

ANALISIS POTENSI THERMOELECTRIC GENERATOR PADA ATAP METAL

ANALYSIS OF THERMOELECTRIC GENERATOR POTENTIAL ON METAL ROOFS

**Muhammad Ramdhani¹⁾, Muhammad Iskandar¹⁾, Yuan Perdana¹⁾,
Muhammad Firdaus Jauhari¹⁾, Ikna Urwatul Wusko¹⁾**

¹Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin, Indonesia

email: mramdhani023@gmail.com*, muhammadiskandar971@gmail.com, yuan.perdana11@poliban.ac.id,
firdaus.jauhari@poliban.ac.id, ikna.uw@poliban.ac.id

Received:
29 Agustus
2024

Accepted:
01 Agustus
2025

Published:
01 Agustus
2025

Abstract

This study aims to determine the potential voltage generated by Thermoelectric Generator (TEG) on a metal roof, understand the effect of cooling media on maintaining temperature, and investigate the relationship between temperature, voltage, and sunlight intensity. An experimental method was used, six TEGs were installed in series for each cooling condition. Measurement of voltage, temperature, and sunlight intensity using sensors connected to ESP32, the data is sent in real-time to Google Sheets. The results showed that the water block produced the highest average voltage (0.67 V), the heat sink (0.42 V), and no cooling (0.19 V). Water block increased the TEG voltage up to 1.84 V, heat sink 0.42 V, and no cooling 0.19 V. Statistical analysis confirmed a strong positive correlation between temperature difference (ΔT) and voltage ($r = 0.898$, $p < 0.001$) emphasising the importance of maintaining a stable temperature gradient for TEG performance. The findings suggest TEG has potential as an alternative energy source, opening up opportunities for further development of renewable energy technologies, particularly in the utilisation of wasted heat on metal roofs.

Keywords: Thermoelectric Generator, Seebeck Effect, Renewable Energy, ESP32, Metal Roof

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengetahui potensi tegangan listrik yang dihasilkan Thermoelectric Generator (TEG) pada atap metal, memahami pengaruh media pendingin dalam menjaga suhu, dan menyelidiki hubungan antara suhu, tegangan, dan intensitas sinar matahari. Metode eksperimental digunakan, enam TEG dipasang secara seri tiap kondisi pendinginan. Pengukuran tegangan, suhu, dan intensitas cahaya matahari menggunakan sensor yang terhubung ke ESP32, data dikirim secara *real-time* ke Google Sheets. Hasil menunjukkan *water block* menghasilkan tegangan rata-rata tertinggi (0,67 V), *heat sink* (0,42 V), dan tanpa pendingin (0,19 V). *Water block* meningkatkan tegangan TEG hingga 1,84 V, *heat sink* 0,42 V, dan tanpa pendingin 0,19 V. Analisis statistik mengonfirmasi korelasi positif yang kuat antara perbedaan suhu (ΔT) dan tegangan ($r = 0,898$, $p < 0,001$) menekankan pentingnya menjaga gradien suhu yang stabil untuk kinerja TEG. Temuan menunjukkan TEG berpotensi sebagai sumber energi alternatif, membuka peluang pengembangan teknologi energi terbarukan lebih lanjut, khususnya dalam pemanfaatan panas terbuang pada atap metal.

Kata Kunci: Thermoelectric Generator, Efek Seebeck, Energi Terbarukan, ESP32, Atap Metal

DOI: 10.20527/jtam_rotary.v7i2.13339

How to cite: Ramdhani, M., Iskandar, M., Perdana, Y., Jauhari, M. F., & Wusko, I. U., "Analisis Potensi Thermoelectric Generator Pada Atap Metal". JTAM ROTARY, 7(2), 179-192, 2025.

PENDAHULUAN

Energi terbarukan telah menjadi fokus utama dalam upaya global untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil dan mendorong pembangunan berkelanjutan (Kayode Olajiga dkk., 2024). Listrik, sebagai kebutuhan mendasar, memainkan peran penting di berbagai sektor industri, termasuk transportasi, pendidikan, dan rumah tangga. Namun, sebagian besar produksi listrik saat ini masih bergantung pada pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara (Sabubu, 2020).

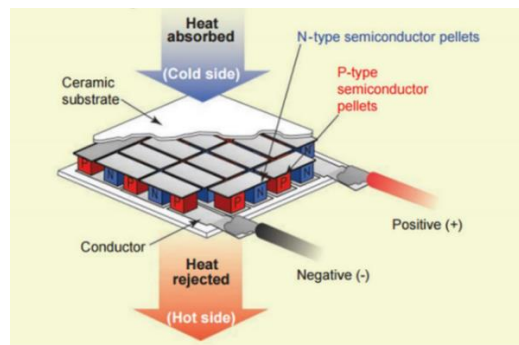
Ketergantungan pada bahan bakar fosil ini menimbulkan risiko terhadap keberlanjutan sumber daya dan berdampak negatif pada lingkungan, terutama dalam konteks pemanasan global. Oleh karena itu, eksplorasi sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan menjadi sangat penting (Indriyani Rachman, 2023), sejalan dengan fokus pada *Sustainable Development Goals* (SDG) yang menetapkan target pembangunan berkelanjutan.

