

Tinjauan Pustaka: Perancangan Sistem Pendingin Termoelektrik Bertenaga Surya dan Ramah Lingkungan

Enrico Chiesa Virgianto & Oktarina Heriyani

Program studi Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Informatika

Universitas Muhammadiyah Prof. Dr Hamka

E-mail: enricochiesa37@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan akan teknologi pendinginan yang lebih ramah lingkungan mendorong pengembangan sistem termoelektrik berbasis efek Peltier sebagai opsi selain pendingin kompresi uap yang menggunakan refrigeran berbahaya. Penelitian ini merancang sebuah sistem pendingin portabel yang memanfaatkan modul termoelektrik dengan suplai daya dari panel surya untuk menghasilkan perangkat yang efisien dan berkelanjutan. Sistem dirakit dengan mengombinasikan panel surya, baterai, modul TEC, heatsink, coldsink, serta kipas sebagai bagian dari mekanisme pelepasan panas. Evaluasi performa dilakukan melalui tiga rangkaian uji dengan menghitung Coefficient of Performance (COP) dan analisis perpindahan panas konveksi menggunakan nilai Reynolds, faktor gesek, angka Nusselt, serta laju perpindahan panas. Hasil menunjukkan bahwa intensitas cahaya matahari sangat memengaruhi daya listrik yang tersedia sehingga berdampak pada kinerja modul termoelektrik. Nilai COP yang diperoleh bervariasi pada setiap uji, dengan nilai rata-rata tertinggi sebesar 0,167944 pada percobaan ketiga. Walaupun efisiensinya masih di bawah sistem kompresi uap, prototipe ini membuktikan bahwa pendingin termoelektrik berbasis energi surya berpotensi menjadi solusi pendinginan portabel yang hemat energi, bebas refrigeran, dan lebih ramah lingkungan.

Kata kunci: Termoelektrik, Sistem Pendingin, Panel Surya dan Ramah Lingkungan

Abstract

The growing demand for environmentally friendly cooling technologies has encouraged the use of thermoelectric systems based on the Peltier effect as an alternative to conventional vapor-compression systems that rely on harmful refrigerants. This research focuses on designing a portable cooling device powered by solar-generated electricity to create an efficient and sustainable refrigeration solution. The system integrates solar panels, a battery, a TEC module, a heatsink, a coldsink, and cooling fans to ensure effective heat dissipation. Performance evaluation was conducted through three experimental tests by calculating the Coefficient of Performance (COP) and analyzing convective heat transfer using Reynolds number, friction factor, Nusselt number, and heat flux. The results show that solar intensity plays a key role in determining the electrical power supplied to the thermoelectric module, thus influencing its cooling performance. COP values varied across the trials, with the highest average value of 0.167944 recorded in the third test. Although its efficiency remains lower than that of vapor-compression systems, the prototype demonstrates that a solar-powered thermoelectric cooler can serve as an energy-efficient, refrigerant-free, and environmentally friendly portable cooling solution.

Keyword: Thermoelectric, Cooling System, Solar Panel and Environmentally Friendly

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pendinginan mengalami peningkatan pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia terhadap kenyamanan termal serta kebutuhan penyimpanan bahan pangan, obat-obatan, dan produk industri lainnya. Sistem pendingin konvensional umumnya menggunakan teknologi kompresi uap yang memanfaatkan refrigeran seperti CFC, HCFC, atau HFC. Meskipun efektif dalam menurunkan suhu, penggunaan refrigeran tersebut menimbulkan dampak negatif

terhadap lingkungan karena bersifat merusak lapisan ozon dan berkontribusi terhadap pemanasan global (global warming potential yang tinggi). Selain itu, sistem pendingin berbasis kompresor juga memiliki konsumsi energi listrik yang besar sehingga meningkatkan emisi karbon dari pembangkit listrik konvensional [1].

