen yang dapat mengubah energi panas langsung menjadi energi listrik (sebagai generator termoelektrik) atau melakukan sebaliknya, yaitu mengubah energi listrik menjadi energi panas atau dingin [11]. Proses ini melibatkan pertukaran energi di mana perbedaan suhu bisa diubah menjadi energi listrik, dan begitu pula sebaliknya [12]. Kini, fenomena ini telah diwujudkan dalam bentuk modul termoelektrik, yaitu alat kecil berbentuk kepingan persegi dengan dimensi dan ketebalan tertentu [13].



Gambar 3 peltier [12]

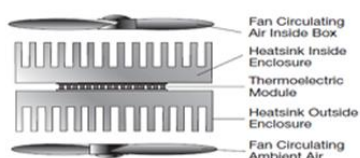
8. MASALAH DAN STRATEGI PROSES

Baru-baru ini, pendingin termoelektrik telah diterapkan secara komersial untuk berbagai aplikasi, seperti lemari es portabel, pendinginan air, pendinginan udara lokal, dan lainnya. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa karakteristik utama pendinginan termoelektrik, termasuk COP, efisiensi energi, dan biaya pendinginan, sangat dipengaruhi oleh kondisi fluida termal di kedua sisi modul, daya input ke termoelektrik, serta jumlah modul Peltier yang digunakan untuk daya input tertentu. Pengaruh parameter-parameter ini tidak bersifat sederhana positif atau negatif, sehingga pengambilan keputusan memerlukan proses optimasi untuk menilai dampaknya secara kuantitatif dan kualitatif. Oleh karena itu, dalam metode optimasi diterapkan untuk mengatasi masalah tersebut pada unit pendingin udara termoelektrik, di mana fluida air mengalir di sisi panas sementara fluida udara mengalir di sisi dingin [14].

9. PENGATURAN TERMOELEKTRIK PELTIER

Untuk menghasilkan efek termoelektrik bahan semikonduktor tipe P dan N dihubungkan secara berurutan melalui pelat logam. Akibatnya, bahan semikonduktor tersebut menyerap energi panas dari satu sisi dan melepaskannya ke sisi lainnya. Dengan kata lain, ketika bahan padat P-N dihubungkan secara elektrik dalam rangkaian seri dan secara termal dalam susunan paralel, hal itu akan membentuk satu unit perangkat termoelektrik [15].

Modul TEC biasanya terdiri dari dua substrat konduktif termal tinggi (Al_2O_3 , AlN , BeO) [4]



