

Analisis komparatif efisiensi listrik dan termal sistem panel surya konvensional dan berpendingin *thermoelectric cooler* (TEC)

Rahmadinda Wahyu Gizela¹, Priyo Adi Sesotyo¹, Puri Muliandhi¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Semarang, Semarang, 50196, Indonesia

Penulis Korespondensi: Priyo Adi Sesotyo (e-mail: psesotyo@usm.ac.id)

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta keterbatasan energi fosil mendorong pengembangan energi terbarukan, khususnya energi surya melalui teknologi photovoltaic (PV). Namun, peningkatan suhu operasi akibat radiasi matahari menyebabkan penurunan efisiensi listrik panel surya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas Thermoelectric Cooler (TEC) sebagai sistem pendingin aktif pada panel surya serta pengaruhnya terhadap kinerja listrik dan termal sistem. Metode yang digunakan adalah analisis komparatif kuantitatif antara sistem photovoltaic konvensional dan photovoltaic dengan pendingin TEC. Penelitian dilakukan menggunakan panel surya monocrystalline 50 Wp yang diuji pada kondisi lingkungan terbuka. Parameter yang dianalisis meliputi suhu permukaan panel, tegangan, arus, daya keluaran, Net Electrical Efficiency, dan Coefficient of Performance (COP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan TEC menurunkan suhu panel secara signifikan, dari 45,57 °C menjadi 27,71 °C pada bagian atas dan dari 43,57 °C menjadi 29,86 °C pada bagian bawah panel. Penurunan suhu mencapai 39% dan 31% pada masing-masing bagian. Meskipun TEC memerlukan daya tambahan rata-rata sebesar 2,57 W, sistem menunjukkan nilai Net Electrical Efficiency sebesar 24,97% dan COP sebesar 6,14. Hasil ini menunjukkan bahwa TEC efektif meningkatkan performa termal panel surya, namun optimasi lebih lanjut masih diperlukan untuk meningkatkan efisiensi listrik keseluruhan sistem photovoltaic.

KATA KUNCI Efisiensi Listrik; Energi Terbarukan; Photovoltaic; Thermoelectric Cooler; Termal

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy and the limitations of fossil fuel resources have encouraged the development of renewable energy technologies, particularly photovoltaic (PV) systems. However, the electrical efficiency of solar panels decreases as operating temperature increases due to solar radiation exposure. This study investigates the effectiveness of a Thermoelectric Cooler (TEC) as an active cooling system and its impact on the electrical and thermal performance of a PV panel. A quantitative comparative analysis was conducted between a conventional PV system and a PV system equipped with TEC cooling. The experiment used a 50 Wp monocrystalline solar panel under outdoor conditions. Parameters analyzed included panel surface temperature, voltage, current, output power, Net Electrical Efficiency, and Coefficient of Performance (COP). The results showed that TEC cooling reduced the panel temperature from 45.57 °C to 27.71 °C on the upper surface and from 43.57 °C to 29.86 °C on the lower surface. Although the TEC required an average additional power consumption of 2.57 W, the system achieved a Net Electrical Efficiency of 24.97% and a COP of 6.14. These results indicate that TEC cooling effectively improves the thermal performance of photovoltaic panels, although further optimization is needed to enhance overall electrical efficiency.

KEYWORD Electrical Efficiency; Photovoltaic; Renewable Energy; Thermoelectric Cooler; Thermal Performance

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik dunia terus mengalami peningkatan seiring berkembangnya sektor industri, teknologi, transportasi, dan pertumbuhan jumlah penduduk. Peningkatan kebutuhan energi tersebut masih didominasi oleh penggunaan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam yang bersifat tidak terbarukan. Penggunaan energi fosil secara terus-menerus menyebabkan berbagai permasalahan seperti pencemaran lingkungan, emisi

gas rumah kaca, dan pemanasan global. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan menjadi salah satu solusi penting untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi surya melalui teknologi *photovoltaic* (PV). Panel surya merupakan perangkat semikonduktor yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung melalui efek fotovoltaiik.

Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi energi surya yang cukup besar karena mendapatkan intensitas penyinaran matahari hampir sepanjang tahun.

Perkembangan teknologi photovoltaic juga terus mengalami peningkatan efisiensi dari tahun ke tahun sehingga menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang paling banyak diterapkan dalam sistem pembangkitan listrik modern. Green dkk. [9] melaporkan bahwa efisiensi sel surya komersial terus mengalami peningkatan seiring perkembangan teknologi material dan manufaktur modul photovoltaic.

Performa panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan seperti intensitas radiasi matahari, temperatur operasi panel, kelembaban udara, dan kondisi cuaca selama proses operasi berlangsung. Intensitas radiasi matahari memiliki hubungan langsung terhadap daya keluaran panel surya. Namun, peningkatan intensitas radiasi matahari juga menyebabkan temperatur permukaan panel meningkat secara signifikan akibat akumulasi panas pada permukaan panel surya. Selain faktor lingkungan, karakteristik material semikonduktor dan konfigurasi sistem photovoltaic juga berpengaruh terhadap efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan panel surya menurut A. Luque dan Steven [10].

Skoplaki dan Palyvos [1] menjelaskan bahwa temperatur operasi merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap performa panel surya. Peningkatan temperatur modul menyebabkan penurunan tegangan keluaran dan efisiensi konversi energi listrik sehingga daya yang dihasilkan panel surya menjadi lebih rendah. Hasil penelitian tersebut diperkuat oleh Dubey dkk. [2] yang menunjukkan bahwa temperatur tinggi menyebabkan meningkatnya rugi-rugi termal pada material semikonduktor sehingga daya maksimum panel surya mengalami penurunan.

Menurut Chander dkk. [3], kenaikan temperatur sebesar 1°C dapat menyebabkan penurunan efisiensi panel surya sekitar 0,4% hingga 0,5% tergantung pada karakteristik modul *photovoltaic* yang digunakan. Oleh karena itu, pengendalian temperatur menjadi salah satu aspek penting dalam upaya meningkatkan performa sistem *photovoltaic*, khususnya pada wilayah tropis yang memiliki intensitas penyinaran matahari tinggi seperti Indonesia.

Berbagai metode pendinginan telah dikembangkan untuk mengurangi temperatur operasi panel surya. Hasan dan Sumathy [4] mengelompokkan metode pendinginan panel surya menjadi dua kategori utama, yaitu pendinginan pasif dan pendinginan aktif. Pendinginan pasif umumnya menggunakan heatsink atau material penyimpan panas, sedangkan pendinginan aktif memanfaatkan media pendingin seperti udara, air, maupun perangkat termoelektrik.

Salah satu metode pendinginan aktif yang banyak dikembangkan adalah *Thermoelectric Cooler* (TEC). Rowe [5] menjelaskan bahwa TEC bekerja berdasarkan efek Peltier, yaitu perpindahan panas akibat aliran arus listrik yang melewati dua material semikonduktor

berbeda. Teknologi ini memiliki keunggulan berupa ukuran yang ringkas, tidak memiliki komponen bergerak, tidak menghasilkan kebisingan, serta tidak memerlukan refrigeran sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan sistem pendinginan konvensional. Odeh dan Behnia [11] menunjukkan bahwa proses pendinginan dapat meningkatkan efisiensi panel surya melalui penurunan temperatur operasi modul. Selain itu, teknologi termoelektrik memiliki fleksibilitas instalasi yang tinggi dan dapat diintegrasikan dengan berbagai konfigurasi sistem photovoltaic tanpa memerlukan perubahan struktur utama panel surya menurut McEvoy dkk. [12].

