



PERANCANGAN PENGHASIL ENERGI LISTRIK DARI PANAS ATAP SENG BERWARNA HITAM MENGGUNAKAN TERMOELEKTRIK GENERATOR

Agung Alisyahbana^{1*}, Ayong Hiendro², Yandri³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura

¹d1021211070@student.untan.ac.id

ABSTRACT

This study aims to design and analyze a small-scale power generation system based on a Thermoelectric Generator (TEG) that utilizes heat from a black-colored zinc roof surface as a thermal energy source. The utilization of roof heat was selected due to the high solar radiation intensity in tropical regions such as Pontianak, which provides the potential to generate temperature differences that can be converted into electrical energy through the Seebeck effect. The designed system employs 10 SP1848 TEG modules connected in series to increase the output voltage. Experimental testing was conducted from 09:00 to 14:30 WIB under two conditions: without cooling and with cooling using ice attached to the heatsink on the cold side. The results show that under the non-cooling condition, the temperature difference (ΔT) ranged from 3-12 °C, producing a maximum voltage of 3.8 V and a maximum power output of 0.209 W. Meanwhile, under the cooling condition, ΔT increased to 13.9-19.7 °C, resulting in a maximum voltage of 6.69 V and a maximum power output of 0.889 W. The increase in temperature difference significantly affected the improvement of voltage and power output. The ΔT pattern followed the daily solar radiation characteristics, reaching its peak between 10:30 and 13:30 WIB. Based on these findings, the utilization of heat from a black zinc roof using a TEG system demonstrates potential as a small-scale alternative electrical energy source. The system performance is highly influenced by the effectiveness of cooling on the cold side to maintain an optimal temperature difference.

Keywords: Thermoelectric Generator (TEG), Seebeck effect, black zinc roof, solar thermal energy, renewable energy

Article History

Received: March 2026

Reviewed: March 2026

Published: April 2026

Plagiarism Checker No 235

Prefix DOI :

[10.8734/Kohesi.v1i2.365](https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365)

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem pembangkit listrik skala kecil berbasis Thermoelectric Generator (TEG) yang memanfaatkan panas dari permukaan atap seng berwarna hitam sebagai sumber energi termal. Pemanfaatan panas atap seng dipilih karena wilayah tropis seperti Pontianak memiliki intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun, sehingga berpotensi menghasilkan perbedaan suhu yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Sistem yang dirancang menggunakan 10 modul TEG tipe SP1848 yang disusun secara seri untuk meningkatkan tegangan keluaran. Pengujian dilakukan pada rentang waktu pukul 09.00-14.30 WIB dalam dua kondisi, yaitu tanpa pendingin dan dengan pendingin berupa es batu yang ditempelkan pada heatsink sisi dingin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa pendingin, perbedaan suhu (ΔT) yang dihasilkan berkisar antara 3-12 °C dengan tegangan maksimum sebesar 3,8 V dan daya tertinggi 0,209 W. Sedangkan pada kondisi dengan pendingin, ΔT meningkat menjadi 13,9-19,7 °C dengan tegangan maksimum mencapai 6,69 V dan daya tertinggi sebesar 0,889 W. Peningkatan perbedaan suhu secara signifikan berpengaruh terhadap kenaikan tegangan dan daya keluaran sistem. Pola perubahan ΔT mengikuti karakteristik radiasi matahari harian, di mana nilai maksimum terjadi pada rentang waktu 10.30-13.30 WIB. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan panas atap seng berwarna hitam menggunakan sistem TEG berpotensi sebagai sumber energi listrik alternatif skala kecil. Kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh efektivitas pendinginan pada sisi dingin modul untuk mempertahankan perbedaan suhu yang optimal.

Kata Kunci: Thermoelectric Generator (TEG), efek Seebeck, atap seng hitam, energi panas matahari, energi terbarukan.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan peningkatan taraf hidup masyarakat. Ketergantungan terhadap energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam masih sangat tinggi, padahal sumber daya tersebut bersifat terbatas dan berdampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengembangkan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan [1, 2].

Salah satu sumber energi terbarukan yang potensinya melimpah di Indonesia adalah energi panas matahari. Sebagai negara tropis yang dilalui garis khatulistiwa, intensitas radiasi matahari di Indonesia relatif tinggi sepanjang tahun [3]. Panas matahari tidak hanya dapat dimanfaatkan melalui panel surya (photovoltaic), tetapi juga dapat dimanfaatkan secara langsung melalui Thermoelectric Generator (TEG), yang bekerja berdasarkan prinsip efek Seebeck, yaitu menghasilkan tegangan listrik ketika terdapat perbedaan suhu antara dua sisi material semikonduktor [4].



Atap rumah, khususnya yang terbuat dari seng, merupakan salah satu elemen bangunan yang menyerap panas matahari dalam jumlah besar. Warna atap juga memengaruhi kemampuan penyerapan panas, di mana atap berwarna hitam menyerap lebih banyak radiasi matahari dibandingkan atap berwarna terang [5]. Panas yang terkumpul pada atap selama siang hari umumnya terbuang percuma ke lingkungan. Dengan memanfaatkan TEG yang dipasang pada atap seng, panas tersebut dapat diubah menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan ringan. Pada penelitian ini, energi listrik yang dihasilkan dari TEG difokuskan untuk dianalisis berdasarkan besarnya tegangan dan arus keluaran yang mampu dihasilkan. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar potensi sistem dalam menghasilkan energi listrik dari panas yang tersedia, sehingga dapat menjadi alternatif pemanfaatan energi terbarukan di masa mendatang.