Gambar 4 modul peltier

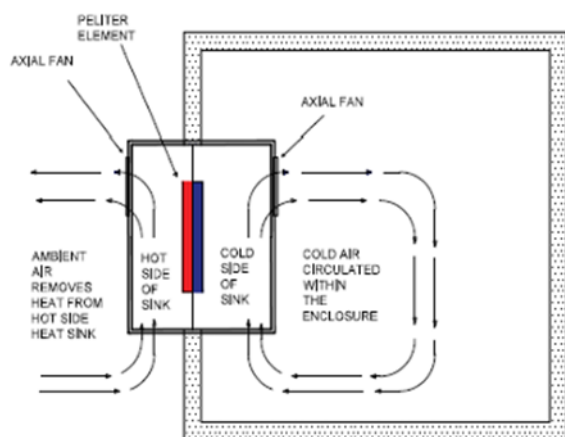
Modul termoelektrik berfungsi sebagai pelat panas atau dingin. Rangkaian pelat semikonduktor tipe-P dan tipe-N (seperti Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , Bi_2Se_3 , PbTe , SiGe) dihubungkan secara seri secara elektrik, dan diapit di antara substrat. Perangkat ini biasanya dipasang di sisi dingin modul TEC, sementara heat sink yang diperlukan untuk meningkatkan pembuangan panas dipasang di sisi panas. Solder umumnya digunakan untuk menghubungkan elemen-elemen TEC ke bantalan konduktor substrat. Ini adalah konstruksi modul termoelektrik satu tahap. Sistem termoelektrik khas dirancang untuk mendinginkan udara di dalam wadah (misalnya, kotak piknik atau wadah peralatan), yang merupakan jenis aplikasi TE paling umum. Tantangannya adalah mengumpulkan panas dari bagian dalam kotak, memompanya ke penukar panas di bagian luar, dan melepaskan panas tersebut ke udara sekitar [16]. Biasanya, ini dilakukan dengan menggunakan dua kombinasi heat sink dan kipas yang dipadukan dengan satu atau lebih perangkat Peltier. Salah satu heat sink digunakan di bagian dalam enklosur; didinginkan hingga suhu di bawah suhu udara di dalam kotak, heat sink menyerap panas saat udara bersirkulasi di antara siripnya [17]. Dalam kasus sederhana, perangkat Peltier dipasang di antara heat sink sisi dingin ini dan heat sink sisi panas. Saat arus searah mengalir melalui perangkat termoelektrik, ia secara aktif memompa panas dari heat sink sisi dingin ke heat sink sisi panas. Kipas di sisi panas kemudian mensirkulasikan udara sekitar di antara sirip heat sink untuk menyerap sebagian panas yang terkumpul. Perhatikan bahwa panas yang hilang di sisi panas tidak hanya mencakup panas yang dipompa dari kotak, tetapi juga panas yang dihasilkan di dalam perangkat Peltier itu sendiri. Mari kita lihat dalam angka riil. Bayangkan kita harus memompa 25 watt dari sebuah kotak untuk menurunkan suhunya dari 20°C (suhu sekitar) menjadi 3°C . Untuk mencapai ini, kita mungkin perlu menurunkan suhu sisi dingin hingga 0°C . Dengan menggunakan perangkat Peltier yang menarik daya 4,1 amp pada 10,4 V, sisi panas sistem harus mendisipasi 25 watt dari beban termal ditambah 42,6 watt yang dibutuhkan untuk memberi daya pada modul TE (total 67,6 watt). Dengan menggunakan sisi panas dan kipas dengan resistansi termal efektif $0,148^\circ\text{C}/\text{W}$, suhu sisi panas akan naik sekitar 10°C di atas suhu sekitar. Kinerja pendingin termoelektrik dapat ditingkatkan dengan bekerja pada sisi termal. Dengan merancang penyerap panas yang tepat di sisi panas dan dingin, sistem ini dapat diperbaiki. Untuk mendapatkan kinerja terbaik, pendingin Peltier harus dirancang dengan resistansi

termal penyerap panas sekecil mungkin. Unit penyerap panas konvensional yang digunakan di sisi panas TEC terdiri dari sirip dan kipas. Sirip meningkatkan area perpindahan panas, sedangkan kipas melakukan perpindahan panas secara konveksi. Penyerap panas konvensional hanya cocok digunakan di situasi di mana ruang tidak terbatas. Berbagai peneliti sedang merancang penyerap panas alternatif yang dapat diterapkan pada TEC, termasuk:

1. Material pengubah fase
2. Penukar panas termo-sifon
3. Saluran mikro [18].

10. PROSES KERJA PELTIER

Efek Peltier terjadi ketika arus listrik melewati dua bahan konduktor yang jenisnya berbeda. Tergantung arah aliran arus, titik pertemuan kedua bahan itu bisa menyerap atau melepaskan panas. Dalam teknologi termoelektrik, semikonduktor digunakan sebagai bahan utama untuk menghasilkan efek Peltier karena lebih mudah disesuaikan untuk menggerakkan panas secara efisien. Dengan bahan ini, perangkat Peltier atau modul termoelektrik bisa dibuat dalam bentuk paling sederhana, yaitu satu semikonduktor yang dilekatkan dengan cara disolder ke bahan konduktif listrik di kedua ujungnya, biasanya tembaga yang dilapisi. Dalam susunan ini, bahan kedua yang diperlukan untuk efek Peltier sebenarnya adalah jalur penghubung tembaga ke sumber arus. Perlu diperhatikan bahwa panas berpindah seiring dengan gerakan pembawa muatan di seluruh rangkaian, sebenarnya pembawa muatan inilah yang memindahkan panas tersebut [19].