Seiring meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan dan krisis energi global, muncul kebutuhan untuk mengembangkan teknologi pendingin yang ramah lingkungan, hemat energi,

serta dapat memanfaatkan sumber energi terbarukan. Salah satu teknologi alternatif yang mulai banyak dikembangkan adalah sistem pendingin termoelektrik (Thermoelectric Cooling System). Sistem ini bekerja berdasarkan efek Peltier, yaitu fenomena perpindahan panas ketika arus listrik dialirkan melalui sambungan dua material semikonduktor yang berbeda. Modul termoelektrik atau Peltier memiliki keunggulan karena tidak memerlukan refrigeran, tidak memiliki bagian mekanis yang bergerak, ukuran yang kompak, serta mudah dikontrol dan dirawat [2].

Meskipun demikian, efisiensi pendingin termoelektrik masih relatif rendah dibandingkan sistem kompresi uap. Nilai Coefficient of Performance (COP) dari sistem termoelektrik berkisar antara 0,3–0,7, sedangkan sistem kompresi dapat mencapai COP lebih dari 3. Oleh karena itu, upaya peningkatan efisiensi termoelektrik menjadi fokus berbagai penelitian, salah satunya dengan mengoptimalkan sistem pembuangan panas (heat sink), penggunaan kipas pendingin tambahan, serta integrasi dengan sumber energi terbarukan untuk menekan konsumsi energi listrik dari jaringan [3].

Salah satu solusi yang menjanjikan adalah menggabungkan sistem pendingin termoelektrik dengan energi surya (photovoltaic/solar panel). Energi surya merupakan sumber energi terbarukan yang melimpah, terutama di negara tropis seperti Indonesia, dengan intensitas radiasi rata-rata sekitar 4,8–5,5 kWh/m² per hari. Pemanfaatan energi surya sebagai sumber daya utama dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan menjadikan sistem pendingin lebih ramah lingkungan serta berkelanjutan [4].

Sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya umumnya terdiri dari panel surya sebagai sumber energi, charge controller untuk mengatur arus listrik, baterai sebagai penyimpan energi (opsional), serta modul termoelektrik sebagai komponen utama pendingin. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi sistem ini mampu menghasilkan penurunan suhu yang signifikan pada volume ruang kecil seperti portable cooler, inkubator, maupun sistem penyimpanan vaksin. Misalnya, penelitian oleh Seyednezhad menunjukkan bahwa sistem termoelektrik bertenaga surya mampu menurunkan suhu ruang pendingin hingga 15°C di bawah suhu lingkungan, dengan efisiensi energi yang lebih baik ketika dikombinasikan dengan sistem kontrol daya berbasis Maximum Power Point Tracking (MPPT)[5][6].

Selain keunggulan dari sisi lingkungan, sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya juga memiliki potensi besar untuk diterapkan di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik. Di

Indonesia, banyak wilayah pedesaan dan pesisir yang memiliki potensi energi surya tinggi namun belum memiliki akses listrik yang stabil. Dengan demikian, pengembangan sistem pendingin berbasis termoelektrik bertenaga surya dapat mendukung kemandirian energi masyarakat sekaligus menjaga kualitas penyimpanan pangan dan produk penting lainnya.

Namun, meskipun potensinya besar, penelitian mengenai desain sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya yang efisien dan terintegrasi masih terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada aspek parsial seperti performa modul Peltier atau efisiensi panel surya secara terpisah, tanpa mempertimbangkan keseluruhan sistem (PV, kontrol, baterai, heat sink, dan ruang pendingin) secara terpadu. Oleh karena itu, perlu dilakukan perancangan sistem yang mampu memaksimalkan kinerja termoelektrik dengan manajemen energi yang optimal, penggunaan bahan yang ramah lingkungan, serta efisiensi termal yang lebih baik[5].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai Perancangan Sistem Pendingin Termoelektrik Bertenaga Surya dan Ramah Lingkungan memiliki urgensi yang tinggi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pendingin alternatif yang hemat energi, berkelanjutan, serta mendukung transisi menuju penggunaan energi bersih di masa depan. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem pendingin portabel, alat penyimpanan bahan pangan di daerah terpencil, maupun solusi pendinginan skala kecil yang efisien tanpa merusak lingkungan.