Penelitian mengenai penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) pada sistem *photovoltaic* telah dilakukan oleh berbagai peneliti. Singh dkk. [6] melaporkan bahwa penggunaan sistem pendingin hybrid yang mengombinasikan *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *Phase Change Material* (PCM) mampu menurunkan temperatur operasi panel surya secara signifikan sehingga meningkatkan performa listrik modul *photovoltaic*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penurunan temperatur berkontribusi langsung terhadap peningkatan stabilitas karakteristik listrik panel selama proses operasi berlangsung. Moharram dkk. [13] melaporkan bahwa penurunan temperatur operasi panel surya melalui sistem pendinginan mampu meningkatkan daya keluaran serta mempertahankan performa listrik panel pada kondisi radiasi matahari yang tinggi.

Teffah dan Zhang [7] juga menunjukkan bahwa sistem *hybrid photovoltaic-thermoelectric* mampu menjaga temperatur operasi panel pada kondisi yang lebih stabil ketika menerima radiasi matahari tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan rugi-rugi termal pada sel surya berkurang sehingga performa listrik panel menjadi lebih baik dibandingkan sistem tanpa pendinginan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa teknologi termoelektrik memiliki potensi yang baik untuk diterapkan sebagai sistem pendingin aktif guna mengurangi rugi-rugi termal dan meningkatkan kinerja sistem *photovoltaic*. Selain mampu menurunkan temperatur operasi panel, teknologi ini juga berpotensi meningkatkan kestabilan tegangan keluaran dan mempertahankan efisiensi sistem selama proses pembangkitan energi berlangsung. Penelitian lain yang dilakukan oleh Ibrahim dkk. [14] menunjukkan bahwa integrasi sistem termal pada photovoltaic dapat meningkatkan pemanfaatan energi surya melalui pengurangan rugi-rugi panas yang terjadi selama proses konversi energi.

Selain itu, Sesotyo dkk. [8] melaporkan bahwa integrasi sistem pendinginan dan pengendalian daya pada *photovoltaic* mampu meningkatkan performa termal dan performa listrik secara bersamaan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem pendinginan masih memiliki potensi yang besar untuk meningkatkan kinerja panel surya pada kondisi iklim tropis.

Perkembangan penelitian mengenai sistem pendingin panel surya berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) masih terus berlanjut. Kaiprath dkk. [16] dalam artikel tinjauan terbaru menjelaskan bahwa integrasi TEC pada sistem photovoltaic memiliki prospek yang baik dalam meningkatkan performa listrik panel surya, meskipun efektivitasnya masih dipengaruhi oleh konsumsi daya modul TEC dan desain sistem pelepasan panas. Selanjutnya, Faheem dkk. [17] melaporkan bahwa penggunaan TEC mampu meningkatkan efisiensi panel surya melalui pengendalian temperatur operasi yang lebih baik. Bulat dkk. [18] juga menunjukkan bahwa strategi pendinginan berbasis TEC dapat meningkatkan performa sistem *photovoltaic-thermoelectric hybrid*. Selain itu, Yusop dkk. [19] serta Al-Tahaine dkk. [20] melaporkan bahwa optimasi penggunaan modul termoelektrik mampu mengurangi temperatur operasi panel surya dan memberikan peningkatan performa listrik pada berbagai kondisi pengujian.

Meskipun penggunaan TEC mampu meningkatkan performa termal panel surya, sistem pendingin ini memerlukan daya listrik tambahan untuk proses pendinginan. Konsumsi daya tersebut dapat mempengaruhi efisiensi listrik bersih sistem panel surya sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut terhadap performa keseluruhan sistem.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) mampu menurunkan temperatur operasi panel surya dan meningkatkan performa listrik, sebagian besar penelitian masih mengevaluasi parameter temperatur, efisiensi listrik, atau daya keluaran secara terpisah. Selain itu, analisis konsumsi energi yang digunakan oleh TEC sebagai sistem pendingin sering kali belum diperhitungkan dalam evaluasi performa sistem secara menyeluruh. Penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) berupa integrasi evaluasi performa termal dan listrik melalui penggunaan dua parameter utama, yaitu *Net Electrical Efficiency* dan *Coefficient of Performance* (COP), dalam satu sistem pengujian. *Net Electrical Efficiency* digunakan untuk mengevaluasi efisiensi listrik bersih setelah memperhitungkan konsumsi daya TEC, sedangkan *Coefficient of Performance* digunakan untuk menilai efektivitas proses pendinginan yang dihasilkan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi kemampuan TEC dalam menurunkan temperatur panel surya, tetapi juga menilai keseimbangan antara manfaat pendinginan dan energi listrik yang dikonsumsi sehingga memberikan evaluasi performa sistem photovoltaic yang lebih komprehensif.

Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang tidak hanya mengevaluasi kemampuan TEC dalam menurunkan temperatur panel surya, tetapi juga menganalisis pengaruhnya terhadap performa listrik bersih sistem secara menyeluruh. Analisis tersebut penting untuk mengetahui tingkat efektivitas

penggunaan TEC sebagai sistem pendingin aktif pada panel surya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *Thermoelectric Cooler* terhadap temperatur operasi, daya keluaran, efisiensi listrik, *Net Electrical Efficiency*, dan *Coefficient of Performance* (COP) pada panel surya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen (*experimental method*) untuk menganalisis pengaruh penggunaan sistem pendingin *Thermoelectric Cooler* (TEC) terhadap temperatur operasi dan performa panel surya. Pengujian dilakukan dengan membandingkan dua kondisi sistem, yaitu panel surya konvensional tanpa pendinginan dan panel surya dengan pendingin TEC.

Pengujian dilakukan secara *outdoor* pada area terbuka tanpa adanya bayangan yang menghalangi paparan sinar matahari secara langsung. Pengambilan data dilakukan pada kondisi cuaca cerah mulai pukul 09.00 WIB hingga 15.00 WIB dengan interval pengukuran setiap satu jam, sehingga diperoleh tujuh titik pengamatan pada masing-masing kondisi pengujian. Sebelum proses pengambilan data, dilakukan beberapa kali uji coba sistem untuk memastikan seluruh komponen beroperasi dengan baik. Data yang digunakan dalam analisis merupakan hasil satu kali pengambilan data pada setiap interval pengamatan. Parameter lingkungan seperti temperatur udara, kelembaban relatif, dan kecepatan angin tidak diukur secara langsung. Oleh karena itu, kondisi lingkungan selama pengujian direpresentasikan menggunakan nilai irradiance yang diukur pada setiap waktu pengamatan sebagai parameter utama yang mempengaruhi performa panel surya.



Gambar 1. Spesifikasi panel surya *monocrystalline* 50 Wp

Gambar 1. menunjukkan spesifikasi panel surya *monocrystalline* 50 Wp yang digunakan pada penelitian ini. Berdasarkan spesifikasi tersebut, panel surya memiliki daya maksimum sebesar 50 W dengan tegangan maksimum sebesar 18,2 V dan arus

maksimum sebesar 2,75 A. Pada penelitian ini digunakan modul TEC1-12706 yang dipasang pada bagian belakang panel surya menggunakan thermal paste untuk meningkatkan proses perpindahan panas.

Konfigurasi sistem pengujian ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem terdiri dari panel surya, modul TEC, alat ukur tegangan dan arus, serta resistor pembebanan. Modul TEC dipasang pada bagian belakang panel surya untuk menyerap panas dari permukaan panel selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 2. Diagram konfigurasi sistem pendingin TEC pada panel surya

Foto *prototype* alat pengujian ditunjukkan pada Gambar 3 yang memperlihatkan bentuk fisik panel surya, pemasangan TEC dan sistem pengukuran yang digunakan selama penelitian berlangsung.