Indonesia, berkat posisi geografisnya yang melintasi garis khatulistiwa, memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi surya. Data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menunjukkan bahwa pada tahun 2026, potensi energi surya di Indonesia diperkirakan mencapai $4,8 \text{ kWh/m}^2$, setara dengan 112.000 GWp (Giga watt peak) (Diawan dkk., 2018). Menurut data NASA untuk wilayah Banjarmasin, rata-rata jumlah sinar matahari tahunan adalah $4,43 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, dengan nilai tertinggi $5,62 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ pada bulan Agustus dan nilai terendah $3,26 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ pada bulan Januari (Yuan Perdana dkk., 2018).

Salah satu teknologi yang menjanjikan dalam memanfaatkan energi surya adalah *Thermoelectric Generator* (TEG). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi TEG pada atap metal dengan fokus pada peran media pendingin dalam menjaga suhu. Dua jenis media pendingin yang akan diteliti adalah *water block* dan *heat sink*. Variabel yang akan diukur meliputi suhu, tegangan, dan intensitas cahaya, menggunakan komponen mikrokontroler ESP32, sensor DHT 22, modul ADC (ADS1115), dan sensor BH1750. Data yang dihasilkan akan dikirimkan secara *real-time* ke *Google Sheets* untuk pemantauan dan analisis yang efektif.

Thermoelectric Generator (TEG)

Thermoelectric Generator (TEG) adalah teknologi yang menjanjikan dalam memanfaatkan energi surya. TEG beroperasi berdasarkan prinsip efek Seebeck, yang mengkonversi perbedaan suhu menjadi energi listrik (Rafsanjani dalam Murtadho & Firdaus, 2023).



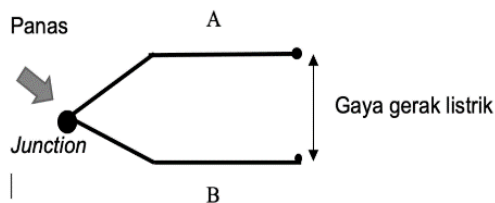
Gambar 1. Struktur Modul TEG

Struktur dasar TEG terdiri dari berbagai pasangan elemen termoelektrik tipe-n dan tipe-p yang disusun secara seri dan paralel secara elektrik. Efektivitas TEG sangat

bergantung pada perbedaan suhu yang dapat dipertahankan antara sisi dingin dan panas. Semakin tinggi gradien suhu, semakin banyak tegangan dan daya yang dihasilkan (Wijayanto dkk., 2022). Pada penelitian ini untuk menaikkan tegangan yang dihasilkan maka TEG disusun secara seri, ini berdasarkan penelitian sebelumnya oleh (Rifky dkk., 2021) menunjukkan bahwa susunan seri TEG menghasilkan daya lebih tinggi dibandingkan susunan paralel.

Efek Seebeck

Efek *Seebeck*, pertama kali ditemukan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821, terjadi ketika ada perbedaan suhu antara dua sambungan logam yang berbeda, menghasilkan tegangan listrik (Puspita dkk., 2017). Efektivitas TEG sangat bergantung pada perbedaan suhu yang dapat dipertahankan antara sisi dingin dan panas. Pada Gambar 2 terlihat bahwa jika kontak menyentuh sumber panas maka ujung logam akan menimbulkan gaya gerak listrik. Fenomena ini menjadi dasar prinsip pengoperasian banyak perangkat termoelektrik modern, termasuk TEG yang menjadi subjek penelitian ini.



Gambar 2. Pergerakan Listrik dari Efek Seebeck

ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler *System-on-Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh *Espressif Systems*. Perangkat ini dilengkapi dengan WiFi 802.11 dan pin GPIO (*General Purpose Input/Output*), menjadikannya pilihan populer untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT). Penggunaan ESP32 memudahkan pemantauan dengan fungsi Wi-Fi sehingga dapat terintegrasi dengan perangkat pintar (Carlos R dkk., 2023).



Gambar 3. Mikrokontroler ESP32

Sensor DHT22

Sensor DHT22, adalah sensor digital yang mengukur suhu dan kelembaban udara dengan akurasi tinggi. DHT22 menggunakan protokol komunikasi *single-wire* untuk mengirimkan data ke mikrokontroler. Dalam pengujian TEG, DHT22 berperan penting dalam memantau suhu di berbagai titik dalam sistem, termasuk sisi panas dan dingin TEG, dengan ketepatan $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dan resolusi $0,1^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4. Sensor DHT 22

ADS1115

ADS1115 adalah modul pengubah sinyal *analog-ke-digital* (ADC) dengan presisi 16-bit. Modul ini digunakan untuk mengonversi sinyal analog menjadi data digital dengan tingkat akurasi yang tinggi, yang sangat berguna dalam aplikasi seperti pengukuran tegangan dalam sistem TEG. Dengan menggunakan ADS1115, mikrokontroler dapat dengan mudah mengambil data dari sensor-sensor analog dan mengolahnya secara digital.



Gambar 5. Modul ADC (ADS1115)

Sensor BH1750

Sensor BH1750 adalah sensor cahaya digital presisi tinggi yang dirancang untuk mengukur intensitas cahaya sekitar. Dalam konteks penelitian TEG, sensor ini berperan dalam mengukur tingkat intensitas cahaya di lapangan. BH1750 mampu mengukur berbagai intensitas cahaya, mulai dari 1 lux hingga 55.000 lux.