2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Pendingin Termoelektrik

Sistem pendingin merupakan rangkaian proses yang berfungsi menurunkan dan mempertahankan suhu suatu ruang atau objek pada tingkat yang diinginkan. Secara umum, sistem pendingin konvensional bekerja dengan prinsip siklus kompresi uap (vapor compression cycle) menggunakan refrigeran. Proses ini melibatkan empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator[3].

Meskipun teknologi ini memiliki efisiensi tinggi, penggunaan refrigeran seperti CFC (*Chlorofluorocarbon*), HCFC (*Hydrochlorofluorocarbon*), dan HFC (*Hydrofluorocarbon*) menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan[1]. refrigeran konvensional berkontribusi terhadap pemanasan global (*global*

warming potential) hingga 1.430 kali lebih besar dibandingkan CO₂. Selain itu, sistem kompresi uap memerlukan daya listrik besar dan menghasilkan kebisingan serta biaya perawatan tinggi[1].

Dengan meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan dan energi, banyak penelitian diarahkan untuk mengembangkan sistem pendingin yang ramah lingkungan, hemat energi, dan bebas refrigeran. Salah satu teknologi alternatif yang potensial adalah pendingin termoelektrik (*thermoelectric cooling*) yang menggunakan efek Peltier.

2.2 Prinsip Dasar Efek Termoelektrik

Efek termoelektrik merupakan fenomena konversi langsung antara energi listrik dan energi panas yang ditemukan oleh Thomas Seebeck dan Jean Peltier[7]. Ada tiga efek utama yang menjadi dasar teknologi termoelektrik, yaitu:

1. Efek Seebeck — Ketika dua material semikonduktor berbeda dihubungkan dan terdapat perbedaan suhu di antara kedua sambungannya, maka timbul tegangan listrik.
2. Efek Peltier — Ketika arus listrik dialirkan melalui sambungan dua bahan semikonduktor berbeda, maka terjadi penyerapan panas di satu sisi dan pelepasan panas di sisi lainnya.
3. Efek Thomson — Menjelaskan perpindahan panas sepanjang konduktor ketika arus listrik dan gradien suhu hadir bersamaan.

Pada sistem pendingin termoelektrik, efek Peltier dimanfaatkan. Modul termoelektrik (TEC – *Thermoelectric Cooler*) biasanya terbuat dari pasangan material semikonduktor tipe-n dan tipe-p (misalnya Bismuth Telluride – Bi₂Te₃). Ketika arus mengalir, sisi dingin modul menyerap panas dari ruang pendingin, dan sisi panas melepaskan panas ke lingkungan [2].

Keunggulan utama sistem termoelektrik dibandingkan sistem kompresi uap antara lain:

1. Tidak menggunakan refrigeran kimia;
2. Tidak memiliki bagian mekanik bergerak (minim getaran dan kebisingan);
3. Desain kompak dan mudah diintegrasikan;
4. Mampu dioperasikan dengan sumber energi DC seperti panel surya.

Namun, kelemahan utama sistem ini adalah efisiensi energi yang masih rendah, dengan nilai *Coefficient of Performance* (COP) berkisar antara 0,3–0,7 [5]. Oleh karena itu, desain heat sink dan manajemen daya sangat menentukan performa keseluruhan sistem.

2.3 Energi Surya dan Panel Fotovoltaik

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling melimpah di dunia. Di Indonesia, intensitas radiasi matahari rata-rata mencapai 4,8–5,5 kWh/m² per hari, menjadikannya sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai sumber daya listrik[8].