Pemanfaatan panas atap seng berwarna untuk menghasilkan energi listrik melalui TEG memiliki beberapa keuntungan [6]. Sistem ini tidak memerlukan bagian bergerak sehingga minim perawatan, bekerja secara pasif tanpa bahan bakar tambahan, dan dapat dipasang pada bangunan yang sudah ada tanpa modifikasi besar. Selain itu, dengan melakukan variasi warna pada atap, dapat dilakukan analisis untuk mengetahui kombinasi warna dan desain pemasangan TEG yang paling optimal dalam menghasilkan energi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengujian sistem pembangkit listrik menggunakan *Thermoelectric Generator* (TEG) yang memanfaatkan panas atap seng berwarna hitam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara perbedaan suhu pada atap seng dengan keluaran listrik yang dihasilkan oleh TEG, sehingga dapat diketahui sejauh mana potensi pemanfaatan panas atap bangunan sebagai sumber energi listrik alternatif skala kecil.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Karakteristik Termal Atap Seng

Atap seng merupakan material logam yang umum digunakan pada bangunan di daerah tropis karena memiliki harga yang relatif murah, ringan, dan mudah dipasang. Namun secara termal, seng memiliki konduktivitas panas yang tinggi, sehingga mudah menyerap dan menghantarkan panas dari radiasi matahari ke seluruh permukaannya. Sifat ini menyebabkan suhu permukaan atap seng dapat meningkat secara signifikan pada siang hari, terutama pada kondisi cuaca cerah. Secara umum, konduktivitas termal (k) seng berkisar antara 112-120 W/m·K, dengan kapasitas kalor jenis (c_p) sekitar 388 J/kg·K dan emisivitas (ϵ) antara 0,2-0,6 tergantung kondisi permukaannya. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa seng mampu menghantarkan panas dengan cepat, namun pelepasan panasnya ke udara relatif lambat tanpa bantuan sirkulasi udara atau pendinginan tambahan. Warna permukaan seng juga sangat berpengaruh terhadap kemampuan menyerap panas matahari. Permukaan berwarna hitam memiliki nilai absorptivitas tinggi ($\alpha \approx 0,85-0,95$) dan reflektansi rendah ($\rho \approx 0,05-0,15$), sehingga sebagian besar radiasi matahari diserap dan mengakibatkan kenaikan temperatur yang tinggi. Sebaliknya, seng galvanis (warna abu-abu mengkilap) memiliki absorptivitas rendah ($\alpha \approx 0,25-0,35$) dan reflektansi tinggi ($\rho \approx 0,65-0,75$), sehingga suhu permukaannya cenderung lebih rendah karena sebagian besar energi matahari dipantulkan kembali ke udara [10]. Sifat termal berdasarkan jenisnya dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Tabel 2.1 Sifat Termal Jenis-Jenis Seng [6].

Jenis Atap Seng	Absorptivitas (α)	Reflektansi (ρ)	Emisivitas (ϵ)	Estimasi Suhu Permukaan pada Siang Hari ($^{\circ}\text{C}$)
Seng galvanis (mengkilap)	0,25-0,35	0,65-0,75	0,20-0,35	40-45
Seng abu-abu	0,50-0,60	0,40-0,50	0,35-0,45	50-55
Seng hitam	0,85-0,95	0,05-0,15	0,60-0,80	60-70

Dari Tabel 2.1 dapat disimpulkan bahwa seng berwarna hitam memiliki kemampuan penyerapan panas tertinggi di antara jenis lainnya. Hal ini menjadikannya pilihan yang sangat potensial untuk diaplikasikan pada sistem Termoelectric Generator, karena semakin besar perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG, maka semakin besar pula tegangan listrik yang dihasilkan berdasarkan efek *Seebeck*. Oleh karena itu, pemilihan seng berwarna hitam dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik termalnya yang mampu meningkatkan kinerja TEG melalui peningkatan perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin, sehingga konversi energi dari panas ke listrik dapat berlangsung lebih optimal.

2.3 Energi Matahari

Energi matahari atau energi surya adalah energi yang diperoleh secara langsung dari cahaya matahari. Energi ini hadir dalam bentuk panas dan cahaya. Energi surya dapat dimanfaatkan baik secara langsung maupun melalui proses konversi energi. Pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi alternatif untuk pembangkit listrik merupakan inovasi yang luar biasa. Selain karena matahari adalah sumber energi yang sangat melimpah, penggunaan energi matahari tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan [11]. Alat yang digunakan untuk ini disebut sel surya, yaitu perangkat semikonduktor yang dapat menghantarkan aliran listrik dan menyerap energi panas matahari untuk menghasilkan listrik. Pengelolaan sumber daya energi yang tepat diharapkan dapat memberikan kesejahteraan bagi masyarakat secara umum.