Parameter yang diukur selama penelitian meliputi temperatur permukaan panel bagian atas dan bawah, tegangan keluaran panel, arus keluaran panel, daya keluaran panel, data irradiance, *Net Electrical Efficiency*, dan *Coefficient of Performance* (COP). Temperatur panel diukur menggunakan thermogun digital pada bagian atas dan bawah panel untuk mengetahui distribusi temperatur selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 3. Prototype sistem pendingin TEC pada panel surya

Prototype penelitian terdiri atas panel surya *monocrystalline*, sistem pendingin *Thermoelectric Cooler* (TEC), serta beberapa alat ukur yang digunakan selama proses pengujian. Alat ukur tersebut berfungsi untuk memperoleh data parameter listrik, parameter termal, dan intensitas radiasi matahari sebagai dasar analisis performa sistem *photovoltaic*. Spesifikasi alat dan komponen utama yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi alat penelitian

No	Alat	Tipe/Model	Fungsi
1	Panel surya	Monocrystalline 50 Wp	Objek penelitian
2	Thermoelectric Cooler	TEC1-12706	Sistem pendingin aktif panel surya
3	Thermogun Digital	Taffware CX6000	Mengukur temperatur permukaan panel
4	Clamp Meter Digital	Krisbow 10207849	Mengukur tegangan dan arus keluaran panel
5	Solar Power Meter	Digital Solar Power Meter	Mengukur intensitas radiasi matahari (irradiance)

Sebelum proses pengujian dilakukan, seluruh alat ukur diperiksa kondisi fungsinya dan dikalibrasi secara sederhana sesuai prosedur penggunaan masing-masing alat. Pengukuran temperatur menggunakan infrared thermometer dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan pada objek dengan temperatur yang diketahui, sedangkan pengukuran tegangan dan arus menggunakan clamp meter diperiksa terlebih dahulu untuk memastikan nilai pembacaan berada pada kondisi normal (*zero reading*). Langkah tersebut dilakukan untuk meminimalkan kesalahan pengukuran selama proses eksperimen berlangsung.

Data yang diperoleh dari pengukuran menggunakan alat-alat tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung daya keluaran panel surya, *Net Electrical Efficiency*, dan *Coefficient of Performance* (COP) menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Daya keluaran panel surya dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V_{mp} \times I_{mp} \quad (1)$$

Keterangan: P = Daya keluaran panel (W), V_{mp} = Tegangan keluaran panel (V), I_{mp} = Arus keluaran panel (A), Sedangkan *Net Electrical Efficiency* panel surya dihitung menggunakan persamaan:

$$\mu = \frac{PPV - P_{TEC}}{(G \times A)} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan: η = *Net Electrical Efficiency* (%), PPV = Daya rata-rata panel surya (W), P_{TEC} = Daya rata-rata TEC (W), G = Intensitas radiasi matahari (W/m^2), A = Luas panel surya (m^2).

Selain efisiensi listrik, performa sistem pendingin TEC juga dievaluasi menggunakan parameter *Coefficient of Performance* (COP). Nilai COP menunjukkan kemampuan sistem pendingin dalam memindahkan panas dibandingkan energi listrik yang digunakan selama proses pendinginan. Perhitungan COP dilakukan menggunakan persamaan:

$$COP = \frac{\Delta T_{avg}}{P_{TEC}} \quad (3)$$

Keterangan: COP = *Coefficient of Performance*, ΔT_{avg} = Rata-rata penurunan suhu panel surya (°C), P_{TEC} = Daya listrik yang digunakan TEC (W), Semakin tinggi nilai COP yang diperoleh, semakin efektif kemampuan sistem TEC dalam memindahkan panas dibandingkan energi listrik yang dikonsumsi selama proses pendinginan berlangsung.

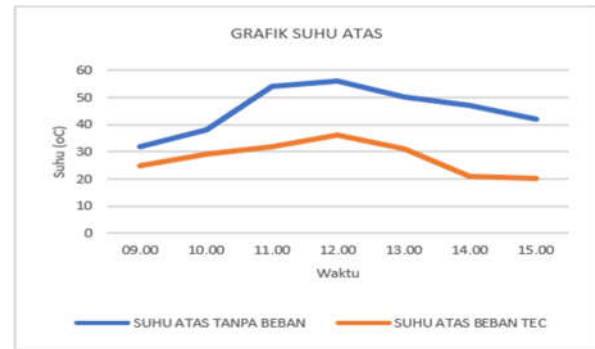
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis temperatur permukaan atas panel surya

Perbandingan temperatur permukaan atas panel surya selama proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa temperatur panel surya pada kedua sistem mengalami peningkatan secara bertahap mulai pagi hingga siang hari seiring meningkatnya intensitas radiasi matahari. Temperatur tertinggi terjadi pada rentang waktu sekitar pukul 11.00–13.00 WIB ketika intensitas radiasi matahari berada pada kondisi maksimum.

Panel surya konvensional menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan sistem pendingin TEC pada seluruh waktu pengujian. Temperatur maksimum panel konvensional mencapai 45,57°C, sedangkan panel dengan pendingin TEC hanya mencapai 27,71°C. Selisih temperatur yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa sistem pendingin TEC mampu bekerja secara efektif dalam mengurangi akumulasi panas pada permukaan panel surya.

Peningkatan temperatur pada panel surya konvensional terjadi karena sebagian besar energi radiasi matahari yang diterima panel tidak seluruhnya dikonversi menjadi energi listrik, tetapi berubah menjadi energi panas. Akumulasi panas tersebut menyebabkan temperatur permukaan panel meningkat secara signifikan selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 4. Perbandingan temperatur permukaan atas panel surya terhadap waktu pengujian

Pada sistem pendingin TEC, panas yang terakumulasi pada permukaan panel dipindahkan menuju sisi panas TEC melalui mekanisme efek Peltier. Proses perpindahan panas tersebut menyebabkan temperatur permukaan panel tetap berada pada kondisi yang lebih rendah dibandingkan panel konvensional.

Penurunan temperatur sebesar 17,86°C menunjukkan bahwa penggunaan TEC mampu meningkatkan kestabilan termal panel surya. Kondisi tersebut sangat penting karena temperatur panel merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa listrik sistem *photovoltaic*. Semakin rendah temperatur operasi panel, semakin kecil rugi-rugi termal yang terjadi pada sel surya sehingga proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik dapat berlangsung lebih optimal.

Selain dipengaruhi oleh sistem pendingin yang digunakan, perubahan temperatur panel surya juga dipengaruhi oleh variasi intensitas radiasi matahari selama proses pengujian berlangsung. Pada pagi hari temperatur panel masih relatif rendah karena energi panas yang diterima panel belum terakumulasi secara signifikan. Seiring meningkatnya intensitas radiasi matahari menuju siang hari, temperatur panel mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai kondisi maksimum. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa temperatur panel memiliki hubungan yang erat dengan besarnya energi panas yang diterima selama proses konversi energi berlangsung.