Gambar 5 pengaturan peltier[15]

11. KOMPONEN PENTING PELTIER

A. SIFAT MATERIAL

Gd (gadolinium) digunakan sebagai bahan inti dalam proses pendinginan magnetik, memanfaatkannya sebagai MCM. Untuk mensimulasikan siklus pendinginan, diperlukan tiga sifat material, yaitu kapasitas panas, perubahan suhu adiabatik (setelah perubahan medan magnet), serta konduktivitas termal. Dua sifat pertama sangat dipengaruhi oleh suhu dan medan magnet, sementara sifat ketiga hampir tetap konstan dalam rentang suhu yang relevan (sekitar suhu ruangan) [20]. $\mu_0 H = 0$ dan $\mu_0 H = 2T$; pemilihan medan ini didasarkan pada kepraktisan[19] kapasitas panas volumetrik pada $\mu_0 H = 0$ dan $\mu_0 H = 2T$ ditampilkan (sumbu y kiri). Perubahan suhu adiabatik saat MCM dimagnetisasi dari medan nol ke medan hingga $\mu_0 H$ disebut $\Delta T_{mag}(\mu_0 H, T) (>0)$; sedangkan perubahan suhu adiabatik saat MCM didemagnetisasi dari medan hingga H ke medan nol disebut $\Delta T_{dem}(\mu_0 H, T)$ [21].

B. MODEL UNTUK MODUL PELTIER

(a) Dalam modul Peltier, aliran panas terjadi saat arus mengalir searah dengan panah hitam, sehingga elektron di bagian terdoping-n dan lubang di bagian terdoping-p bergerak dari kiri ke kanan. Kontribusi efek Peltier berasal dari istilah SIT, sedangkan fluks yang dihasilkan oleh rugi Ohm $I^2 R$ tersebar merata ke kedua sisi.

(b) Skema beda hingga diterapkan pada persamaan difusi, dengan titik simpul untuk suhu dan fluks panas bergantian dalam ruang. Garis putus-putus merah di tengah mewakili modul Peltier tipis yang memiliki konduktivitas termal berbeda dari material utama (Gd). Dalam simulasi, modul Peltier menciptakan diskontinuitas pada fluks panas, tanpa memperhitungkan distribusi suhu internalnya. Deskripsi fenomenologis yang baik tentang modul termoelektrik atau Peltier telah dikembangkan [22]. modul Peltier menempatkan semikonduktor terdoping elektron dan terdoping lubang (seperti bismut telurida, Bi_2Te_3 atau silikon) di antara dua reservoir panas. Ketika arus mengalir mengikuti panah hitam tebal, baik elektron maupun lubang sebagai pembawa muatan bergerak dari sisi kiri ke sisi kanan. Proses ini memindahkan panas dari lingkungan kiri ke kanan, independen dari suhu lingkungan. Efek Peltier dapat dilihat sebagai proses konvektif karena melibatkan gerakan teratur pembawa muatan yang dikontrol eksternal, yang berkontribusi pada fluks panas [23]. penuh untuk