2.4 Termoelectric Generator (TEG)

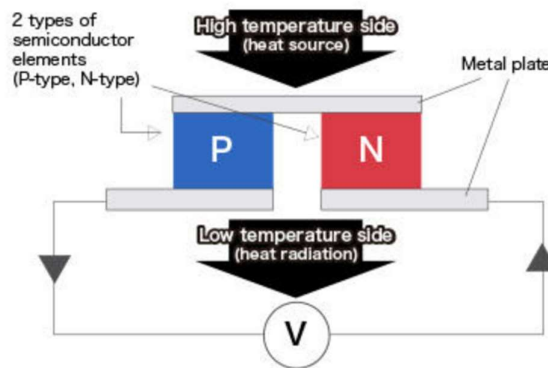
Termoelectric generator (TEG) merupakan teknologi pembangkit listrik dengan menggunakan energi panas (kalor). TEG memanfaatkan perbedaan suhu yang terjadi di lingkungan menjadi energi listrik. TEG menggunakan sebuah elemen yang disebut peltier. Termoelektrik terbuat dari solid state material (material zat padat) yang dapat mengkonversi energi dari perbedaan temperatur ke beda potensial (efek *Seebeck*), atau dari arus listrik menjadi perbedaan di lingkungan (efek Peltier) [12]. Modul TEG ada berbagai jenis salah satunya SP1848 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Modul Termoelektrik



Modul SP1848-27145 seperti yang di tunjukan Gambar 2.1 merupakan salah satu (TEG) yang dirancang khusus untuk menghasilkan listrik dari perbedaan suhu antara dua sisi modul. Modul ini bekerja berdasarkan efek *Seebeck*, di mana aliran elektron yang terjadi akibat gradien suhu menghasilkan tegangan listrik ketika sisi panas dan sisi dingin memiliki perbedaan suhu. Umumnya bahan semikonduktor yang digunakan pada susunan TEG adalah Bismuth dan Telluride. Perbedaan suhu pada dua komponen Bismuth dan Telluride, menyebabkan perpindahan elektron dari kutub negatif ke kutub positif, semakin besar perbedaan suhu, maka semakin cepat perpindahan elektron, sehingga arus yang dihasilkan, akan semakin besar. Dapat dilihat pada Gambar 2.2 prinsip kerja TEG.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja TEG

Gambar 2.2 adalah prinsip kerja generator termoelektrik dimana terdiri dari satu sisi panas (T_h) dan satu sisi dingin (T_c). Perbedaan suhu antara kedua sisi tersebut dinyatakan sebagai ΔT , yang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.1) berikut:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.1)$$

Dimana T_h adalah sisi panas; T_c adalah sisi dingin; dan ΔT adalah perbedaan suhunya. Adanya perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin inilah yang menjadi dasar terjadinya efek *Seebeck*. Pada sisi panas dengan suhu lebih tinggi, elektron pada material semikonduktor tipe-n (kelebihan elektron) akan bergerak menuju sisi dingin yang bersuhu lebih rendah dan masuk ke material semikonduktor tipe-p (kekurangan elektron) melalui sambungan logam (*metal connection*). Pergerakan muatan listrik tersebut menyebabkan timbulnya arus listrik pada rangkaian eksternal.

Besarnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh modul TEG sebanding dengan perbedaan suhu yang terjadi dan dinyatakan melalui koefisien *Seebeck*, yang dapat dihitung dengan persamaan (2.2) sebagai berikut:

$$S = \frac{V}{\Delta T} \quad (2.2)$$

Dimana, S adalah koefisien *seebeck* (V/K); V adalah tegangan yang dihasilkan; dan ΔT adalah perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin.

Dalam perhitungan koefisien *Seebeck* satuan perbedaan suhu yang digunakan secara baku adalah Kelvin (K) karena Kelvin merupakan satuan suhu absolut dalam Sistem Internasional (SI). Namun, dalam praktik eksperimen, suhu yang diukur oleh termometer digital atau

termokopel umumnya dinyatakan dalam derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Hubungan antara kedua satuan suhu tersebut dinyatakan dengan persamaan $T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$ meskipun demikian, ketika digunakan untuk menghitung perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG, hasilnya tidak berubah meskipun menggunakan Kelvin atau derajat Celsius, karena konstanta 273,15 saling menghilangkan dalam proses pengurangan. Sebagai contoh $\Delta T = T_h - T_c$ jika $T_h = 80^{\circ}\text{C}$ dan $T_c = 30^{\circ}\text{C}$, maka $\Delta T = 80 - 30 = 50^{\circ}\text{C}$. Sedangkan jika di konversi ke kelvin, $T_h = 353,15\text{K}$ dan $T_c = 303,15\text{K}$, maka $\Delta T = 353,15 - 303,15 = 50\text{K}$, hasilnya sama, yaitu $\Delta T = 50$. Oleh karena itu, pada perhitungan koefisien *Seebeck* penggunaan satuan Kelvin (K) atau derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$) untuk selisih suhu tidak memengaruhi nilai hasil, asalkan konsisten. Namun, dalam penulisan ilmiah dan perhitungan teoritis, satuan Kelvin (K) tetap digunakan untuk menjaga kesesuaian dengan standar internasional dan untuk membedakan antara nilai suhu absolut dan perbedaan suhu (ΔT) yang menjadi dasar perhitungan.

Untuk melakukan perhitungan dan analisis kinerja modul Thermoelectric Generator (TEG), diperlukan data karakteristik keluaran berupa tegangan dan arus pada berbagai kondisi perbedaan suhu (ΔT). Data tersebut digunakan sebagai acuan untuk mengetahui hubungan antara perbedaan suhu yang bekerja pada modul TEG dengan keluaran listrik yang dihasilkan. Oleh karena itu, karakteristik keluaran modul TEG berdasarkan variasi perbedaan suhu disajikan dalam bentuk Tabel 2.2.