Panel fotovoltaik (PV) bekerja berdasarkan efek fotovoltaik, yaitu kemampuan bahan semikonduktor (seperti silikon) untuk menghasilkan arus listrik ketika terkena cahaya matahari. Komponen utama sistem PV terdiri dari[1]:

1. Panel surya, yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik DC.
2. Solar charge controller, untuk mengatur pengisian daya dan mencegah overcharging pada baterai[9].
3. Baterai, sebagai penyimpan energi listrik (opsional).
4. Beban DC atau inverter, untuk mengubah daya sesuai kebutuhan sistem.

Integrasi PV dengan sistem termoelektrik menghasilkan solusi pendinginan off-grid yang sangat relevan untuk daerah terpencil tanpa akses listrik PLN. penggunaan panel surya berkapasitas 100 Wp dengan modul termoelektrik TEG-12706 mampu mencapai penurunan suhu sebesar 17°C di bawah suhu lingkungan pada ruang 10 liter, dengan konsumsi daya rata-rata 45 W[4].

2.4 Sistem Pendingin Termoelektrik Bertenaga Surya

Kombinasi sistem PV–TEC merupakan inovasi yang menggabungkan keunggulan energi bersih dan teknologi pendingin bebas refrigeran. Prinsip kerjanya adalah memanfaatkan daya listrik DC dari panel surya untuk mengaktifkan modul termoelektrik. Sisi panas modul dihubungkan dengan heat sink dan kipas untuk mempercepat pelepasan panas, sedangkan sisi dingin digunakan untuk mendinginkan ruang tertentu[10].

Penelitian oleh Cheepati menunjukkan bahwa sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya dapat menurunkan suhu inkubator unggas hingga 12°C di bawah suhu lingkungan dengan konsumsi energi yang lebih efisien dibandingkan sistem kompresi uap mini[3]. Sementara itu, Kaiprath dalam tinjauan pustakanya menekankan pentingnya pengaturan daya melalui algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk menjaga efisiensi sistem PV–TEC tetap stabil meskipun intensitas cahaya berubah[1].

Sistem semacam ini juga telah diuji dalam skala rumah tangga. Penelitian oleh Seyednezhad pada sistem PV–TEC hybrid menunjukkan peningkatan efisiensi hingga 25% ketika digunakan bersama heat

exchanger berbasis aluminium dan ventilasi paksa. Dengan demikian, rancangan desain termal dan kontrol daya merupakan faktor kunci keberhasilan sistem pendingin termoelektrik berbasis energi surya[5].

2.5 Aspek Lingkungan dan Keberlanjutan

Pendekatan teknologi termoelektrik bertenaga surya sejalan dengan konsep green technology dan sustainable development goals (SDGs), khususnya tujuan ke-7 (Affordable and Clean Energy) dan ke-13 (Climate Action). Sistem ini tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca secara langsung dan tidak menggunakan bahan kimia berbahaya[11].

Menurut laporan Intergovernmental Panel on Climate Change, sektor pendinginan berkontribusi terhadap sekitar 10% total emisi global CO₂, sebagian besar disebabkan oleh konsumsi energi listrik dan kebocoran refrigeran. Oleh karena itu, penerapan sistem pendingin berbasis energi surya dan termoelektrik berpotensi menurunkan emisi karbon sekaligus mendukung kemandirian energi daerah[12].

Dengan kata lain, rancangan sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya bukan hanya inovasi teknologi, tetapi juga langkah strategis menuju efisiensi energi, kemandirian energi lokal, dan perlindungan lingkungan.

3 METODE PERANCANGAN

3.1 Sistem Perancangan

Perancangan sistem pendingin termoelektrik yang menggunakan tenaga surya mencakup berbagai tahapan serta komponen penting yang harus diperhatikan secara teliti agar sistem dapat beroperasi secara efektif dan efisien. Tahapan perancangan ini biasanya melibatkan langkah-langkah serta elemen utama sebagai berikut:

3.2 Panel surya (PV)

berperan sebagai sumber energi utama yang berfungsi menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik arus searah (DC)[13].

3.3 Sistem penyimpanan energi atau pengatur daya (misalnya baterai dan controller) digunakan agar listrik yang dihasilkan panel surya dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban dan kondisi cuaca yang berubah-ubah.