Pada sistem panel surya konvensional, panas yang terbentuk akibat proses penyerapan radiasi matahari hanya dilepaskan melalui mekanisme konveksi alami dan radiasi ke lingkungan. Akibatnya, laju pelepasan panas lebih kecil dibandingkan laju penyerapan panas sehingga temperatur panel terus meningkat selama periode pengujian. Kondisi ini berbeda dengan sistem TEC yang secara aktif memindahkan panas dari permukaan panel menuju sisi panas modul termoelektrik sehingga akumulasi panas pada panel dapat dikurangi secara signifikan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Singh dkk. [6] yang menunjukkan bahwa penggunaan sistem pendingin berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) mampu menurunkan temperatur operasi panel surya

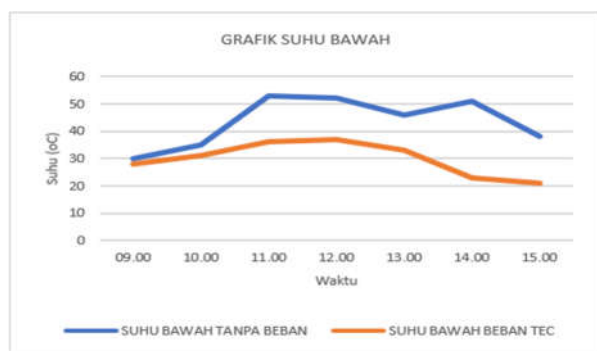
secara signifikan sehingga meningkatkan performa listrik modul photovoltaic. Teffah dan Zhang [7] juga melaporkan bahwa sistem *hybrid photovoltaic-thermoelectric* mampu menjaga temperatur operasi panel pada kondisi yang lebih stabil ketika menerima radiasi matahari tinggi.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian terbaru oleh Faheem dkk. [17] yang melaporkan bahwa penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) mampu meningkatkan performa panel surya melalui penurunan temperatur operasi. Selain itu, Kaiprath dkk. [16] menjelaskan bahwa efektivitas sistem pendingin TEC sangat dipengaruhi oleh desain pelepasan panas serta konsumsi daya modul TEC. Penurunan temperatur sebesar $17,86^{\circ}\text{C}$ yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pendingin yang digunakan mampu bekerja secara efektif dalam menjaga temperatur operasi panel sehingga performa listrik panel dapat dipertahankan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan TEC mampu menurunkan temperatur operasi panel secara signifikan sehingga potensi penurunan efisiensi akibat kenaikan temperatur dapat dikurangi. Penurunan temperatur tersebut juga memberikan pengaruh terhadap karakteristik listrik panel surya, khususnya peningkatan tegangan keluaran yang selanjutnya berkontribusi terhadap peningkatan daya listrik yang dihasilkan. Dengan demikian, pengendalian temperatur menggunakan TEC tidak hanya meningkatkan kestabilan termal panel, tetapi juga mendukung peningkatan performa sistem *photovoltaic* secara keseluruhan.

3.2. Analisis temperatur permukaan bawah panel surya

Temperatur permukaan bawah panel surya diukur pada setiap interval waktu untuk mengetahui pengaruh penggunaan TEC terhadap penurunan temperatur operasi panel. Perbandingan antara panel surya tanpa pendinginan dan panel surya dengan TEC memberikan gambaran mengenai efektivitas sistem pendingin dalam mengurangi panas pada bagian bawah panel selama pengujian. Hasil pengukuran tersebut disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan temperatur permukaan bawah panel surya terhadap waktu pengujian

Perbandingan temperatur bagian bawah panel surya selama proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan grafik terlihat bahwa pola perubahan temperatur bagian bawah panel memiliki kecenderungan yang sama dengan temperatur bagian atas. Temperatur meningkat secara bertahap hingga siang hari dan menurun kembali pada sore hari mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari.

Panel surya konvensional menghasilkan temperatur rata-rata bagian bawah sebesar $43,57^{\circ}\text{C}$, sedangkan sistem TEC menghasilkan temperatur rata-rata sebesar $29,86^{\circ}\text{C}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem TEC tidak hanya efektif menurunkan temperatur permukaan atas panel, tetapi juga mampu mengurangi temperatur pada bagian belakang panel.

Penurunan temperatur pada bagian bawah panel menunjukkan bahwa proses perpindahan panas dari panel menuju TEC berlangsung dengan baik. Hal ini menandakan bahwa kontak termal antara panel surya dan modul TEC telah bekerja secara optimal.

Kondisi temperatur yang lebih rendah menunjukkan bahwa distribusi panas pada panel menjadi lebih merata sehingga gradien temperatur pada struktur panel dapat dikurangi. Selain meningkatkan kestabilan operasi panel, kondisi tersebut juga dapat memperpanjang umur pakai modul surya karena mengurangi risiko thermal stress pada material panel.

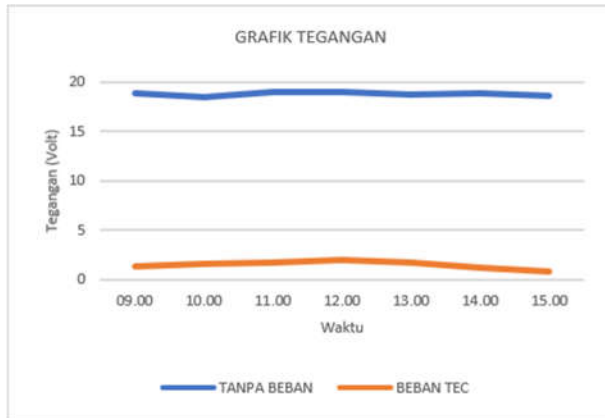
Dubey dkk. [2] menjelaskan bahwa temperatur operasi yang tinggi tidak hanya menyebabkan penurunan efisiensi panel surya, tetapi juga dapat mempercepat degradasi material semikonduktor akibat peningkatan tekanan termal selama proses operasi berlangsung. Oleh karena itu, penggunaan sistem pendingin aktif seperti *Thermoelectric Cooler* (TEC) berpotensi membantu menjaga kestabilan temperatur panel sekaligus meningkatkan keandalan sistem photovoltaic dalam jangka panjang.

Penurunan temperatur pada bagian bawah panel juga menunjukkan bahwa distribusi panas pada struktur panel menjadi lebih merata ketika menggunakan TEC. Kondisi ini penting karena perbedaan temperatur yang terlalu besar antara bagian atas dan bawah panel dapat menyebabkan tegangan termal pada material penyusun panel surya. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut berpotensi mempercepat degradasi material serta menurunkan umur operasional modul *photovoltaic*.

Selain menunjukkan efektivitas perpindahan panas, temperatur bagian bawah panel yang lebih rendah juga mengindikasikan bahwa panas berlebih pada struktur panel dapat dikurangi secara lebih optimal. Kondisi tersebut membantu menjaga temperatur operasi sel surya tetap rendah sehingga rugi-rugi termal dapat diminimalkan. Akibatnya, karakteristik listrik panel surya, khususnya tegangan keluaran, menjadi lebih stabil dan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daya keluaran sistem *photovoltaic*.

3.3. Analisis tegangan keluaran panel surya

Tegangan keluaran panel surya diukur pada setiap interval waktu untuk mengetahui pengaruh penggunaan TEC terhadap karakteristik keluaran panel selama proses pengujian. Perbandingan antara panel surya tanpa pendinginan dan panel surya dengan beban TEC memberikan gambaran mengenai perubahan tegangan keluaran selama pengujian. Hasil pengukuran tersebut disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan tegangan keluaran panel surya terhadap waktu pengujian

Perbandingan tegangan keluaran panel surya selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan grafik terlihat bahwa tegangan keluaran panel surya cenderung meningkat pada pagi hingga menjelang siang hari dan kemudian menurun secara bertahap pada sore hari. Perubahan tersebut dipengaruhi oleh variasi intensitas radiasi matahari yang diterima panel surya serta kondisi temperatur operasi panel selama proses pengujian berlangsung.

Berdasarkan data pada grafik, tegangan keluaran panel surya tanpa pendingin berada pada rentang 18,50V~18,95 V. Tegangan maksimum sebesar 18,95 V terjadi pada pukul 11.00 WIB, sedangkan tegangan minimum sebesar 18,50 V terjadi pada pukul 10.00 WIB. Selisih tegangan yang relatif kecil tersebut menunjukkan bahwa perubahan tegangan masih berada dalam batas normal. Namun demikian, peningkatan temperatur panel tetap memberikan pengaruh terhadap karakteristik tegangan keluaran karena sel surya silikon memiliki koefisien temperatur negatif.