konveksi oleh aliran air adalah: molekul air $\leftrightarrow$ pembawa muatan; pompa yang mendorong aliran air $\leftrightarrow$ tegangan atau arus yang diterapkan; rugi viskos dalam mempertahankan aliran air $\leftrightarrow$ rugi Ohm. modul Peltier tipis dengan ketebalan lebih kecil dari dimensi linier penampang melintangnya. Secara kuantitatif, menggunakan tiga parameter untuk mendefinisikan modul Peltier tipis dengan penampang A: (i) SA, dengan dimensi $V \cdot K^{-1} \cdot cm^{-2}$, adalah daya termoelektrik per luas; (ii) RA, dengan dimensi $Ohm \cdot cm^{-2}$, adalah resistansi per luas; (iii) KA, dengan dimensi $W \cdot K^{-1} \cdot cm^{-2}$, adalah konduktansi termal per luas. Pada (i), $S = n(S_{p-doped} - S_{n-doped}) = n(|S_{p-doped}| + |S_{n-doped}|)$, di mana S adalah koefisien Seebeck material dan n adalah jumlah pasangan semikonduktor p-doped/n-doped yang menghubungkan dua lingkungan dalam modul [24], terkait dengan satu pasang penghubung semikonduktor p-doped/n-doped. Perhatikan bahwa semua S, R, K sebanding dengan jumlah pasang penghubung dan dengan penampang lintangnya. Dengan menerapkan arus I ke modul Peltier tipis yang menghubungkan lingkungan kiri/kanan dengan suhu T_L/T_R , total fluks panas di kedua sisi adalah dengan penampang memberikan luas penampang. istilah S I T berasal dari efek Peltier yang mirip kontribusi konvektif; $K \Delta T$ berasal dari konduksi termal; $I^2 R$ adalah rugi Ohm yang terdisipasi merata ke kedua reservoir [25]. Kerja masukan dan COP yang sesuai adalah Konduksi termal dan resistansi listrik menghasilkan entropi dan menurunkan COP; COP Carnot tercapai ketika $K = 0$ dan $R = 0$. Persamaan (2) dapat digunakan untuk menghitung kinerja modul Peltier. Dua batasan penting disorot. Pertama, untuk suhu dingin tertentu T_{cold} , rentang suhu maksimum Rentang suhu maksimum sesuai dengan pembuangan panas nol dari lingkungan dingin. Dalam kondisi maksimum, tegangan yang diterapkan dan arus yang dihasilkan adalah Kedua, ketika kedua reservoir memiliki suhu T yang sama, maka kalor maksimum yang diberikan sebagai suhu rata-rata. Persamaan (4), (5), dan (6) memungkinkan kita memperkirakan K, R, S dari lembar spesifikasi produk nyata. Hasil untuk dua modul Peltier terpilih, yang kira-kira sesuai dengan dua ujung resistivitas listrik, diberikan Untuk puluhan produk, modul Peltier dengan resistansi listrik yang lebih besar memiliki koefisien Seebeck yang lebih besar. Detail prosedur pengaturan dan dua pemeriksaan konsistensi diri akan diberikan dalam Lampiran [26]. Dengan K/A, seseorang juga dapat memperkirakan Parameter untuk dua modul Peltier yang dipilih. Informasi produk disediakan dalam