Gambar 6. Sensor Intensitas Cahaya BH1750

Water Block

Perangkat ini terbuat dari balok logam (biasanya tembaga atau aluminium) dengan saluran internal yang memungkinkan air atau cairan pendingin lainnya bersirkulasi di dalamnya. Prinsip *water block* menggunakan konduktivitas termal logam yang tinggi dan panas jenis air yang besar untuk menyerap dan memindahkan panas secara efektif. (Wijayanto dkk., 2022) dalam penelitiannya menemukan bahwa variasi pompa aliran air pada sistem pendingin *water block* berdampak signifikan terhadap tegangan dan perubahan suhu yang dihasilkan TEG.



Gambar 7. *Water Block*

Heat Sink

Heat sink atau sirip pendingin adalah komponen yang dirancang untuk meningkatkan luas permukaan kontak dengan udara sekitar, sehingga mempercepat proses pembuangan panas dari sumber panas. Prinsip kerja heatsink didasarkan pada hukum termodinamika dan perpindahan panas, terutama konveksi dan konduksi. Struktur *heat sink* terdiri dari *base plate* (pelat dasar) yang terbuat dari material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti aluminium, yang dilengkapi dengan sejumlah sirip (*fins*) yang menjulang dari *base plate*. Penelitian (Wibowo dkk., 2021) mendemonstrasikan efektivitas *heat sink* sebagai media pendingin dalam meningkatkan output tegangan listrik TEG.



Gambar 8. *Heat Sink*

Atap Metal

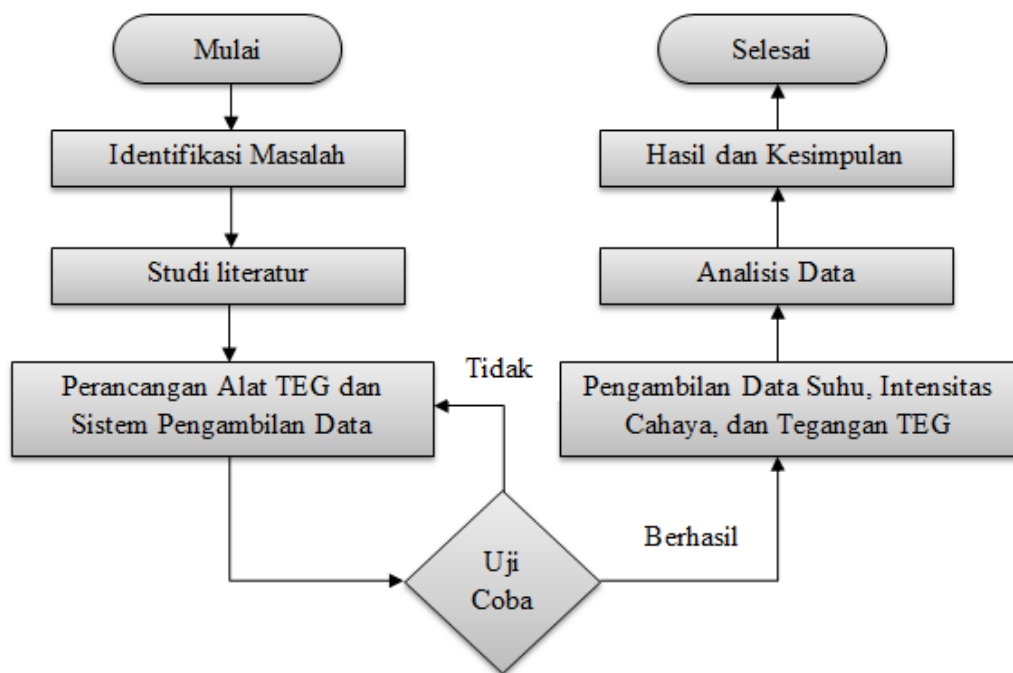
Atap berwarna gelap dengan berbahan metal zincalume digunakan pada penelitian ini. Warna atap mempengaruhi daya serap intensitas cahaya, dengan warna gelap menyerap lebih banyak dibanding warna terang. Hal ini disebabkan perbedaan pantulan gelombang elektromagnetik setiap warna. Penelitian (Nazaruddin dkk., 2020) menunjukkan atap seng hitam menyerap panas matahari tertinggi, sementara putih terendah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis potensi *Thermoelectric Generator* (TEG) pada atap metal. Variabel utama dalam penelitian ini adalah tegangan listrik yang dihasilkan oleh TEG. Variabel lainnya meliputi, suhu sisi panas dan dingin TEG serta Intensitas cahaya matahari. Pengukuran dilakukan pada tiga kondisi: dengan *water block*, *heat sink*, dan tanpa pendingin. Data dikumpulkan selama tiga hari (08.00-17.30) dengan interval 10 menit, mencakup suhu TEG, intensitas cahaya, dan tegangan output.