Sistem panel surya dengan pendingin TEC menghasilkan tegangan yang lebih stabil dibandingkan panel konvensional. Stabilitas tegangan tersebut terjadi karena temperatur operasi panel dapat dijaga pada kondisi yang lebih rendah sehingga rugi-rugi termal pada sel surya menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut memungkinkan proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik berlangsung lebih optimal. Secara teoritis, peningkatan temperatur menyebabkan penurunan tegangan keluaran panel surya akibat perubahan karakteristik semikonduktor silikon. Oleh karena itu, panel dengan temperatur yang lebih rendah cenderung

menghasilkan tegangan yang lebih stabil dibandingkan panel dengan temperatur tinggi.

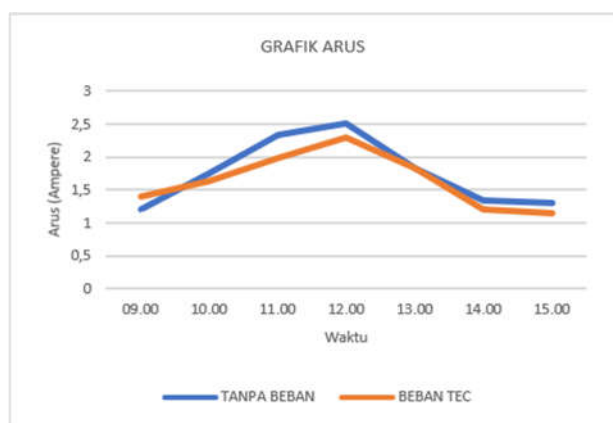
Fenomena penurunan tegangan (*voltage drop*) pada panel surya terjadi akibat meningkatnya temperatur operasi modul selama proses pengujian. Pada penelitian ini, temperatur permukaan atas panel surya konvensional mencapai 45,57°C, sedangkan pada panel surya yang menggunakan TEC hanya mencapai 27,71°C. Penurunan temperatur sebesar 17,86°C tersebut berkontribusi terhadap berkurangnya penurunan tegangan keluaran panel. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendalian temperatur menggunakan TEC berperan dalam mempertahankan karakteristik listrik panel sehingga penurunan performa akibat kenaikan temperatur dapat diminimalkan.

Hubungan antara temperatur dan tegangan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan TEC tidak hanya berfungsi sebagai sistem pendingin, tetapi juga berperan dalam mengurangi fenomena *voltage drop* pada panel surya. Karena daya listrik merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus, kestabilan tegangan yang dihasilkan memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan daya keluaran panel surya dibandingkan sistem tanpa pendinginan.

Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian Skoplaki dan Palyvos [1] serta Chander dkk. [3] yang menyatakan bahwa tegangan keluaran panel surya sangat sensitif terhadap perubahan temperatur operasi. Secara keseluruhan, penggunaan TEC memberikan dampak positif terhadap kestabilan tegangan keluaran panel surya selama proses pengujian berlangsung sehingga mendukung peningkatan performa listrik sistem *photovoltaic* secara keseluruhan.

3.4. Analisis arus keluaran panel surya

Analisis arus keluaran panel surya dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan sistem pendingin TEC terhadap karakteristik arus yang dihasilkan selama proses pengujian. Pengukuran dilakukan pada setiap interval waktu dengan membandingkan arus keluaran panel surya tanpa pendinginan dan panel surya yang menggunakan beban TEC. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penurunan temperatur operasi terhadap kemampuan panel surya dalam menghasilkan arus listrik. Perbandingan arus keluaran panel surya terhadap waktu pengujian disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan arus keluaran panel surya terhadap waktu pengujian

Arus keluaran panel surya menunjukkan pola yang hampir sama dengan perubahan intensitas radiasi matahari selama proses pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya arus keluaran lebih dipengaruhi oleh jumlah energi cahaya yang diterima panel dibandingkan temperatur operasi panel surya. Nilai arus meningkat secara bertahap mulai pagi hari hingga mencapai puncaknya pada siang hari ketika intensitas radiasi matahari maksimum.

Berdasarkan Gambar 7, arus keluaran panel surya tanpa pendingin meningkat dari 1,20 A pada pukul 09.00 WIB hingga mencapai nilai maksimum sebesar 2,50 A pada pukul 12.00 WIB. Setelah itu arus menurun secara bertahap menjadi 1,30 A pada pukul 15.00 WIB. Pada sistem dengan TEC, arus keluaran berada pada rentang 1,15–2,30 A dengan nilai maksimum sebesar 2,30 A yang juga terjadi pada pukul 12.00 WIB. Pola perubahan arus pada kedua sistem menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu meningkat hingga siang hari dan menurun kembali pada sore hari mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari. Selisih arus maksimum antara kedua sistem hanya sebesar 0,20 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan TEC tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap arus keluaran panel surya karena arus lebih dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari dibandingkan temperatur operasi panel.

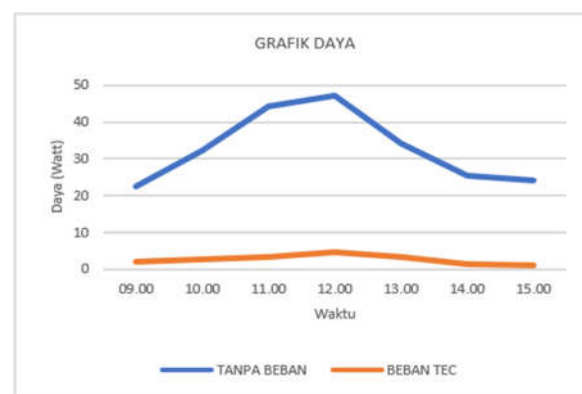
Peningkatan arus keluaran terjadi karena semakin besar energi cahaya yang diterima panel maka semakin banyak pasangan *elektron-hole* yang terbentuk pada sel surya sehingga arus listrik yang dihasilkan menjadi lebih besar. Berbeda dengan tegangan yang sangat dipengaruhi temperatur, arus panel surya lebih dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Oleh karena itu perbedaan arus antara panel konvensional dan panel TEC tidak terlalu besar. Meskipun demikian, temperatur operasi yang lebih rendah pada sistem TEC membantu menjaga kestabilan karakteristik listrik panel, terutama pada tegangan keluaran, sehingga secara keseluruhan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daya keluaran sistem *photovoltaic*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan arus keluaran panel surya cenderung mengikuti pola perubahan intensitas radiasi matahari. Ketika intensitas radiasi meningkat, jumlah foton yang diterima permukaan sel surya juga meningkat sehingga jumlah elektron yang dihasilkan menjadi lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan arus keluaran panel mengalami peningkatan hingga mencapai nilai maksimum pada siang hari.

Berbeda dengan tegangan yang sangat sensitif terhadap perubahan temperatur, arus keluaran panel surya relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat penurunan temperatur panel. Oleh karena itu, manfaat utama penggunaan TEC terhadap performa listrik panel lebih banyak terlihat pada peningkatan kestabilan tegangan dibandingkan peningkatan arus keluaran. Kombinasi antara tegangan yang lebih stabil dan arus yang relatif tetap menyebabkan daya keluaran panel surya menjadi lebih optimal dibandingkan sistem tanpa pendinginan.