Lampiran. Performa dalam kondisi operasi $T_{cold} = 280$ K, $T_{hot} = 290$ K COP_{max} yang sesuai dievaluasi dari Persamaan (7) diberikan di kolom terakhir. Persamaan (7): $COP_{max} = (T_{cold} / \Delta T) * (\sqrt{(1 + Z T_M)} - 1) / (\sqrt{(1 + Z T_M)} + 1)$, atau sesuatu yang serupa. Konduktivitas termal material yang digunakan dalam modul Peltier. Material Peltier yang digunakan dalam produk ini adalah Bi_2Te_3 dengan konduktivitas termal sekitar 0,01-0,03 W/(cm·K), yang cukup sesuai dengan estimasi konduktansi (K) [27]. hasil kondisi tunak Dalam perhitungan berikut, secara instan setelah perubahan suhu batas selama siklus pendinginan. Oleh karena itu, memperkirakan skala waktu untuk mencapai distribusi kondisi tunak dalam modul Peltier. Ini dapat diperkirakan dari persamaan distribusi panas $\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial x^2$, di mana $\alpha = \kappa / (\rho c_p)$ adalah difusivitas termal. Dengan L sebagai ukuran masalah 1D, solusi yang sesuai dengan nilai batas lenyap dan mode redaman paling lambat adalah $T(x,t) = e^{-\{t/\tau\}} \sin(\pi x / L)$ dengan konstanta waktu $\tau = (L^2 / (\pi^2 \alpha))$; diidentifikasi sebagai waktu relaksasi untuk mencapai distribusi kondisi tunak. Untuk Bi_2Te_3 , $\kappa \approx 2,11$ W/m·K, $\rho \approx 7600$ kg/m³ dan $c_p \approx 165$ J/kg·K [27], $\alpha \approx 1,68 \times 10^{-5}$ m²/s. Untuk L = 3 mm/4 mm, konstanta waktu sekitar 0,54/0,96 detik. Untuk menggunakan hasil kondisi tunak waktu paruh harus lebih lama daripada waktu relaksasi. memilih periode minimum sebesar 1 detik. Dari sini, penggunaan modul Peltier berbasis silikon dapat menguntungkan karena waktu relaksasinya yang singkat [28].

12. PENDINGINAN PELTIER

Dalam bagian ini, menganalisis kinerja sistem pendinginan yang sepenuhnya mengandalkan modul Peltier. Suhu lingkungan ditetapkan pada $T_{hot} = 290$ K dan $T_{cold} = 280$ K, yang akan diterapkan dalam konfigurasi yang mencakup MCM. Kapasitas pendinginan serta COP untuk kedua modul yang tercatat [30]. Terlihat bahwa modul kedua memiliki efisiensi keseluruhan yang lebih baik. modul pertama dalam sistem pendingin magnetik untuk menunjukkan bahwa modul Peltier secara umum cukup untuk menangani tugas-tugas yang diperlukan dalam sistem pendingin magnetik.

A. SUHU ANTARA KONSTAN

Untuk analogi yang lebih dekat dengan pendinginan bertahap ganda mempertimbangkan sistem pendinginan yang menggunakan beberapa modul Peltier yang ditempatkan di antara T_{hot} dan T_{cold} , dengan n suhu antara di antaranya. Sistem ini

membutuhkan $n+1$ modul Peltier, yang diberi nomor dari 0 hingga n seperti, Aliran panas melalui modul Peltier ke- i menunjukkan diskontinuitas yang dipengaruhi oleh arus, yang dinyatakan sebagai $J \pm I$ (notasi mirip dengan Persamaan). Untuk menjaga suhu antara tetap stabil, diperlukan kondisi $J+i = J-i-1$, dan COP total dihitung sebagai $J-0 / (J+n - J-0)$. bahwa COP maksimum tercapai ketika suhu antara hampir terbagi rata antara T_{hot} dan T_{cold} . COP sebagai fungsi arus input dari titik ke-0. Terlihat bahwa COP maksimum hampir tidak dipengaruhi oleh jumlah suhu antara, meskipun arus dan daya pendinginan menurun seiring bertambahnya n . Secara keseluruhan, COP maksimum sangat sedikit bergantung pada jumlah suhu antara, walaupun meningkat sekitar 0,1% dengan bertambahnya n [3].