3.4 Modul termoelektrik (TEC)

bekerja berdasarkan prinsip efek Peltier, di mana saat dialiri arus listrik DC, salah satu sisi modul menjadi dingin untuk keperluan pendinginan, sementara sisi lainnya menjadi panas dan melepaskan panas ke lingkungan sekitar.

3.5 Sistem pembuangan panas

biasanya menggunakan heatsink, kipas, atau aliran cairan pada sisi panas modul termoelektrik, berfungsi menjaga diferensial suhu tetap optimal sehingga modul dapat bekerja dengan kinerja maksimal.

3.6 Isolasi termal dan ruang atau kontainer

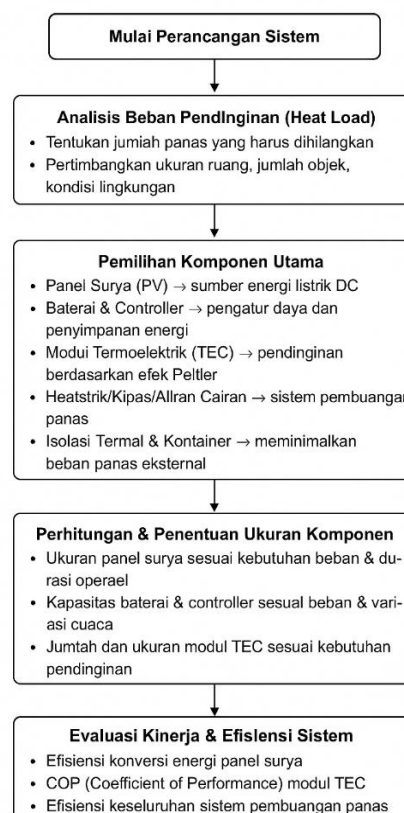
yang didinginkan dirancang sedemikian rupa agar beban panas dari lingkungan ke ruang pendingin dapat diminimalkan dan suhu target lebih mudah dicapai.

3.7 Perancangan beban pendinginan (heat load) diperlukan untuk menentukan jumlah panas yang harus dihilangkan dari ruang atau objek yang ingin didinginkan, dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan sekitar, ukuran ruang, jumlah objek, serta faktor-faktor lain yang relevan.

3.8 Pemilihan dan penentuan ukuran panel surya, modul TEC, baterai, dan controller dilakukan berdasarkan analisis kebutuhan beban pendinginan, durasi operasi sistem, serta kondisi intensitas cahaya matahari di lokasi penggunaan.

3.9 Pertimbangan efisiensi sistem meliputi evaluasi efisiensi konversi energi panel surya, efisiensi modul termoelektrik (koefisien performa atau COP), serta efisiensi keseluruhan sistem pembuangan panas untuk memastikan kinerja pendinginan optimal.

3.10 Flowchart Diagram Perancangan



Gambar 1. Diagram perancangan [1],[5]

Dapat dilihat dari flowchart diagram perancangan diatas menjelaskan alur sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya yang dirancang secara sistematis. Sistem diawali dengan pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi listrik DC. Energi yang dihasilkan kemudian dikondisikan menggunakan charge controller dan disimpan dalam baterai untuk menjaga kestabilan suplai daya terhadap beban.

Selanjutnya, energi listrik digunakan untuk mengaktifkan modul termoelektrik (TEC) yang bekerja berdasarkan efek Peltier. Proses ini menghasilkan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul. Sisi dingin dimanfaatkan untuk mendinginkan ruang pendingin, sedangkan sisi panas dibuang ke lingkungan melalui heatsink dan kipas pendingin. Evaluasi performa sistem dilakukan dengan mengamati perubahan suhu serta parameter kelistrikan untuk menentukan efektivitas pendinginan. Flowchart ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai integrasi sumber energi surya, sistem kontrol, dan sistem pendinginan termoelektrik yang dirancang.