Diagram Alir Penelitian

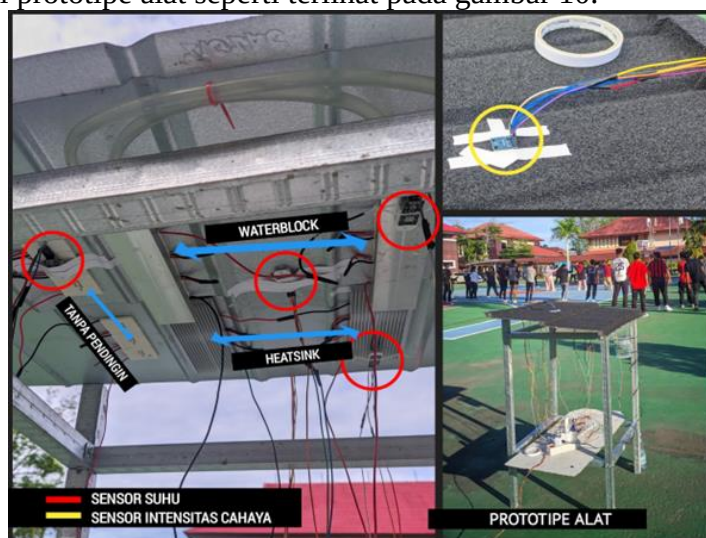
Dalam analisis *Thermoelectric Generator* (TEG) terdapat beberapa langkah tahapan seperti pada gambar 9.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

Bahan Dan Alat

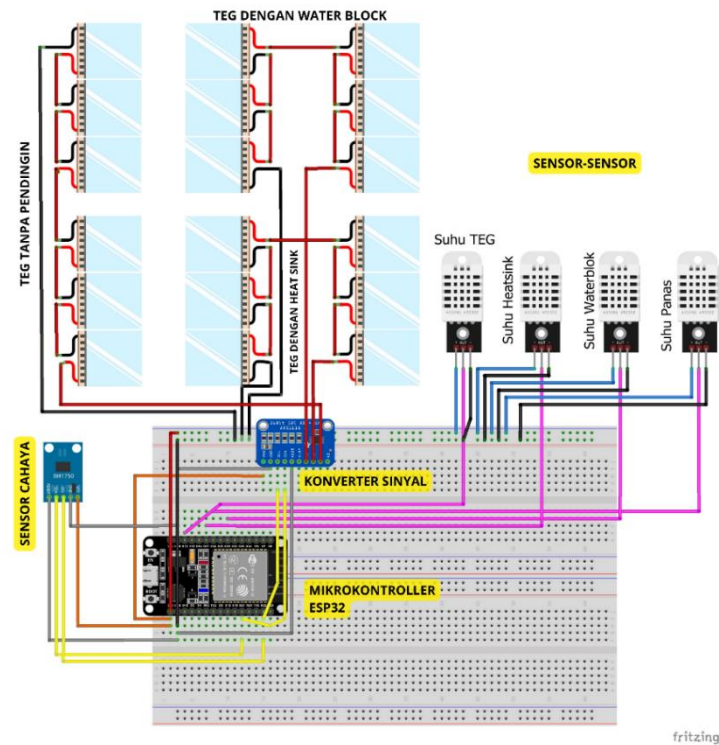
Bahan dalam penelitian ini adalah 6 modul *Thermoelectric Generator* (TEG) yang dirangkai secara seri dalam setiap kondisi pendinginan dan atap metal sebagai media penempatan TEG. Alat yang digunakan meliputi rangka untuk penempatan atap, sistem pendingin berupa *water block* dan *heat sink*, serta perangkat pengukuran. Perangkat pengukuran terdiri dari sensor suhu untuk mengukur suhu sisi panas dan dingin TEG, sensor cahaya untuk mengukur intensitas cahaya matahari, dan konverter sinyal ADC untuk mengukur tegangan output TEG. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai unit pemrosesan data yang mengintegrasikan semua sensor dan mengirimkan data ke *Google Sheets* untuk analisis lebih lanjut. Untuk sistem pendingin *water block*, pompa air juga digunakan untuk sirkulasi air pendingin. Dari keseluruhan bahan dan alat tersebut dirangkai menjadi prototipe alat seperti terlihat pada gambar 10.



Gambar 9. Prototipe Dan Letak Sensor

Sistem Pengambilan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung menggunakan sensor-sensor yang terhubung ke ESP32. Sensor suhu ditempatkan pada sisi panas dan dingin TEG untuk mengukur gradien suhu. Sensor cahaya dipasang di atas atap untuk mengukur intensitas cahaya matahari. Tegangan output TEG diukur menggunakan konverter sinyal ADC. Data dari semua sensor ini dikumpulkan oleh ESP32 .



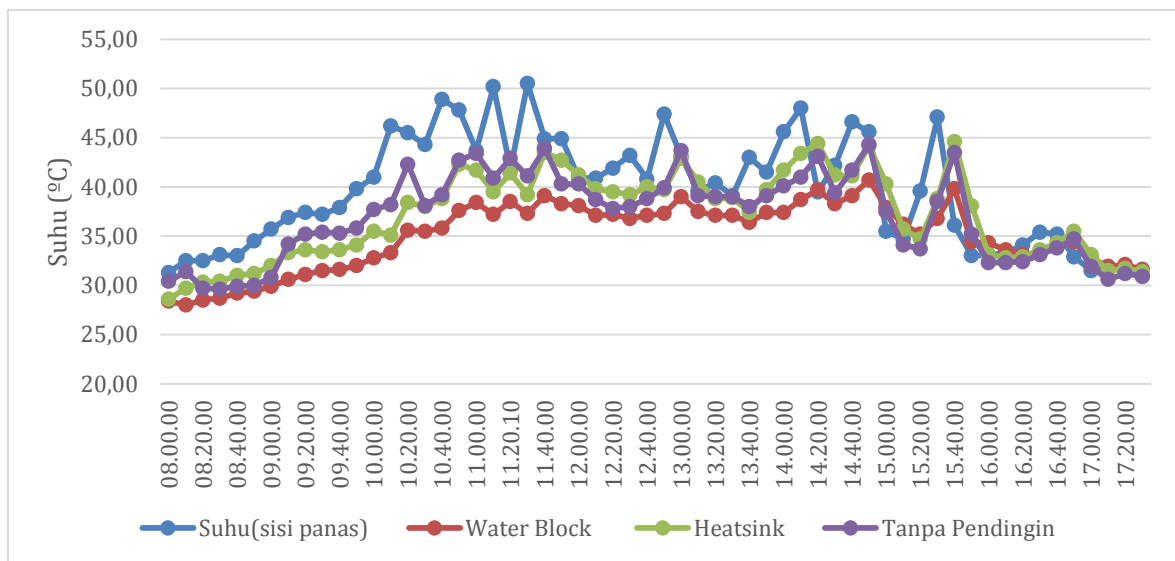
Gambar 10. Rancangan Sistem Pengambil Data