B. SUHU ANTARA BERGANTIAN

Ketika dikombinasikan dengan pendinginan magnetik, suhu perantara antarmodul Peltier tidak tetap konstan seiring waktu. Untuk mensimulasikan skenario ini, suhu perantara yang bergantian antara dua nilai: pada fase pertama, suhu perantara adalah $T(1)I$; pada fase kedua, $T(2)I$. Untuk satu suhu perantara, performa modul Peltier dievaluasi pada kondisi operasi $T_{cold} = 280$ K dan $T_{hot} = 290$ K. COP untuk dua modul yang berdekatan: COP maksimum untuk (a) adalah 3,30, sedangkan untuk (b) adalah 3,48. Perangkat (2) memberikan daya pendinginan yang lebih tinggi. mengilustrasikan konfigurasi dengan n suhu perantara yang didistribusikan secara merata. Persegi panjang merah mewakili modul Peltier, diberi label dari 0 hingga n ; melalui modul Peltier ke- i , aliran panas menunjukkan diskontinuitas yang dinotasikan sebagai $J \pm I$ (untuk $i = 0$ hingga n). menunjukkan COP keseluruhan untuk konfigurasi (c) dengan modul Peltier yang dikarakterisasi oleh COP maksimum secara kasar tetap stabil; daya pendinginan yang terkait berkurang. hasil untuk satu suhu perantara dan tiga suhu perantara. Pada (e) dan (f), suhu perantara yang didistribusikan merata memberikan COP tertinggi. Arus yang diterapkan pada dua modul Peltier adalah $I(1)0$, $I(1)1$ pada fase pertama; $I(2)0$, $I(2)1$ pada fase kedua. Pada fase pertama, aliran yang melewati setiap modul Peltier diberikan oleh [persamaan yang tidak disebutkan secara eksplisit. Pada fase kedua, $J \pm (2)0$, $J \pm (2)1$ diperoleh dengan mengganti $T(1)1$ dengan $T(2)1$, serta $I(1)0,1$ dengan $I(2)0,1$ [29]. Dengan menerapkan aliran netto nol pada setiap wilayah perantara, yaitu hal ini memastikan tidak ada akumulasi panas di daerah perantara selama siklus penuh, sehingga proses dapat diulang tanpa batas.

Persamaan memberikan satu batasan pada arus yang diterapkan: dengan asumsi ($I(1)0$, $I(1)1$, $I(2)0$, $I(2)1$ tetap. COP keseluruhan setelah dua fase diberikan oleh [persamaan yang tidak disebut]. pemindaian parameter secara menyeluruh. Selama pemindaian, menemukan bahwa COP lebih tinggi ketika kondisi $|T(1)1 - T_{cold}| \approx T(2)1 - T_{hot}$ terpenuhi.

Data untuk pasangan suhu ($T(1)1$, $T(2)1$) = (283, 287) dan ($T(1)1$, $T(2)1$) = (281, 289) COP maksimum untuk yang pertama mencapai 3,32, sedangkan untuk yang kedua adalah 3,35 [30]. COP maksimum dalam pengaturan 2-tahap sedikit lebih tinggi dibandingkan, tetapi masih sangat mendekati COP maksimum dari modul Peltier tunggal (sekitar 3,3). di mana ruang pencarian mencakup empat suhu (2 tahap dan 2 wilayah) serta enam arus Peltier (2 tahap dan 3 modul Peltier), dengan dua pembatasan dari Persamaan. Melalui beberapa pencarian acak, COP terbaik yang diperoleh masih sekitar 3,3. Penting untuk dicatat bahwa analisis ini tidak mempertimbangkan kerugian panas tambahan di luar modul Peltier (seperti konduksi termal atau perilaku sementara di wilayah perantara), sehingga COP sebenarnya mungkin lebih rendah dari perkiraan. Sebagai ringkasan akhir, penerapan suhu perantara konstan secara bertahap tidak secara bermakna meningkatkan COP (hanya sekitar 1-2% dalam kondisi ideal). Walaupun suhu perantara memungkinkan modul Peltier berfungsi dengan perbedaan suhu yang lebih kecil, yang mengurangi kerugian Ohm, laju pembuangan panas yang terkait juga berkurang; akibatnya, pengaruh keseluruhan terhadap COP ternyata sangat kecil [24].