3.5. Analisis daya keluaran panel surya

Analisis daya keluaran panel surya dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan sistem pendingin TEC terhadap performa listrik panel selama proses pengujian. Pengukuran dilakukan pada setiap interval waktu dengan membandingkan daya keluaran panel surya tanpa pendinginan dan panel surya yang menggunakan TEC. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana penurunan temperatur akibat pendinginan dapat mempertahankan daya keluaran panel surya pada kondisi operasi yang lebih optimal. Hasil pengukuran daya keluaran terhadap waktu disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan daya keluaran panel surya terhadap waktu pengujian

Daya keluaran panel surya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus keluaran panel. Berdasarkan grafik terlihat bahwa daya keluaran meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum pada siang hari dan menurun kembali pada sore hari. Sistem pendingin TEC mampu menjaga temperatur panel pada kondisi yang lebih rendah sehingga rugi-rugi termal berkurang. Kondisi tersebut

menyebabkan performa listrik panel menjadi lebih stabil selama proses pengujian berlangsung. Namun demikian, sebagian energi listrik yang dihasilkan panel digunakan untuk mengoperasikan TEC sehingga daya bersih sistem menjadi lebih rendah dibandingkan daya keluaran bruto panel surya. Meskipun demikian, temperatur operasi panel yang lebih rendah mampu mempertahankan kestabilan tegangan keluaran sehingga penurunan daya akibat kenaikan temperatur dapat diminimalkan.

Berdasarkan hasil pengukuran, daya yang digunakan oleh sistem pendingin TEC dihitung menggunakan persamaan $P = V_{mp} \times I_{mp}$. Nilai daya TEC selama pengujian berada pada rentang 0,92 W–4,49 W. Daya terendah terjadi pada pukul 15.00 WIB sebesar 0,92 W, sedangkan daya tertinggi terjadi pada pukul 12.00 WIB sebesar 4,49 W. Rata-rata konsumsi daya TEC selama pengujian sebesar 2,57 W. Peningkatan konsumsi daya pada siang hari terjadi karena tegangan dan arus yang tersedia dari panel surya meningkat seiring bertambahnya intensitas radiasi matahari. Jika dibandingkan dengan daya maksimum panel surya tanpa pendingin sebesar 47,33 W, maka konsumsi daya maksimum TEC hanya sekitar 9,49% dari daya panel. Sementara itu, konsumsi daya rata-rata TEC sebesar 2,57 W setara dengan sekitar 7,81% dari daya rata-rata panel tanpa pendingin sebesar 32,89 W.

Meskipun terjadi konsumsi daya tambahan, penggunaan TEC tetap memberikan keuntungan berupa kestabilan performa listrik dan temperatur operasi yang lebih rendah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan temperatur panel menyebabkan penurunan daya maksimum panel surya. Oleh karena itu penggunaan sistem pendingin aktif dapat menjadi salah satu solusi untuk mempertahankan performa panel surya pada kondisi lingkungan tropis. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan performa panel surya tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya intensitas radiasi matahari, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam mengendalikan temperatur operasi panel.

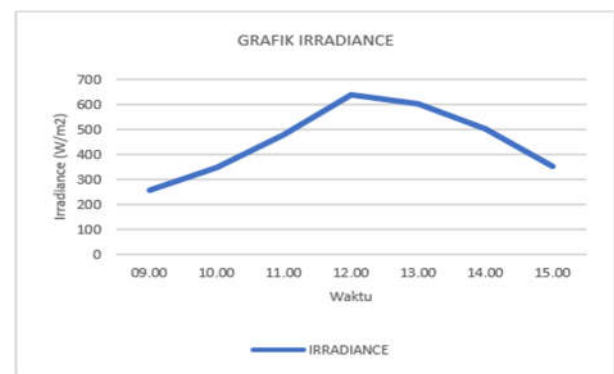
Daya keluaran panel surya merupakan parameter yang paling representatif untuk menggambarkan performa sistem *photovoltaic* secara keseluruhan. Nilai daya dipengaruhi secara langsung oleh tegangan dan arus keluaran panel selama proses pengujian berlangsung. Oleh karena itu, perubahan kecil pada salah satu parameter listrik tersebut akan berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan.

Pada penelitian ini, penggunaan TEC mampu menjaga temperatur operasi panel pada kondisi yang lebih rendah sehingga rugi-rugi termal dapat dikurangi. Meskipun sebagian energi listrik digunakan untuk mengoperasikan sistem pendingin, kestabilan temperatur yang dihasilkan TEC tetap memberikan keuntungan berupa performa listrik yang lebih konsisten selama periode pengujian berlangsung. Hal tersebut menunjukkan bahwa manfaat penggunaan TEC tidak hanya ditinjau dari besarnya daya yang dihasilkan, tetapi juga dari kemampuan sistem dalam

menjaga kestabilan operasi panel surya. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan temperatur operasi panel melalui penggunaan TEC memberikan dampak positif terhadap karakteristik listrik panel surya. Temperatur yang lebih rendah membantu menjaga kestabilan tegangan, sementara arus keluaran tetap mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari. Kombinasi kedua kondisi tersebut menghasilkan daya keluaran yang lebih optimal sehingga performa sistem *photovoltaic* secara keseluruhan dapat ditingkatkan.

3.6. Analisis irradiance

Pengukuran irradiance dilakukan selama proses pengujian untuk mengetahui perubahan intensitas radiasi matahari pada setiap waktu pengamatan. Variasi nilai irradiance menjadi parameter penting dalam mengevaluasi kinerja sistem *photovoltaic* karena secara langsung memengaruhi temperatur operasi dan karakteristik keluaran panel surya. Hasil pengukuran irradiance terhadap waktu selama pengujian disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan irradiance terhadap waktu pengujian

Irradiance merupakan intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan panel surya per satuan luas. Besarnya irradiance menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi kinerja panel surya karena menentukan jumlah energi matahari yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Oleh karena itu, pengamatan irradiance dilakukan untuk mengetahui kondisi radiasi matahari selama proses pengujian berlangsung.

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 9, nilai irradiance mengalami peningkatan secara bertahap mulai pukul 09.00 WIB hingga mencapai nilai maksimum pada pukul 12.00 WIB. Pada pukul 09.00 WIB nilai irradiance tercatat sebesar 258 W/m², kemudian meningkat menjadi 345 W/m² pada pukul 10.00 WIB, 480 W/m² pada pukul 11.00 WIB, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 638 W/m² pada pukul 12.00 WIB. Setelah mencapai nilai maksimum, irradiance mulai mengalami penurunan menjadi 600 W/m² pada pukul 13.00 WIB, 500 W/m²

pada pukul 14.00 WIB, dan 350 W/m² pada pukul 15.00 WIB.

Peningkatan irradiance selama periode pengujian berpengaruh terhadap kenaikan temperatur panel surya. Semakin tinggi irradiance yang diterima, semakin besar energi panas yang diserap oleh panel sehingga temperatur permukaan panel cenderung meningkat. Kondisi ini terlihat pada sistem tanpa pendingin yang menunjukkan temperatur operasi lebih tinggi dibandingkan sistem yang menggunakan Thermoelectric Cooler (TEC). Peningkatan temperatur akibat irradiance yang tinggi berpotensi meningkatkan rugi-rugi termal pada sel surya sehingga karakteristik listrik panel, khususnya tegangan keluaran, dapat mengalami penurunan apabila tidak dilakukan pengendalian temperatur.