Teknik Analisis

Analisis data dilakukan melalui pendekatan kuantitatif dan komparatif. Data mentah dari sensor diolah untuk menghitung perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan dingin TEG. Analisis meliputi pengolahan data, visualisasi grafik, dan analisis statistik untuk perbandingan kinerja TEG dalam tiga kondisi pendinginan. Matriks pengujian digunakan untuk mengorganisir dan membandingkan data dari berbagai kondisi pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis ini diperuntukan mengetahui perbandingan suhu panas dan dingin pada berbagai media pendingin yang diaplikasikan pada thermoelectric generator (TEG). Gambar 12. menunjukkan grafik suhu panas dan suhu dingin.

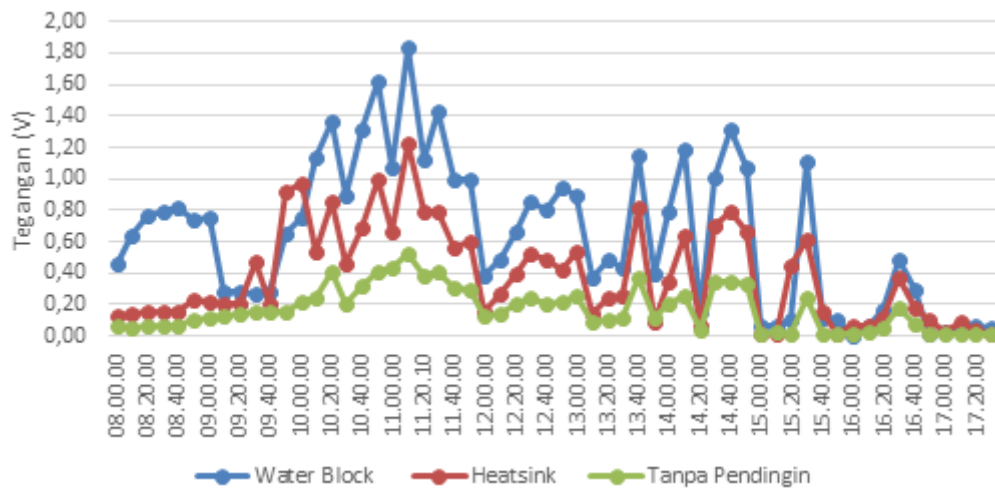


Gambar 11. Grafik Suhu Panas dan Suhu Dingin

Dilihat pada gambar 12. suhu panas berfluktuasi signifikan sepanjang hari, mencapai puncak sekitar 50°C antara pukul 11.00-11.30 WITA. Tren suhu meningkat dari pagi, memuncak di siang hari, dan menurun menjelang sore, mencerminkan pengaruh paparan sinar matahari terhadap perubahan suhu. *Water block* menunjukkan performa terbaik dalam menjaga stabilitas suhu TEG, berkisar 35°C-40°C sepanjang hari dengan fluktuasi minimal. *Heat sink* juga efektif, menjaga suhu antara 37°C-42°C. Tanpa pendingin, suhu berfluktuasi antara 40°C-45°C, lebih tinggi dibandingkan kedua metode pendinginan namun tetap di bawah suhu sisi panas. *Water block* terbukti paling efektif dalam menstabilkan dan menurunkan suhu TEG dikarenakan pendingin cair menyerap panas dan mengalirkannya melalui sirkulasi fluida sehingga efisiensinya tinggi dan dapat mengatasi lonjakan suhu secara dinamis (Hoang dkk., 2021). *Heat sink* kurang efektif dibanding *water block* dikarenakan kinerja menurun saat udara sekitar tidak cukup dingin atau ventilasi buruk dan tidak responsif terhadap lonjakan panas tinggi (Choudhary dkk., 2019), tetap menjadi alternatif yang baik dengan instalasi lebih sederhana dan biaya lebih rendah.

Analisis Tegangan

Tegangan dianalisis untuk mengetahui perbandingan tegangan yang dihasilkan oleh tiga kondisi pendingin (*water block*, *heat sink*, dan tanpa pendingin) pada sistem *Thermoelectric Generator* (TEG). Gambar 13. menunjukkan grafik tegangan berbagai kondisi pendingin.