13. KESIMPULAN

Teknologi Peltier merupakan inovasi canggih untuk mengatur panas dan pendinginan pada perangkat kecil, seperti mesin motor atau generator portabel, dengan penekanan pada prinsip termoelektrik, rancangan sistem, serta evaluasi kinerja. Walaupun dihadapkan pada kendala seperti rendahnya efisiensi energi dan kesulitan pemasangan dalam ruang terbatas, teknologi ini memberikan manfaat berupa absennya bagian yang bergerak, serta peluang perbaikan melalui material inovatif dan struktur bertingkat. Evaluasi performa mengungkapkan bahwa modul Peltier mampu mencapai koefisien performa tertinggi pada pengaturan sederhana atau berlapis, dengan suhu transisi yang mendukung fungsi optimal meski kemajuan besar masih terbatas. teknologi ini cocok untuk sektor industri yang mengutamakan kelestarian

lingkungan, sambil membuka peluang bagi pengembangan lebih lanjut dalam penerapan nyata.

KEPUSTAKAAN

- [1] S. B. Riffat and X. Ma, "Thermoelectrics: A review of present and potential applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 913–935, 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7.
- [2] B. Suhani and S. Bhatia, "A review on thermoelectric cooling technology and its applications," *Int. Conf. Adv. Mech. Eng.*, vol. 912, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/912/4/042004.
- [3] T. N. Widiyanto and A. R. Hakim, "Performansi Pendingin Termoelektrik Alat Transportasi Ikan Segar pada Berbagai Tegangan (Thermoelectric Performance of Refrigerated Fish Container at Various Voltages)," *Agritech*, vol. 36, no. 4, p. 485, 2017, doi: 10.22146/agritech.16777.
- [4] EL-Shabrawy, "New Apparatus To Raise the Performance of Engine Cooling Water Cycle," *Misr J. Agric. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 1671–1684, 2015, doi: 10.21608/mjae.2015.97841.
- [5] C. Lin, "Analytical parametrization for magnetization of Gadolinium based on scaling hypothesis," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 617, 2023, doi: 10.1016/j.physa.2023.128686.
- [6] T. Arisaka, M. Otsuka, and Y. Hasegawa, "Measurement of thermal conductivity and specific heat by impedance spectroscopy of Bi₂Te₃ thermoelectric element," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 4, 2019, doi: 10.1063/1.5079832.
- [7] V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner, "Giant magnetocaloric effect in Gd₅(Si₂Ge₂)," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, no. 23, pp. 4494–4497, 1997, doi: 10.1103/PhysRevLett.78.4494.
- [8] G. Bianchi, G. Besagni, S. A. Tassou, and C. N. Markides, "Overview and outlook of research and innovation in energy systems with carbon dioxide as the working fluid," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 195, no. June, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117180.
- [9] D. J. Silva, B. D. Bordalo, A. M. Pereira, J. Ventura, and J. P. Araújo, "Solid state magnetic refrigerator," *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 570–574, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.002.
- [10] S. Efromovich, "Springer Series in Statistics Springer Series in Statistics," pp. 1–656, 1999, doi: 10.1007/978-0-387-98135-2.
- [11] S. Mihalache, I. Flamaropol, F. S. Dumitru, L. Dobrescu, and D. Dobrescu, "Automated cooling control system through Peltier effect and high efficiency control using a DC-DC Buck converter," *Proc. Int. Semicond. Conf. CAS*, vol. 2015-Decem, pp. 281–284, 2015, doi: 10.1109/SMICND.2015.7355233.
- [12] G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex thermoelectric materials," *Nat. Mater.*, vol. 7, no. 2, pp. 105–114, 2008, doi: 10.1038/nmat2090.
- [13] S. Triyono, H. Muchtar, and W. Sudarwati, "Perancangan Pendingin Minuman Portable Menggunakan Efek Peltier Berbasis Raspberry-Pi," *Telekomun. Tenaga List.*, vol. 7, no. 1, pp. 2–5, 2024.
- [14] J. B. Pendry and A. MacKinnon, "Calculation of photon dispersion relations," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 69, no. 19, pp. 2772–2775, 1992, doi: 10.1103/PhysRevLett.69.2772.
- [15] S. Y. Dan'kov, A. Tishin, V. Pecharsky, and K. Gschneidner, "Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 57, no. 6, pp. 3478–3490, 1998, doi: 10.1103/PhysRevB.57.3478.
- [16] M. Nurul Achmadiyah, Yulianto, and A. ikhlasul Amal, "Perancangan smart food box menggunakan modul termoelektrik peltier berbasis internet of things (IOT)," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 10, no. 3, pp. 292–299, 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i3.4398.
- [17] K. Klinar, U. Tomc, B. Jelenc, S. Nosan, and A. Kitanovski, "New frontiers in magnetic refrigeration with high oscillation energy-efficient electromagnets," *Appl. Energy*, vol. 236, no. December, pp. 1062–1077, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.055.
- [18] M. Ben Zohra, A. Riad, and A. Alhamany, "Optimizing the conception of hybrid PV/PCM by optimizing the heat transfer at the contact interface and by integrating two types of PCM," *Results Eng.*, vol. 16, no. June, p. 100614, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100614.
- [19] B. Worsztynowicz, "Experimental verification of design calculations of the internal combustion engine cooling system," *Combust. Engines*, vol. 179, no. 4, pp. 132–135, 2019, doi: 10.19206/ce-2019-421.
- [20] K. Engelbrecht and C. R. H. Bahl, "Evaluating the effect of magnetocaloric properties on magnetic refrigeration performance," *J. Appl. Phys.*, vol. 108, no. 12, 2010, doi: 10.1063/1.3525647.