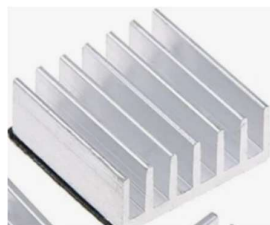
Tabel 2.2 Spesifikasi TEG

Perbedaan Suhu (ΔT)($^{\circ}\text{C}$)	Tegangan Sirkuit Terbuka (V)	Arus Keluaran (mA)
20	0,97	225
40	1,80	368
60	2,40	469
80	3,60	558
100	4,80	669

Berdasarkan Tabel 2.2 terlihat bahwa peningkatan perbedaan suhu (ΔT) pada modul TEG menyebabkan kenaikan tegangan dan arus keluaran. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja modul TEG sangat dipengaruhi oleh besarnya perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin, sesuai dengan prinsip efek *Seebeck*, di mana tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan perbedaan suhu yang terjadi.

2.5 Heatsink

Heatsink merupakan komponen pasif yang berfungsi sebagai media pembuang panas dengan cara menyerap energi panas dari sumbernya melalui mekanisme konduksi, kemudian melepaskannya ke lingkungan sekitar melalui proses konveksi dan sebagian kecil radiasi, di mana material yang umum digunakan adalah aluminium atau tembaga karena memiliki konduktivitas termal tinggi, serta bentuknya umumnya didesain dengan sirip-sirip untuk memperbesar luas permukaan sehingga laju pelepasan panas semakin optimal. *Heatsink* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Heatsink

Dalam aplikasi TEG *Heatsink* berperan penting pada sisi dingin modul untuk menjaga perbedaan temperatur (ΔT) tetap besar sehingga kinerja dan efisiensi konversi energi listrik dapat meningkat secara signifikan.

2.6 Perhitungan Daya

Perhitungan daya listrik digunakan untuk mengetahui besarnya daya keluaran yang dihasilkan oleh sistem Thermoelectric Generator. Daya listrik merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus keluaran sistem, yang dinyatakan pada persamaan (2.3) berikut [6]:

$$P = V \times I \quad (2.3)$$

Dimana P = daya listrik (watt); V = tegangan keluaran total (volt); I = arus keluaran total (ampere).

Pada penelitian ini, modul TEG disusun menggunakan konfigurasi seri penuh, sehingga tegangan total sistem merupakan hasil penjumlahan tegangan dari masing-masing modul TEG. Tegangan total rangkaian seri dapat dihitung menggunakan persamaan (2.4) berikut:

$$V_{total} = n \times V_{modul} \quad (2.4)$$

dimana n = jumlah modul

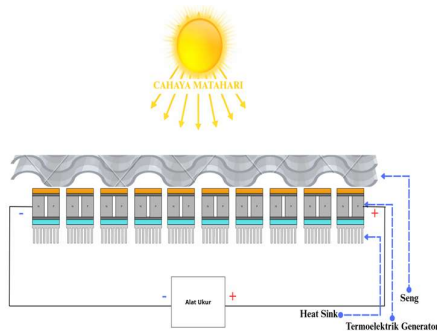
Sedangkan arus keluaran pada rangkaian seri diasumsikan sama dengan arus yang dihasilkan oleh satu modul TEG, sehingga arus total sistem dapat dinyatakan dengan persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$I_{total} = I_{modul} \quad (2.5)$$

Nilai tegangan dan arus yang diperoleh dari hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menghitung daya keluaran sistem TEG berdasarkan Persamaan (2.3). Perhitungan ini dilakukan untuk setiap kondisi pengujian guna mengetahui pengaruh perbedaan suhu dan penggunaan pendingin terhadap daya listrik yang dihasilkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dirancang suatu sistem pembangkit listrik skala kecil berbasis TEG yang memanfaatkan panas dari permukaan atap seng berwarna hitam sebagai sumber energi termal. Sistem ini bekerja berdasarkan prinsip **efek Seebeck**, yaitu munculnya tegangan listrik akibat adanya perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik. Gambaran sistem yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.1.



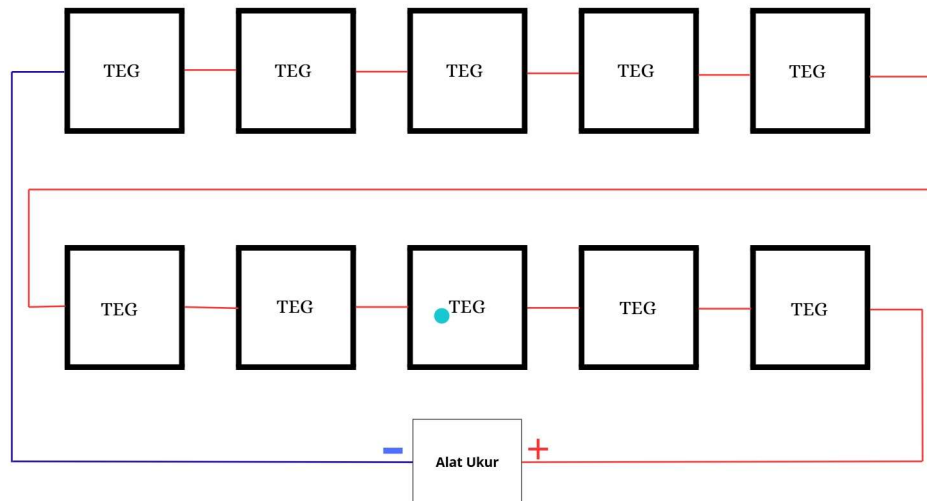
(a)



(b)

Gambar 4.1 (a) Rangkaian 10 TEG Secara Seri, (b) Tampak Samping Dari Perangkat.