Selain mempengaruhi temperatur panel, peningkatan irradiance juga berdampak pada peningkatan daya keluaran panel surya. Hal ini terjadi karena semakin besar energi radiasi yang diterima panel, semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan. Namun demikian, kenaikan temperatur akibat irradiance yang tinggi dapat menurunkan efisiensi konversi energi listrik karena meningkatnya rugi-rugi termal pada sel surya. Oleh karena itu, penggunaan TEC pada penelitian ini berperan dalam menjaga temperatur operasi panel tetap lebih rendah sehingga pengaruh negatif kenaikan temperatur terhadap performa panel surya dapat diminimalkan.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai irradiance tertinggi sebesar 638 W/m² terjadi pada pukul 12.00 WIB, sedangkan nilai terendah sebesar 258 W/m² terjadi pada pukul 09.00 WIB. Dengan nilai irradiance rata-rata sebesar 453 W/m², kondisi pengujian dapat dikategorikan cukup representatif untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan TEC terhadap performa termal dan performa listrik panel surya selama periode pengamatan. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa perubahan performa panel surya selama pengujian dipengaruhi oleh kombinasi antara variasi irradiance dan temperatur operasi panel. Oleh karena itu, evaluasi performa sistem *photovoltaic* perlu mempertimbangkan kedua parameter tersebut secara bersamaan.

3.7. Analisis net electrical efficiency

Net Electrical Efficiency digunakan untuk mengetahui efisiensi listrik bersih sistem *photovoltaic* setelah memperhitungkan daya yang digunakan oleh *Thermoelectric Cooler* (TEC). Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menghasilkan daya listrik bersih selama proses pengujian berlangsung. *Net Electrical Efficiency* dihitung menggunakan Persamaan (2).

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh daya rata-rata panel surya sebesar 32,89 W, daya rata-rata TEC sebesar 2,57 W, irradiance rata-rata sebesar 453 W/m², dan luas panel surya sebesar 0,268 m². Maka nilai *Net Electrical Efficiency* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\mu = \frac{PPV - PTEC}{(G \times A)} \times 100\%$$

$$\mu = \frac{32,89 - 2,57}{(453 \times 0,268)} \times 100\%$$

$$\mu = 24,97 \%$$

Nilai *Net Electrical Efficiency* sebesar 24,97% menunjukkan bahwa setelah memperhitungkan konsumsi daya TEC, sistem masih mampu mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik dengan tingkat efisiensi bersih sebesar 24,97%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan performa listrik akibat penurunan temperatur panel masih lebih besar dibandingkan energi listrik yang dikonsumsi oleh sistem pendingin TEC. Dengan demikian, penggunaan TEC masih memberikan keuntungan terhadap performa sistem karena konsumsi daya pendingin relatif kecil dibandingkan energi listrik yang dihasilkan panel surya.

Selain itu, kemampuan TEC dalam menurunkan temperatur panel sebesar 17,86°C pada bagian atas dan 13,71°C pada bagian bawah membantu mengurangi rugi-rugi termal yang terjadi pada sel surya. Penurunan temperatur tersebut berkontribusi dalam menjaga performa panel surya selama menerima irradiance rata-rata sebesar 453 W/m². Dengan demikian, penggunaan TEC tidak hanya berpengaruh terhadap kondisi termal panel, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi listrik bersih sistem *photovoltaic*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendalian temperatur merupakan salah satu faktor penting dalam meningkatkan performa sistem *photovoltaic*, karena temperatur operasi yang lebih rendah mampu mempertahankan karakteristik listrik panel sehingga efisiensi listrik bersih sistem tetap terjaga.

Berbeda dengan sebagian besar penelitian terdahulu yang hanya berfokus pada peningkatan efisiensi panel akibat penurunan temperatur, penelitian ini juga mengevaluasi konsumsi daya *Thermoelectric Cooler* (TEC) melalui parameter *Net Electrical Efficiency*. Pendekatan ini memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap performa sistem *photovoltaic* karena manfaat pendinginan dianalisis bersamaan dengan energi listrik yang dikonsumsi oleh TEC. Pendekatan tersebut juga sejalan dengan rekomendasi Kaiprath dkk. [16] yang menekankan pentingnya mempertimbangkan konsumsi energi sistem pendingin dalam evaluasi performa *photovoltaic*.

3.8. Analisis coefficient of performance (COP)

Coefficient of Performance (COP) digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem pendingin dalam menghasilkan efek pendinginan terhadap panel surya dibandingkan dengan energi listrik yang digunakan oleh TEC. Semakin tinggi nilai COP, maka semakin baik kemampuan sistem pendingin dalam menghasilkan efek pendinginan. Pada penelitian ini, nilai COP dihitung menggunakan Persamaan (3).

Penurunan temperatur bagian atas panel diperoleh sebesar:

$$\Delta T_{atas} = 45,57 - 27,71 = 17,86^\circ\text{C}$$

Sedangkan penurunan temperatur bagian bawah panel diperoleh sebesar:

$$\Delta T_{bawah} = 43,57 - 29,86 = 13,71^\circ\text{C}$$

Sehingga rata-rata penurunan temperatur panel adalah:

$$\Delta T_{avg} = \frac{17,86 + 13,71}{2} = 15,79^\circ\text{C}$$

Dengan daya TEC sebesar 2,57 W, maka diperoleh:

$$COP = \frac{15,79}{2,57} = 6,14$$

Nilai COP sebesar 6,14 menunjukkan bahwa sistem *Thermoelectric Cooler* (TEC) mampu menghasilkan efek pendinginan yang cukup baik selama proses pengujian berlangsung. Nilai COP tersebut menunjukkan bahwa energi listrik yang digunakan untuk mengoperasikan TEC mampu menghasilkan efek pendinginan yang cukup besar. Dengan kata lain, energi yang dikonsumsi oleh sistem pendingin masih sebanding dengan kemampuan TEC dalam menurunkan temperatur operasi panel surya. Penurunan temperatur panel yang signifikan menunjukkan bahwa panas yang terakumulasi pada permukaan panel dapat dipindahkan secara efektif oleh TEC sehingga temperatur operasi panel menjadi lebih rendah dibandingkan sistem tanpa pendinginan. Menurut Riffat dan Ma [15], nilai COP merupakan parameter penting dalam evaluasi performa sistem termoelektrik karena menunjukkan perbandingan antara kemampuan perpindahan panas dan energi listrik yang dikonsumsi oleh sistem pendingin.

Hasil ini juga sejalan dengan analisis irradianse yang menunjukkan bahwa panel menerima irradianse rata-rata sebesar 453 W/m² dengan nilai maksimum mencapai 638 W/m² pada pukul 12.00 WIB. Pada kondisi tersebut, TEC tetap mampu menjaga temperatur panel pada tingkat yang lebih rendah sehingga berpotensi mengurangi rugi-rugi termal dan membantu mempertahankan performa panel surya selama pengujian berlangsung. Berdasarkan hasil analisis *Net Electrical Efficiency* dan COP, penggunaan TEC tidak hanya mampu menurunkan temperatur panel, tetapi juga tetap memberikan keuntungan terhadap performa sistem photovoltaic secara keseluruhan meskipun memerlukan tambahan konsumsi energi. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi yang digunakan untuk mengoperasikan TEC masih sebanding dengan peningkatan performa listrik yang diperoleh selama pengujian. Hal tersebut didukung oleh kemampuan TEC dalam mempertahankan temperatur operasi panel tetap rendah, menjaga kestabilan tegangan keluaran, serta menghasilkan nilai *Net Electrical Efficiency* yang tetap

tinggi setelah memperhitungkan konsumsi daya sistem pendingin.