- [21] R. Weerasinghe and T. Hughes, "Numerical and experimental investigation of thermoelectric cooling in down-hole measuring tools; A case study," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 10, pp. 44–53, 2017, doi: 10.1016/j.csite.2017.02.002.
- [22] A. Abdalla Elian, W. Aissa, O. Dahab, and M. F. Cidek, "Enhancement of Water Cooled Internal Combustion Engines Using Peltier Effect," *Int. J. Appl. Energy Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 65–70, 2020, doi: 10.21608/ijaes.2020.169449.
- [23] W. Lyskawinski and W. Szelag, "Analysis of cooling and heating system with Peltier cell," *ITM Web Conf.*, vol. 19, p. 01032, 2018, doi: 10.1051/itmconf/20181901032.
- [24] S. Lionte, M. Risser, C. Vasile, L. Elouad, and C. Muller, "Adapting an active magnetic regenerator to a continuous fluid flow application," *Int. J. Refrig.*, vol. 85, pp. 303–313, 2018, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.009.
- [25] I. Terasaki, "Introduction to thermoelectricity," *Mater. energy Convers. devices*, pp. 339–357, 2011, doi: 10.1533/9781845690815.3.339.
- [26] C. Lin, "Magnetic cooling with thin Peltier modules as thermal switches," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 570, 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.170482.
- [27] H. S. Kim, K. Kikuchi, T. Itoh, T. Iida, and M. Taya, "Design of segmented thermoelectric generator based on cost-effective and light-weight thermoelectric alloys," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 185, no. 1, pp. 45–52, 2014, doi: 10.1016/j.mseb.2014.02.005.
- [28] H. J. Goldsmid, "Bismuth telluride and its alloys as materials for thermoelectric generation," *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 4, pp. 2577–2592, 2014, doi: 10.3390/ma7042577.
- [29] A. Kitanovski, "Energy Applications of Magnetocaloric Materials," *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 10, 2020, doi: 10.1002/aenm.201903741.
- [30] B. Monfared and B. Palm, "Optimization of layered regenerator of a magnetic refrigeration device," *Int. J. Refrig.*, vol. 57, no. November, pp. 103–111, 2015, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.04.019.