4 PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, proses perpindahan panas (heat transfer) yang berlangsung pada sistem pendingin merupakan jenis perpindahan panas secara konveksi (convection heat transfer). Perpindahan panas konveksi merupakan salah satu mekanisme perpindahan panas yang terjadi melalui pergerakan fluida, baik berupa udara, air, maupun gas, yang berfungsi membawa energi panas dari satu tempat ke tempat lainnya[14].

4.1 Prinsip Kerja Termoelektrik

Teknologi termoelektrik bekerja berdasarkan efek Peltier dan efek Seebeck yang memanfaatkan material semikonduktor untuk konversi energi[7]. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, termoelektrik cooler (TEC) dapat mengubah energi listrik menjadi perbedaan temperatur melalui efek Peltier, dimana ketika arus listrik DC dialirkan melalui modul termoelektrik, terjadi perpindahan kalor dari satu sisi ke sisi lainnya[10].

Prinsip kerja TEC melibatkan material semikonduktor tipe-n dan tipe-p yang tersusun secara seri secara elektrik dan paralel secara termal[4]. Ketika arus listrik mengalir, elektron pada semikonduktor tipe-n berpindah dari tingkat energi rendah ke tingkat energi tinggi sambil menyerap kalor pada sisi dingin (cold junction), kemudian melepaskan kalor pada sisi panas (hot junction)[3]. Fenomena ini menciptakan perbedaan temperatur antara kedua sisi modul yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi pendinginan.

4.2 Integrasi Panel Surya dengan Sistem Termoelektrik

Panel surya fotovoltaik merupakan sumber energi yang ideal untuk mengoperasikan sistem pendingin termoelektrik karena keduanya beroperasi dengan arus DC[8]. Berdasarkan lokasi geografis Indonesia yang berada di daerah tropis dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 4,8 kWh/m²/hari, potensi pemanfaatan energi surya sangat besar untuk aplikasi pendinginan [8]. Penelitian menunjukkan bahwa efisiensi panel surya berkisar antara 6% pada tahun 1950-an hingga mencapai 20% pada teknologi terkini menggunakan material thin-film [8]. Efisiensi panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor utama yaitu intensitas cahaya matahari dan temperatur operasi panel. Studi eksperimental menunjukkan bahwa efisiensi panel surya polycrystalline 100 Wp mencapai 13,35% dengan tegangan output rata-rata 14,33-17,29 V dan arus 1,26-2,41 A pada kondisi standar (STC: 25°C, 1000 W/m²)[13].

Untuk mengoptimalkan konversi energi surya, implementasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) sangat penting. Algoritma Perturb and Observe (P&O) terbukti efektif dengan efisiensi mencapai 85,53% dalam melacak titik daya maksimum panel surya [6]. MPPT bekerja dengan mengatur tegangan dan arus output panel surya melalui boost converter untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan pada berbagai kondisi operasi [6].

4.3 Performa Sistem Pendingin Termoelektrik

Coefficient of Performance (COP) merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi efisiensi sistem pendingin termoelektrik. Penelitian menunjukkan bahwa COP sistem termoelektrik sangat dipengaruhi oleh gradien temperatur (ΔT) antara sisi panas dan dingin modul[1]. Pada $\Delta T = 9,6^\circ\text{C}$ dengan tegangan input 2,9 V, COP dapat mencapai 3,0 untuk mode pendinginan dan 4,0 untuk mode pemanasan. Namun, peningkatan ΔT hingga $38,3^\circ\text{C}$ menyebabkan penurunan COP menjadi 0,4-0,5 [1]. Hal ini mengindikasikan pentingnya manajemen termal yang efektif melalui desain heat sink yang optimal. Studi eksperimental pada TEC1-12706 menunjukkan bahwa pada tegangan 12 V dan arus 5 A, perbedaan temperatur dapat mencapai 5°C pada sisi dingin hingga 200°C pada sisi panas [10]. Untuk aplikasi pendinginan ruangan, sistem mampu menurunkan temperatur dari $25,06^\circ\text{C}$ menjadi 10°C dalam waktu 26 menit 55 detik dengan COP termoelektrik sebesar 23,07% [1]. Resistansi termal heat sink memainkan peran krusial dalam performa sistem. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan resistansi termal mengakibatkan penurunan signifikan pada COP untuk input arus yang sama [14]. Penggunaan water cooling system dengan pompa sirkulasi air terbukti

efektif dalam mengurangi temperatur sisi panas dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem [10].