Nilai *Coefficient of Performance* (COP) sebesar 6,14 menunjukkan bahwa sistem pendingin memiliki kemampuan yang baik dalam menghasilkan efek pendinginan dibandingkan energi listrik yang dikonsumsi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Bulat dkk. [18] yang menunjukkan bahwa penerapan sistem pendingin berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) mampu meningkatkan performa sistem photovoltaic-thermoelectric hybrid melalui pengendalian temperatur operasi. Selain itu, penelitian Yusop dkk. [19] juga menunjukkan bahwa optimasi sistem termoelektrik memberikan kontribusi terhadap peningkatan kinerja panel surya pada berbagai kondisi operasi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) tidak hanya efektif dalam menurunkan temperatur operasi panel surya, tetapi juga memiliki potensi untuk diterapkan pada sistem photovoltaic berkapasitas yang lebih besar, khususnya pada wilayah dengan intensitas radiasi matahari tinggi. Namun demikian, penerapan TEC pada skala yang lebih besar perlu mempertimbangkan konsumsi daya tambahan, biaya investasi, biaya operasional, serta sistem pelepasan panas yang digunakan agar peningkatan performa panel surya tetap sebanding dengan biaya yang dikeluarkan. Oleh karena itu, analisis kelayakan teknis dan ekonomi menjadi aspek penting yang perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya sebelum sistem ini diterapkan secara luas.

3.9. Keterbatasan penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil penelitian. Pengujian dilakukan menggunakan panel surya berkapasitas 50 Wp sehingga hasil yang diperoleh belum dapat secara langsung digeneralisasikan pada panel surya dengan kapasitas yang lebih besar. Selain itu, pengujian hanya dilakukan pada satu lokasi dengan kondisi cuaca yang mengikuti kondisi lingkungan saat pengambilan data, sehingga variasi karakteristik iklim, musim, maupun intensitas radiasi matahari pada lokasi yang berbeda belum dapat dievaluasi.

Penelitian ini juga menggunakan satu kali pencatatan data pada setiap interval waktu pengamatan, sehingga analisis statistik seperti standar deviasi, error bar, maupun uji signifikansi belum dapat dilakukan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan beberapa kali pengulangan eksperimen pada kondisi pengujian yang sama agar validitas hasil dapat diperkuat melalui analisis statistik yang lebih komprehensif.

Selain itu, penelitian ini difokuskan pada evaluasi performa sistem dalam jangka pendek sehingga belum mengkaji pengaruh penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) terhadap keandalan sistem, umur pakai panel surya, maupun konsumsi energi dalam pengoperasian jangka panjang. Penelitian selanjutnya diharapkan

dapat dilakukan pada berbagai kapasitas panel surya, kondisi lingkungan, serta periode pengujian yang lebih panjang sehingga efektivitas penggunaan TEC dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh (1) Penggunaan *Thermoelectric Cooler* (TEC) mampu menurunkan temperatur operasi panel surya secara signifikan dibandingkan panel surya konvensional tanpa pendinginan. Temperatur panel bagian atas berhasil diturunkan dari 45,57°C menjadi 27,71°C, sedangkan temperatur bagian bawah turun dari 43,57°C menjadi 29,86°C. (2) Sistem pendingin TEC mampu menjaga kestabilan temperatur operasi panel surya sehingga tegangan keluaran panel menjadi lebih stabil selama proses pengujian berlangsung. Meskipun penggunaan TEC memerlukan konsumsi daya tambahan rata-rata sebesar 2,57 W, hasil analisis menunjukkan bahwa energi yang digunakan masih sebanding dengan peningkatan performa sistem photovoltaic secara keseluruhan. (3) Nilai *Net Electrical Efficiency* sebesar 24,97% dan *Coefficient of Performance* (COP) sebesar 6,14 menunjukkan bahwa penggunaan TEC mampu memberikan efek pendinginan yang efektif dengan konsumsi energi yang masih sebanding terhadap peningkatan performa sistem photovoltaic.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan TEC berpotensi meningkatkan performa dan keandalan sistem *photovoltaic* melalui penurunan temperatur operasi serta kestabilan keluaran listrik. Kontribusi penelitian ini terletak pada evaluasi kinerja TEC yang tidak hanya didasarkan pada penurunan temperatur panel, tetapi juga melalui integrasi parameter *Net Electrical Efficiency* dan COP sehingga memberikan penilaian yang lebih komprehensif terhadap efektivitas sistem pendingin aktif. Penelitian selanjutnya disarankan mengoptimalkan konsumsi daya dan desain sistem pendingin, serta melakukan pengujian pada kapasitas panel, kondisi cuaca, dan periode operasi yang lebih beragam. Selain itu, analisis kelayakan ekonomi perlu dilakukan untuk memperoleh keseimbangan yang lebih baik antara peningkatan performa panel surya dan biaya implementasi sistem pendingin.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas Semarang yang telah memberikan dukungan selama proses penelitian berlangsung serta seluruh pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, May 2009, doi: 10.1016/j.solener.2008.10.008.
- [2] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, "Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [3] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S. P. Nehra, and M. S. Dhaka, "A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 104–109, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.004.
- [4] M. A. Hasan and K. Sumathy, "Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1845–1859, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.03.011.
- [5] D. Michael. Rowe, *Thermoelectrics and its energy harvesting*. CRC Press, 2012.
- [6] D. Singh, H. Chaubey, Y. Parvez, A. Monga, and S. Srivastava, "Performance improvement of solar PV module through hybrid cooling system with thermoelectric coolers and phase change material," *Solar Energy*, vol. 241, pp. 538–552, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.06.028.
- [7] K. Teffah and Y. Zhang, "Modeling and experimental research of hybrid PV-thermoelectric system for high concentrated solar energy conversion," *Solar Energy*, vol. 157, pp. 10–19, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.017.
- [8] P. A. Sesotyo, L. O. M. Idris, T. D. Cahyono, and E. Sadewa, "Performance Analysis of an Integrated PV/T–TEC System with a PID enabled DC–DC Boost Converter for Photovoltaic Thermal Management," *International Journal of Engineering Continuity*, vol. 4, no. 2, pp. 161–190, Dec. 2025, doi: 10.58291/ijec.v4i2.450.
- [9] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (Version 45)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2015, doi: 10.1002/pip.2573.
- [10] A. . Luque and Steven. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley, 2011.
- [11] S. Odeh and M. Behnia, "Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling," *Heat Transfer Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 499–505, May 2009, doi: 10.1080/01457630802529214.
- [12] A. J. . McEvoy, T. . Markvart, and Luis. Castañer, *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Academic Press, 2012.
- [13] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. El-Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams*

- Engineering Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.asej.2013.03.005.
- [14] A. Ibrahim, M. Y. Othman, M. H. Ruslan, S. Mat, and K. Sopian, “Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 352–365, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.024.
- [15] S. B. Riffat and X. Ma, “Thermoelectrics: a review of present and potential applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 913–935, Jun. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7.
- [16] J. Kaiprath and K. K. V. V., “A review on solar photovoltaic-powered thermoelectric coolers, performance enhancements, and recent advances,” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 31, no. 1, p. 6, Feb. 2023, doi: 10.1007/s44189-023-00022-y.
- [17] M. Faheem, M. Abu Bakr, M. Ali, M. A. Majeed, Z. M. Haider, and M. O. Khan, “Evaluation of Efficiency Enhancement in Photovoltaic Panels via Integrated Thermoelectric Cooling and Power Generation,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 11, p. 2590, May 2024, doi: 10.3390/en17112590.
- [18] S. Bulat, E. Büyükbicakci, and M. Erkovan, “Efficiency Enhancement in Photovoltaic–Thermoelectric Hybrid Systems through Cooling Strategies,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 2, p. 430, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020430.
- [19] A. M. Yusop, F. B. M. Tarmizi, N. A. Sulaiman, K. N. Khamil, R. Mohammed, and J. M. Sultan, “Cooling the future: Peltier thermoelectric solutions for photovoltaic panels,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 45, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/01430750.2024.2372361.
- [20] H. Al-Tahaineh, “A novel approach and exergy analysis for a concentrated photovoltaic system for thermoelectric absorption cooling,” *Clean Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 11–21, May 2025, doi: 10.1093/ce/zkaf002.