Sistem pembangkit listrik yang dirancang ini menggunakan pendekatan off-grid berbasis termoelektrik, yang bekerja dengan memanfaatkan panas dari atap seng sebagai sumber energi. Pada sistem TEG ini digunakan konfigurasi 10 modul secara seri, yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Rangkaian 10 Seri TEG

Pemilihan konfigurasi seri penuh bertujuan untuk meningkatkan tegangan keluaran sistem, mengingat perbedaan suhu (ΔT) yang terjadi pada pemanfaatan panas atap seng relatif kecil. Dengan menyusun modul secara seri, tegangan dari masing-masing modul dapat dijumlahkan sehingga diperoleh tegangan total yang lebih besar dan dapat diukur secara stabil. Konfigurasi 10 seri ini dipilih karena lebih sesuai dengan karakteristik sistem termoelektrik berbasis panas lingkungan, di mana peningkatan tegangan menjadi prioritas utama dibandingkan peningkatan arus. Oleh karena itu, penggunaan rangkaian seri penuh diharapkan dapat menghasilkan performa sistem yang optimal sesuai dengan kondisi pengujian dan perhitungan yang telah disesuaikan sebelumnya.

4.2 Sistem TEG Tanpa Pendingin

Hasil pengujian tanpa pendingin menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa pendingin, peningkatan suhu pada sisi panas modul TEG tidak diikuti oleh peningkatan tegangan keluaran yang signifikan. Hal ini dipengaruhi oleh meningkatnya suhu sisi dingin dari TEG mengikuti suhu sisi panas, sehingga perbedaan suhu (ΔT) yang dihasilkan sangat rendah. Hasil pengukuran tanpa pendingin ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tanpa Pendingin

Jam	Suhu Sisi Panas(°C)	Suhu Sisi Dingin(°C)	ΔT (°C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
09.00	48	45	3	0,945	0,011	0,010
09.10	47	43	4	1,25	0,018	0,023
09.20	46	42	4	1,26	0,017	0,021
09.30	46	40	6	1,89	0,025	0,047



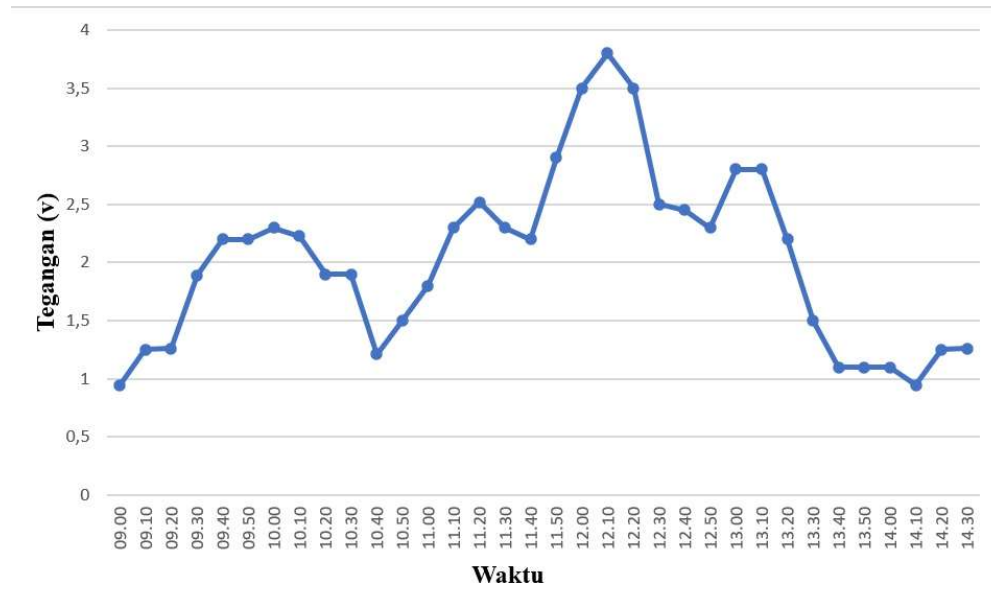
09.40	47	40	7	2,2	0,031	0,068
09.50	48	41	7	2,2	0,031	0,068
10.00	49	42	7	2,3	0,032	0,074
10.10	48	41	7	2,225	0,032	0,071
10.20	50	44	6	1,9	0,025	0,048
10.30	51	45	6	1,9	0,026	0,049
10.40	51	47	4	1,21	0,018	0,022
10.50	53	48	5	1,5	0,023	0,035
11.00	51	45	6	1,8	0,027	0,049
11.10	50	43	7	2,3	0,031	0,071
11.20	52	44	8	2,52	0,036	0,091
11.30	50	43	7	2,3	0,031	0,071
11.40	49	42	7	2,2	0,032	0,070
11.50	49	40	9	2,9	0,041	0,119
12.00	52	41	11	3,5	0,05	0,175
12.10	55	43	12	3,8	0,055	0,209
12.20	56	45	11	3,5	0,05	0,175
12.30	55	47	8	2,5	0,035	0,088
12.40	54	46	8	2,45	0,035	0,086
12.50	52	45	7	2,3	0,032	0,074
13.00	51	45	6	2,8	0,027	0,076
13.10	50	44	6	2,8	0,027	0,076
13.20	50	43	7	2,2	0,031	0,068
13.30	48	43	5	1,5	0,022	0,033
13.40	47	43	4	1,1	0,018	0,020
13.50	45	41	4	1,1	0,018	0,020
14.00	44	40	4	1,1	0,018	0,020
14.10	48	45	3	0,945	0,011	0,010
14.20	47	43	4	1,25	0,018	0,023
14.30	46	42	4	1,26	0,017	0,021