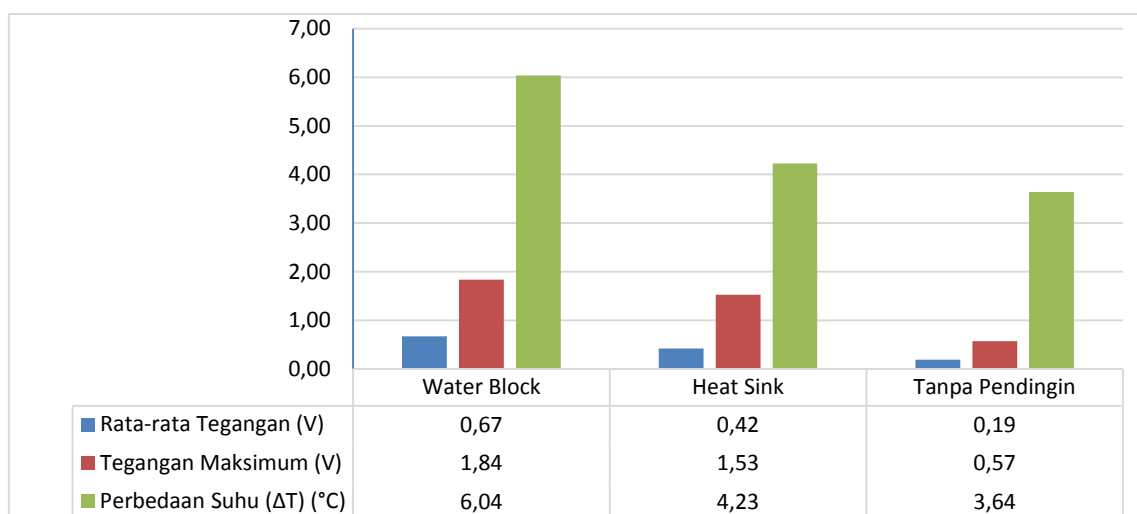


Gambar 12. Grafik Tegangan Variasi Pendingin

Water block konsisten menghasilkan tegangan tertinggi, mencapai puncak 1,84V pada pukul 11:10 WITA dari nilai awal 0,46V. *Heat sink* menempati posisi kedua dengan tegangan puncak 1,22V, sementara kondisi tanpa pendingin menghasilkan tegangan terendah dengan puncak hanya 0,52V. Ketiga kondisi menunjukkan pola umum peningkatan tegangan dari pagi hingga siang, diikuti fluktuasi dan penurunan bertahap hingga sore. *Water block* menampilkan fluktuasi paling signifikan setelah mencapai puncak, namun tetap mempertahankan tegangan tertinggi. *Water block* memberikan pendinginan tetap stabil, membuat selisih suhu (ΔT) menjadi maksimum sehingga tegangan lebih tinggi (Scherrer dkk., 2018). *Heat sink* dan tanpa pendingin menunjukkan pola serupa dengan amplitudo lebih rendah. Hasil ini mengonfirmasi efektivitas *water block* sebagai metode pendinginan optimal untuk TEG, diikuti oleh *heat sink*. *Heatsink* memberikan pendinginan pasif, menurunkan suhu tetapi tidak seefisien *water block*. Kondisi tanpa pendingin secara konsisten menghasilkan tegangan terendah, menunjukkan efisiensi konversi termal yang kurang optimal. Penurunan tegangan menuju akhir pengujian menunjukkan penurunan efisiensi konversi termal seiring waktu pada semua kondisi.

Analisis Kinerja Thermoelectric Generator

Efektivitas *Thermoelectric Generator* (TEG) sangat bergantung pada perbedaan suhu yang signifikan antara sisi panas dan dingin (Jannah dkk., 2022) sehingga penelitian ini mencoba menganalisis pengaruh berbagai media pendingin terhadap kinerja TEG yang diaplikasikan pada atap metal. Analisis berfokus pada tiga konfigurasi pendinginan: penggunaan *water block*, *heat sink*, dan tanpa media pendingin. Analisis dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 13. Grafik dan Statistik Kinerja *Thermoelectric Generator*

Analisis data menunjukkan bahwa *water block* merupakan media pendingin paling efektif untuk meningkatkan kinerja *Thermoelectric Generator* (TEG). *Water block* menghasilkan rata-rata tegangan tertinggi (0,67V) dibandingkan *heat sink* (0,42V) dan tanpa pendingin (0,19V). Tegangan maksimum yang dicapai *water block* juga unggul (1,84V) dibanding *heat sink* (1,53V) dan tanpa pendingin (0,57V). Perbedaan suhu (ΔT) terbesar dihasilkan oleh *water block* (6,04 $^{\circ}C$), diikuti *heat sink* (4,23 $^{\circ}C$) dan tanpa pendingin (3,64 $^{\circ}C$). Hasil ini mengindikasikan bahwa *water block* mampu mempertahankan gradien suhu lebih besar antara sisi panas dan dingin TEG, menghasilkan tegangan output yang lebih tinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan media pendingin yang tepat untuk mengoptimalkan efisiensi dan output daya TEG.

Analisis Hubungan antar Variabel

Hasil analisis dari variabel Intensitas Cahaya Matahari (Ix), Perbedaan Suhu ΔT ($^{\circ}C$), dan Tegangan (V) menggunakan korelasi Pearson dalam aplikasi pengolah data statistik SPSS dididapat seperti pada tabel 2.