4.4 Aplikasi pada Sistem Pendingin Bangunan

Implementasi sistem termoelektrik pada bangunan dapat dilakukan melalui integrasi pada plafon untuk menciptakan radiant cooling/heating panel [5]. Konsep ini memanfaatkan perpindahan kalor radiasi dan konveksi antara permukaan plafon dengan penghuni ruangan untuk mencapai kenyamanan termal.

4.5 Manajemen Termal

Manajemen termal yang efektif merupakan faktor kritis dalam optimalisasi performa sistem TEC. Penggunaan heatsink yang tepat dapat mempertahankan ΔT rendah dan meningkatkan COP secara signifikan [10], [5]. Penelitian menunjukkan bahwa desain fin heatsink dengan bentuk, ketebalan, dan susunan yang optimal dapat meningkatkan efisiensi transfer kalor [3].

Studi perbandingan berbagai bentuk pin fin (circular, elliptical, triangular, dan trapezoidal) menunjukkan bahwa triangular pin-fins menghasilkan temperatur terendah pada heatsink dan baterai, sementara elliptical pin-fins menghasilkan temperatur tertinggi [3]. Untuk aplikasi battery thermal management system (BTMS), integrasi fin pada basin plate meningkatkan produktivitas hingga 53% dibandingkan sistem konvensional [2]. Penggunaan Phase Change Material (PCM) sebagai media penyimpan energi termal juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. Penelitian pada sistem solar still dengan PCM (stearic acid) di bawah basin liner meningkatkan produktivitas harian dari 4,998 L/m²/hari menjadi 9,005 L/m²/hari dengan efisiensi 85,3% [3]. PCM terbukti lebih efektif untuk massa air yang lebih rendah pada musim dingin.

5 SIMPULAN

Sistem pendingin termoelektrik bertenaga surya mampu menjadi solusi alternatif pengganti sistem pendingin konvensional yang menggunakan refrigeran berbasis gas rumah kaca. Dengan memanfaatkan energi surya dan efek Peltier pada modul termoelektrik, sistem ini tidak menghasilkan emisi karbon maupun limbah berbahaya, sehingga tergolong ramah lingkungan dan berkelanjutan. Perancangan sistem pendingin berbasis modul termoelektrik memanfaatkan energi listrik hasil konversi dari panel surya (PV). Daya listrik yang dihasilkan digunakan untuk mengoperasikan modul Peltier, kipas, dan sistem kontrol. Hasil rancangan menunjukkan bahwa kombinasi panel surya 100 Wp dan modul TEC1-12706 mampu menyediakan daya yang cukup untuk menghasilkan perbedaan suhu

signifikan antara sisi panas dan dingin, sesuai dengan kebutuhan pendinginan berskala kecil. Dari segi efisiensi, sistem termoelektrik memang memiliki koefisien performa (COP) yang lebih rendah dibandingkan sistem kompresi uap. Namun, sistem ini unggul karena tidak memerlukan komponen bergerak atau fluida pendingin, sehingga perawatannya lebih mudah, operasionalnya senyap, dan daya tahannya tinggi. Hal ini sesuai dengan tujuan penelitian untuk menciptakan perangkat pendingin sederhana yang efisien dan ramah lingkungan.