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG pada kondisi tanpa pendingin relatif kecil, yaitu berkisar antara 3 hingga 12 °C. Kondisi ini terjadi karena panas pada sisi dingin tidak dapat dilepaskan secara efektif ke



lingkungan, sehingga suhu sisi dingin cenderung meningkat seiring kenaikan suhu sisi panas. Akibatnya, tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan oleh sistem TEG menjadi rendah dan tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan, tegangan tertinggi hanya 3,8 volt, meskipun suhu atap seng sebagai sumber panas mengalami kenaikan.

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.1, hubungan antara waktu pengukuran dan tegangan keluaran sistem TEG disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 untuk mempermudah analisis perubahan tegangan yang dihasilkan pada rentang waktu percobaan yang dilakukan.



Gambar 4.3 Grafik Tegangan Sistem Tanpa Pendingin

Berdasarkan grafik hubungan antara waktu dan tegangan keluaran sistem *Thermoelectric Generator* (TEG) tanpa pendingin, terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan mengalami perubahan selama proses pengujian. Pada awal pengukuran sekitar pukul 09.00, tegangan yang dihasilkan masih relatif rendah yaitu sekitar 0,9 V. Seiring berjalannya waktu, tegangan mulai mengalami peningkatan hingga mencapai kisaran 2,2-2,3 V pada rentang waktu 09.40-10.00. Setelah itu, tegangan mengalami fluktuasi dengan beberapa kali penurunan dan kenaikan. Penurunan tegangan terlihat sekitar pukul 10.40 hingga mencapai sekitar 1,2 V, kemudian kembali meningkat secara bertahap. Tegangan maksimum pada grafik terjadi sekitar pukul 12.10-12.20, dengan nilai tegangan tertinggi sekitar 3,8 V. Setelah mencapai nilai maksimum tersebut, tegangan kembali mengalami penurunan secara bertahap hingga sekitar 1,0-1,2 V pada rentang waktu 13.40-14.10. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin pada modul TEG, sehingga kemampuan modul dalam menghasilkan tegangan juga menurun.

4.3 Sistem TEG Dengan Pendingin

Pengujian dengan pendingin menunjukkan bahwa perbedaan suhu (ΔT) dan tegangan keluaran sistem TEG meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa pendingin, karena suhu sisi dingin dapat dipertahankan lebih rendah. Pada percobaan ini, sistem pendingin yang digunakan berupa es batu yang ditempelkan pada sirip-sirip *Heatsink* di sisi dingin modul TEG, sehingga proses pelepasan panas ke lingkungan menjadi lebih efektif. Hasil pengukuran dengan pendingin selanjutnya disajikan pada Tabel 4.2.



Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Dengan Pendingin

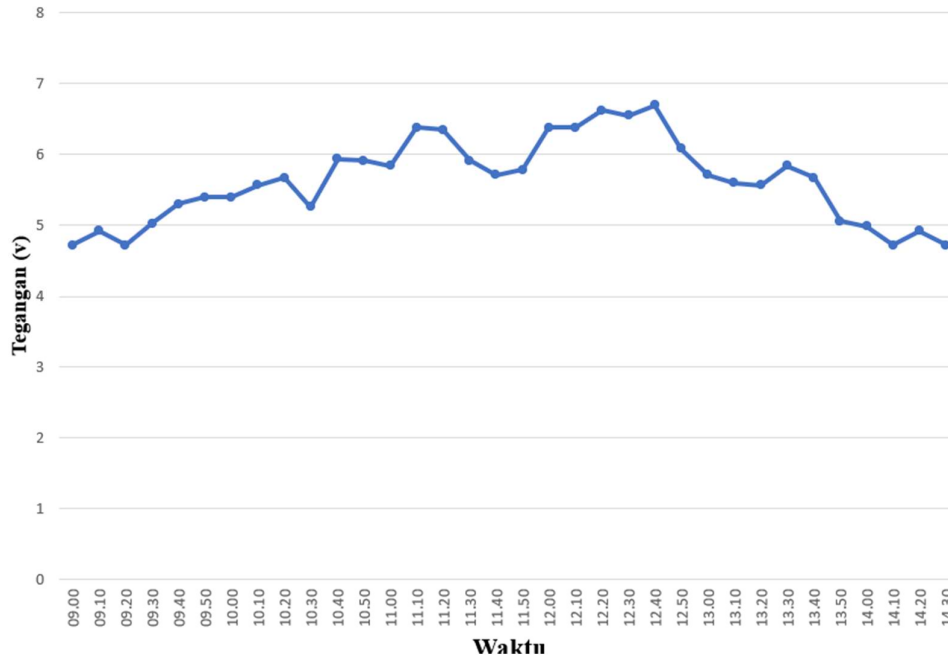
Jam	Suhu Sisi Panas(°C)	Suhu Sisi Dingin(°C)	ΔT (°C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
09.00	38,4	24,5	13,9	4,72	0,0047	0,022
09.10	39,1	24,6	14,5	4,92	0,0045	0,022
09.20	38,4	24,5	13,9	4,72	0,0046	0,022
09.30	40,1	25,3	14,8	5,03	0,0043	0,022
09.40	45,9	30,3	15,6	5,30	0,0045	0,024
09.50	41	25,1	15,9	5,40	0,0044	0,024
10.00	41,3	25,4	15,9	5,40	0,0048	0,026
10.10	44,1	27,7	16,4	5,57	0,0049	0,027
10.20	42,5	25,8	16,7	5,67	0,0047	0,027
10.30	41,7	26,2	15,5	5,26	0,0048	0,025
10.40	44,9	27,4	17,5	5,94	0,0049	0,029
10.50	46	28,6	17,4	5,91	0,0051	0,030
11.00	49	31,8	17,2	5,84	0,0052	0,030
11.10	49,4	30,6	18,8	6,38	0,0052	0,033
11.20	44,8	26,1	18,7	6,35	0,0053	0,034
11.30	45,4	28	17,4	5,91	0,0052	0,031
11.40	45,6	28,8	16,8	5,71	0,0052	0,030
11.50	49,8	32,8	17	5,78	0,0049	0,028
12.00	50	31,2	18,8	6,38	0,0048	0,031
12.10	49,4	30,6	18,8	6,38	0,0047	0,030
12.20	49,1	29,6	19,5	6,62	0,0049	0,032
12.30	48,3	29	19,3	6,55	0,0046	0,030
12.40	47,2	27,5	19,7	6,69	0,0047	0,031
12.50	47,1	29,2	17,9	6,08	0,0047	0,029
13.00	48,9	32,1	16,8	5,71	0,0046	0,026
13.10	50	33,5	16,5	5,60	0,0046	0,026
13.20	44,3	27,9	16,4	5,57	0,0046	0,026
13.30	43,9	26,7	17,2	5,84	0,0045	0,026
13.40	42,3	25,6	16,7	5,67	0,0046	0,026
13.50	40,4	25,5	14,9	5,06	0,0046	0,023



Jam	Suhu Sisi Panas(°C)	Suhu Sisi Dingin(°C)	ΔT (°C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
14.00	39,6	24,9	14,7	4,99	0,0046	0,023
14.10	38,4	24,5	13,9	4,72	0,0045	0,021
14.20	39,1	24,6	14,5	4,92	0,0045	0,022
14.30	38,4	24,5	13,9	4,72	0,0044	0,021

Berdasarkan data pada Tabel 4.2 pengujian dengan pendingin, terlihat bahwa penggunaan sistem pendinginan mampu meningkatkan perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG hingga berada pada kisaran 13,9-19,7 °C. Peningkatan perbedaan suhu tersebut berdampak langsung terhadap kenaikan tegangan keluaran sistem, yang tercatat berada pada rentang 4,72-6,69 V. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan yang efektif pada sisi dingin, dalam penelitian ini menggunakan es batu yang ditempelkan pada sirip-sirip *Heatsink*, berperan penting dalam menjaga suhu sisi dingin tetap rendah sehingga memperbesar ΔT dan meningkatkan kinerja konversi energi panas menjadi energi listrik sesuai dengan prinsip efek *Seebeck*.

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.2, hubungan antara waktu pengukuran dan tegangan keluaran sistem TEG disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 untuk mempermudah analisis perubahan tegangan yang dihasilkan pada rentang waktu percobaan yang dilakukan.



Gambar 4.4 Grafik Tegangan Sistem Dengan Pendingin

Berdasarkan grafik hubungan antara waktu dan tegangan keluaran sistem *Thermoelectric Generator* (TEG) dengan menggunakan pendingin, terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan relatif lebih stabil dan berada pada nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi tanpa pendingin. Pada awal pengukuran sekitar pukul 09.00, tegangan yang dihasilkan berada pada kisaran 4,7 V. Seiring bertambahnya waktu, tegangan mengalami peningkatan secara bertahap



hingga mencapai kisaran 5,5-6,0 V pada rentang waktu 10.30-11.00. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sistem pendingin mampu menjaga perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG sehingga proses konversi energi panas menjadi energi listrik dapat berlangsung lebih efektif. Tegangan maksimum pada grafik terjadi sekitar pukul 12.30-12.40, dengan nilai tegangan mencapai sekitar 6,7 V. Nilai ini menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin berada pada kondisi optimal sehingga menghasilkan tegangan yang lebih besar. Setelah mencapai nilai maksimum, tegangan mulai mengalami penurunan secara bertahap hingga berada pada kisaran 4,7-5,0 V pada rentang waktu 14.00-14.30. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya perbedaan suhu antara kedua sisi modul TEG atau menurunnya efektivitas sistem pendinginan selama proses pengujian.