Tabel 1. Analisis korelasi antar variabel

Correlations				
		Perbedaan Suhu ΔT ($^{\circ}C$)	Intensitas Cahaya Matahari (Ix)	Tegangan (V)
Intensitas Cahaya Matahari (Ix)	Pearson Correlation	0,429**	1	0,531**
	Sig. (2-tailed)	<0,001		<0,001
	N	174	174	174
Perbedaan Suhu ΔT ($^{\circ}C$)	Pearson Correlation	1	0,429**	0,898**
	Sig. (2-tailed)		<0,001	<0,001
	N	174	174	174
Tegangan (V)	Pearson Correlation	0,898**	0,531**	1
	Sig. (2-tailed)	<0,001	<0,001	
	N	174	174	174

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Nilai korelasi berkisar antara -1 hingga 1, dengan nilai mendekati ± 1 menunjukkan hubungan kuat dan nilai mendekati 0 menunjukkan hubungan lemah. Tanda positif mengindikasikan hubungan searah, sedangkan tanda negatif menunjukkan hubungan berlawanan arah. Signifikansi statistik ditentukan oleh nilai $p < 0,05$.

Hasil analisis menunjukkan:

1. Intensitas Cahaya Matahari berkorelasi positif moderat dengan Perbedaan Suhu ($r = 0,429$) dan Tegangan ($r = 0,531$), keduanya signifikan ($p < 0,001$).
2. Perbedaan Suhu berkorelasi positif kuat dengan Tegangan ($r = 0,898$), signifikan pada $p < 0,001$.
3. Semua korelasi signifikan pada level 0,01 (2-tailed).

Terdapat hubungan signifikan antara ketiga variabel. Peningkatan Intensitas Cahaya Matahari cenderung diikuti oleh peningkatan Perbedaan Suhu (Pratiwi dkk., 2023). Hubungan terkuat terlihat antara Perbedaan Suhu dan Tegangan, mengonfirmasi prinsip kerja *Thermoelectric Generator* yang memanfaatkan perbedaan suhu untuk menghasilkan listrik.

Perbandingan Kinerja TEG

Analisis ANOVA *Post Hoc Tests*, diperuntukan untuk membandingkan kinerja *Thermoelectric Generator* (TEG) dengan berbagai media pendingin. Hasil analisis ini dapat dilihat pada tabel 3. Tabel ini membandingkan tiga jenis media pendingin: *water block*, *heat sink*, dan tanpa pendingin, dengan variabel dependen berupa Tegangan (V) yang dihasilkan oleh TEG. Perbedaan rata-rata yang positif menunjukkan bahwa media pendingin pertama menghasilkan tegangan lebih tinggi, sedangkan nilai negatif menunjukkan sebaliknya. Nilai signifikansi (p) $< 0,05$ menandakan perbedaan signifikan secara statistik.

Tabel 2. Analisis ANOVA, *Post Hoc Tests*

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: Tegangan (V)							
	(I) Media Pendingin	(J) Media Pendingin	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
Tukey HSD	water block	heat sink	0,25092 [*]	0,03965	<0,001	0,1577	0,3441
		tanpa pendingin	0,48075 [*]	0,03965	<0,001	0,3876	0,5739
	heat sink	water block	-0,25092 [*]	0,03965	<0,001	-0,3441	-0,1577
		tanpa pendingin	0,22983 [*]	0,03965	<0,001	0,1366	0,3230
	tanpa pendingin	water block	-0,48075 [*]	0,03965	<0,001	-0,5739	-0,3876
		heat sink	-0,22983 [*]	0,03965	<0,001	-0,3230	-0,1366
LSD	water block	heat sink	0,25092 [*]	0,03965	<0,001	0,1730	0,3288
		tanpa pendingin	0,48075 [*]	0,03965	<0,001	0,4029	0,5586
	heat sink	water block	-0,25092 [*]	0,03965	<0,001	-0,3288	-0,1730
		tanpa pendingin	0,22983 [*]	0,03965	<0,001	0,1519	0,3077
	tanpa pendingin	water block	-0,48075 [*]	0,03965	<0,001	-0,5586	-0,4029
		heat sink	-0,22983 [*]	0,03965	<0,001	-0,3077	-0,1519

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Hasil analisis menunjukkan:

1. *Water block* vs *Heat sink*: *Water block* menghasilkan tegangan rata-rata 0,25092 V lebih tinggi dibandingkan *heat sink*.
2. *Water block* vs Tanpa pendingin: *Water block* menghasilkan tegangan rata-rata 0,48075 V lebih tinggi dibandingkan tanpa pendingin.
3. *Heat sink* vs Tanpa pendingin: *Heat sink* menghasilkan tegangan rata-rata 0,22983 V lebih tinggi dibandingkan tanpa pendingin.