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian teoritis yang dirujuk dari berbagai penelitian terdahulu sistem termoelektrik bertenaga surya dapat diterapkan untuk berbagai aplikasi seperti pendingin portable, kotak penyimpanan vaksin, minuman, hingga sistem ventilasi kecil di daerah yang tidak terjangkau listrik PLN. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi antara energi terbarukan (panel surya) dan teknologi termoelektrik (efek Peltier) berpotensi besar mendukung program nasional dalam transisi energi bersih dan efisiensi energi. Dengan desain yang kompak, hemat energi, dan tidak menghasilkan polusi, sistem ini dapat menjadi model dasar bagi pengembangan sistem pendingin skala rumah tangga atau komersial yang lebih besar di masa mendatang.

KEPUSTAKAAN

- [1] J. Kaiprath and V. V. Kishor Kumar, "A review on solar photovoltaic-powered thermoelectric coolers, performance enhancements, and recent advances," *Int. J. Air-Conditioning Refrig.*, vol. 31, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s44189-023-00022-y.
- [2] M. K. Mahek, M. Ramadan, S. S. bin Dol, M. Ghazal, and M. Alkhedher, "A comprehensive review of thermoelectric cooling technologies for enhanced thermal management in lithium-ion battery systems," *Heliyon*, vol. 10, no. 24, p. e40649, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40649.
- [3] K. R. Cheepati and N. Balal, "Solar Powered Thermoelectric Air Conditioning for Temperature Control in Poultry Incubators," *Sustain.*, vol. 16, no. 11, 2024, doi: 10.3390/su16114832.
- [4] M. Situmorang and M. Panjaitan, "Solar Power-Based Thermo Electric Cooler (TEC) System," vol. 3, no. 2, pp. 133–140, 2021, doi: <https://doi.org/10.32734/jotpv.v3i2.5624>.
- [5] M. Seyednezhad and H. Najafi, "Solar-powered thermoelectric-based cooling and heating system for building applications: A

- parametric study,” *Energies*, vol. 14, no. 17, 2021, doi: 10.3390/en14175573.
- [6] B. Yang *et al.*, “MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search under non-uniform temperature distribution condition,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. August, p. 111991, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111991.
- [7] U. Lucia and G. Grisolia, “Seebeck–peltier transition approach to oncogenesis,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 20, pp. 1–10, 2020, doi: 10.3390/app10207166.
- [8] A. Kurnia, “Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik Sebagai Energi Baru Dan Terbarukan Peluang Serta Kendala,” *J. TEDC*, vol. 19, no. 1, p. 42, 2025, doi: 10.70428/tedc.v19i1.1200.
- [9] Rizki Achmad Baihaqi, Mahendra Widyantono, Aditya Chandra Hermawan, and Ayusta Lukita Wardani, “Prototype Portable Solar Concentrated Thermoelectric Generator Charging System,” *Venus J. Publ. Rumpun Ilmu Tek.*, vol. 2, no. 6, pp. 265–279, 2024, doi: 10.61132/venus.v2i6.658.
- [10] A. Wijaya and G. E. Wira Pratama, “Perbandingan Penggunaan Termoelektrik Cooler (TEC) Dan Termoelektrik Generator (TEG) Untuk Optimalisasi Daya Panel Surya,” *J. EEICT (Electric Electron. Instrum. Control Telecommun.)*, vol. 7, no. 2, 2024, doi: 10.31602/eeict.v7i2.17094.
- [11] Aripriharta and Muhammad cahyo bagaskoro, “Implementasi Green Campus Dengan Stasiun Pengisian Baterai Bertenaga Angin Dan Surya Hibrida,” *at-tamkin J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: 10.33379/attamkin.v7i1.4431.
- [12] J. M. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change*. 2023. doi: 10.1017/9781009157926.
- [13] M. Martawati, “Analisis Simulasi Pengaruh Variasi Intensitas Cahaya Terhadap Daya Dari Panel Surya,” *J. Eltek*, vol. 16, no. 1, p. 125, 2018, doi: 10.33795/eltek.v16i1.92.
- [14] A. E. Kabeel and S. A. El-Agouz, “Review of researches and developments on solar stills,” *Desalination*, vol. 276, no. 1–3, pp. 1–12, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.03.042.