Secara umum, grafik menunjukkan bahwa penggunaan sistem pendingin mampu meningkatkan dan menstabilkan tegangan keluaran TEG. Hal ini terjadi karena pendingin dapat mempertahankan perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG, sehingga efek Seebeck dapat bekerja lebih optimal dalam menghasilkan energi listrik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis sistem Thermoelectric Generator (TEG) yang memanfaatkan panas permukaan atap seng berwarna hitam, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem TEG berbasis panas atap seng dapat direalisasikan dan bekerja sesuai prinsip efek *Seebeck*. Panas matahari yang diserap oleh seng berhasil menimbulkan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG, sehingga menghasilkan tegangan listrik pada terminal keluaran rangkaian.
2. Perbedaan suhu (ΔT) sangat dipengaruhi oleh kondisi pendinginan pada sisi dingin modul. Pada pengujian tanpa pendingin, ΔT terbentuk secara alami melalui pelepasan panas oleh *Heatsink* ke lingkungan. Namun, pada pengujian dengan pendingin berupa es batu yang ditempelkan pada *Heatsink*, ΔT yang dihasilkan lebih besar dan lebih stabil karena suhu sisi dingin dapat dipertahankan lebih rendah.
3. Pola perubahan ΔT mengikuti karakteristik radiasi matahari harian. Nilai ΔT meningkat dari pagi hari hingga mencapai nilai maksimum pada rentang waktu sekitar pukul 10.30-13.30 WIB, kemudian menurun secara bertahap pada siang menuju sore hari. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja sistem TEG sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari yang diterima permukaan seng.
4. Konfigurasi 10 modul TEG seri (10S) efektif dalam meningkatkan tegangan keluaran sistem. Penyusunan seri memungkinkan tegangan dari masing-masing modul dijumlahkan sehingga diperoleh tegangan total yang lebih besar dibanding satu modul tunggal, meskipun arus sistem tetap terbatas oleh karakteristik modul.
5. Penggunaan pendingin meningkatkan performa listrik sistem TEG. Dengan ΔT yang lebih besar pada kondisi pendingin, tegangan keluaran sistem juga mengalami peningkatan dibandingkan kondisi tanpa pendingin. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi sisi dingin merupakan faktor penting dalam peningkatan kinerja sistem termoelektrik berbasis panas matahari.
6. Sistem TEG atap seng berpotensi sebagai sumber energi listrik skala kecil berbasis panas lingkungan. Meskipun daya yang dihasilkan relatif kecil, sistem ini menunjukkan potensi pemanfaatan panas terbuang dari bangunan sebagai energi alternatif ramah lingkungan, khususnya di wilayah beriklim tropis seperti Pontianak yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Haryanto, "Energi Terbarukan Front Page Upload repository 2021," dalam *Energi Terbarukan*, 2017.
- [2] M. Azhar dan D. Adam Satriawan, "Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional," *Online Administrative Law & Governance Journal*, vol. 1, 2018.
- [3] T. Alamsyah, A. Hiendro, dan Z. Abidin, "Analisis Potensi Energi Matahari Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Panel Mono-Crystalline dan Poly-Crystalline Di Kota Pontianak dan Sekitarnya," *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, vol. 9, no. 2, 2021.
- [4] L. A. M. Sijabat dan A. Mostavan, "Pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia: tantangan ekonomi, kebijakan, dan teknologi terhadap pengembangan dan penerapannya," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 753, no. 1, 2021.
- [5] N. Nazaruddin, T. Zulfadli, dan A. Mulkan, "Studi Kemampuan Penyerapan Panas pada Atap Rumah Seng Berwarna Terhadap Intensitas Matahari dalam Mengatasi Global Warming," *International Journal of Natural Science and Engineering*, vol. 4, no. 3, hlm. 114-121, 2020.
- [6] A. Elsa Putra dan A. Fikri, "Pemanfaatan Panas Buang Atap Seng dengan Menggunakan Generator Termoelektrik sebagai Sumber Energi Listrik Terbarukan," *Seminar Nasional TEKNOKA*, vol. 3, 2018.
- [7] N. Tambun, D. Mustika, dan N. A. Lubis, "Rancang Alat Konverter Energi Panas Menjadi Energi Listrik dengan Menggunakan Thermoelektrik Sederhana," *J. Riset Inovasi Pembelajaran Fisika*, vol. 6, no. 1, 2023.
- [8] J. G. A. Salam, M. Kuncara, dan E. V. Nugraha, "Pengaruh Suhu Terhadap Kinerja Peltier Pada Pembangkit Listrik Tenaga Termoelektrik," *J. Fakultas Teknik Unisa Kuningan*, vol. 6, no. 3, hlm. 2746-220, 2025.
- [9] M. Diki, C. F. Hadi, R. F. Lestari, dan R. Nalandari, "Pemanfaatan Termoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 4, no. 1, 2022.
- [10] A. Syuhada dan S. Suhaeri, "KAJIAN TINGKAT KEMAMPUAN PENYERAPANG PANAS MATAHARI PADA ATAP BANGUNAN SENG BERWARNA," *Prosiding pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin IX*, 2010.
- [11] S. Manan, "Energi Matahari, Sumber Energi Alternatif yang Effisien, Handal dan Ramah Lingkungan di Indonesia," *J. Gema teknologi*, 2009.
- [12] I. Bizzy, *Modul Termoelektrik-Teori dan Aplikasi*. Palembang: Noer Fikri Offset, 2022.