Semua perbandingan menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan ($p < 0,001$). *Water block* menunjukkan kinerja terbaik dalam menghasilkan tegangan, diikuti oleh *heat*

sink, dan terendah tanpa media pendingin. Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan media pendingin, terutama *water block*, dapat meningkatkan efisiensi TEG secara signifikan dalam menghasilkan tegangan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tentang potensi *Thermoelectric Generator* (TEG) pada atap metal, dapat disimpulkan:

1. TEG menunjukkan potensi dalam menghasilkan listrik dari panas atap metal. Dilihat dari media pendinginan *water block* menghasilkan tegangan rata-rata tertinggi (0,67 V), diikuti *heat sink* (0,42 V), dan tanpa pendingin (0,19 V). Tegangan maksimum mencapai 1,84 V dengan *water block*, mengindikasikan potensi TEG sebagai sumber energi alternatif.
2. Media pendingin berpengaruh signifikan terhadap kinerja TEG. *Water block* mempertahankan perbedaan suhu (ΔT) terbesar (6,04°C), diikuti *heat sink* (4,23°C), dan tanpa pendingin (3,64°C). Analisis statistik mengonfirmasi perbedaan kinerja yang signifikan antar media pendingin ($p < 0,001$).
3. Terdapat korelasi kuat antara perbedaan suhu dan tegangan *output* ($r = 0,898$, $p < 0,001$). Intensitas cahaya matahari berkorelasi positif moderat dengan perbedaan suhu ($r = 0,429$, $p < 0,001$) dan tegangan ($r = 0,531$, $p < 0,001$), menunjukkan potensi TEG di daerah dengan paparan sinar matahari tinggi.
4. Hasil ini menegaskan potensi TEG sebagai sumber energi alternatif, terutama dengan penggunaan *water block* sebagai media pendingin. Penelitian lanjutan diperlukan untuk optimalisasi desain, eksplorasi material, dan integrasi dengan teknologi penyimpanan energi guna meningkatkan efisiensi dan aplikabilitas TEG dalam skala lebih besar.

REFERENSI

- Baskoro, F., Wibowo, N. T., & Widyartono, M. (2021). Rancang Bangun Thermoelectric Generator Sebagai Pembangkit Listrik Dengan Memanfaatkan Panas Matahari. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(1), 127-136.
- Carlos R, S., Rumiasih, Indrawasih, & Albianto, M. D. (2023). Internet of Things (IoT) Based Temperature Monitoring System on The Low Voltage Sub-Distribution Panel (LVSDP) Busbar. *International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)*, 3(2), 45–52.
- Choudhary, V., Kumar, M., & Patil, A. K. (2019). Experimental investigation of enhanced performance of pin fin heat sink with wings. *Applied Thermal Engineering*, 155, 546-562.
- Diawan, F. A., Kirom, M. R., & Pangaribuan, P. (2018). Pemanfaatan Thermoelectric Cooler Pada Photovoltaic Sebagai Pembangkit. *eProceedings of Engineering*, 5(3).
- Hoang, C. H., Rangarajan, S., Manaserh, Y., Tradat, M., Mohsenian, G., Choobineh, L., ... & Sammakia, B. (2021). A review of recent developments in pumped two-phase cooling technologies for electronic devices. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11(10), 1565-1582.
- Indriyani Rachman, Ph. D. (2023). *AKSI NYATA BERBASIS SDGs*. Uwais Inspirasi Indonesia.
- Jennah, S., Belouaggadia, N., Lbibb, R., & Ezzine, M. (2022). Performance improvement of a TEG by a heat transfer fluid. *2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 1–4.
- Kayode Olajiga, O., Clinton Festus-Ikhuoria, I., Adekola Adebayo, R., & Constance Obiuto, N. (2024). Sustainable Development and Renewable Energy Policy: A Review of Global Trends and Success Stories. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, 4(2), 648–656.
- Murtadho, F., & Firdaus, R. (2023). Pemanfaatan Panas Dinding Kompor Portabel untuk Charging Baterai Para Campers Berbasis Thermoelectric Generator. ... : *Methodical Research Journal*.
- Nazaruddin, N., Zulfadli, T., & Mulkan, A. (2020). Studi Kemampuan Penyerapan Panas pada Atap Rumah Seng Berwarna Terhadap Intensitas Matahari dalam Mengatasi Global Warming. *International Journal of Natural Science and Engineering*, 4(3), 114-121.
- Pratiwi, S. H., Purnamasari, R. T., & Hidayanto, F. (2023). Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari Dan Pemberian Pupuk Nitrogen Terhadap Produktivitas Sawi Putih (*Brassica pekinensis* L.). *AGRISAINTEFIKA: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 7(1), 40-47.
- Puspita, S. C., Sunarno, H., & Indarto, B. (2017). Generator termoelektrik untuk pengisian aki. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*.
- Rifky, R., Fikri, A., & Mujirudin, M. (2021). Konversi Energi Termal Surya Menjadi Energi Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*.
- Sabubu, T. A. W. (2020). Pengaturan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara Di Indonesia Prespektif Hak Atas Lingkungan Yang Baik Dan Sehat. *Lex Renaissance*, 5(1), 72–90.
- Scherrer, H., Rowe, D. M., Kajikawa, T., Matsubara, K., Issi, J. P., Goldsmid, H. J., ... & Morgunov, I. V. (2018). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*.
- Wijayanto, H. L., Amiruddin, A., Kadriadi, K., Wirakusuma, K. W., & Atmoko, N. T. (2022). Pengaruh Variasi Daya Pompa pada System Pendinginan TEG terhadap

Tegangan yang Dihasilkan TEG. Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi, 22(1), 477-481.

Yuan Perdana, Isna Wardiah, & Edi Yohanes³. (2018). *Prosiding SNRT (Seminar Nasional Riset Terapan) Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Ongrid 5500 Watt Di Rumah Kost Akademi*.