

Design and Performance Analysis of Solar Thermoelectric Generator (STEG) for Heat Utilizing under Varying Temperature Condition

Article History:

Received
26 June 2025
Revised
27 August 2025
Accepted
20 November 2025

MUHAMMAD REFQI HIDAYATULLAH, ARIF NUR AFANDI

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Indonesia
Email: m.refqi.2105366@students.um.ac.id; an.afandi@um.ac.id

ABSTRAK

Pemanfaatan panas surya atap bangunan penting untuk mitigasi urban heat island dan efisiensi energi di iklim tropis. Penelitian ini mendesain panel Solar Thermoelectric Generator (STEG) dan menganalisis performanya dalam mengonversi limbah panas seng menjadi listrik pada kondisi suhu bervariasi. Pendekatan eksperimen dan simulasi ANSYS terintegrasi mengevaluasi konduktivitas termal seng dan kinerja STEG. Data suhu aktual material seng dikumpulkan untuk gradien suhu optimal (ΔT). Hasil menunjukkan panel seng mencapai ΔT maksimum 5.82°C. Konfigurasi seri menghasilkan daya puncak 0.0825 mW, paralel 0.0085 W. Efisiensi sistem terhitung 0.0090%. Meskipun efisiensi awal rendah, temuan ini memvalidasi kelayakan desain panel STEG dan material seng untuk pemulihan panas surya.

Kata kunci: Generator Termoelektrik, Panas Matahari, Seng, Energi Terbarukan

ABSTRACT

Utilizing solar heat from building rooftops is crucial for urban heat island mitigation and energy efficiency in tropical climates. This study designs a Solar Thermoelectric Generator (STEG) panel and analyzes its performance in converting zinc waste heat into electricity under varying temperature conditions. An integrated experimental and ANSYS simulation approach evaluated zinc's thermal conductivity and STEG panel performance. Actual temperature data from the zinc material were collected to identify optimal temperature gradients (ΔT). Results showed the zinc panel achieved a maximum ΔT of 5.82°C. A series configuration yielded 0.0825 mW peak power, while parallel reached 0.0085 W. System efficiency was calculated at 0.0090%. Despite initial low efficiency, these findings validate STEG panel design and zinc material feasibility for solar heat recovery.

Keywords: Thermoelectric Generator, Solar Heat, Zinc, Renewable Energy

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



1. PENDAHULUAN

Indonesia sedang berada dalam era transisi energi yang ditandai oleh pergeseran kebijakan nasional dari ketergantungan pada energi fosil menuju pengembangan energi terbarukan. Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional menargetkan bauran energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 (ESDM, 2021). Energi surya merupakan salah satu sumber yang menjadi fokus karena sifatnya yang terbarukan, ramah lingkungan, dan melimpah di wilayah tropis seperti Indonesia **(Wahyudi and Pradana, 2020)**. Secara global, peningkatan pemanfaatan energi surya juga menunjukkan tren positif, dengan kapasitas pembangkit listrik tenaga surya meningkat sebesar 22% secara tahunan pada tahun 2023 **(IRENA, 2024)**, memperkuat relevansi energi surya dalam mendukung ketahanan dan keberlanjutan sistem energi nasional.

Potensi energi surya di Indonesia tergolong sangat besar, dengan intensitas radiasi matahari rata-rata harian mencapai 4,8 kWh/m²/hari dan potensi teknis sebesar 207,8 GWp **(ESDM, 2023)**. Namun, realisasi pemanfaatan hingga akhir 2023 baru mencapai sekitar 0,2% dari total potensi tersebut **(IESR, 2023)**. Kesenjangan ini menunjukkan masih adanya hambatan dalam pengembangan infrastruktur dan teknologi pemanen energi surya. Sebagian besar instalasi masih menggunakan panel surya berbasis fotovoltaik yang hanya memanfaatkan spektrum cahaya tampak, sementara radiasi panas matahari sebagian besar terbuang **(Fatimah, dkk, 2019)**. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan teknologi yang mampu mengoptimalkan pemanfaatan panas matahari sebagai energi alternatif, khususnya dalam kondisi iklim tropis.

Kondisi ideal yang diharapkan melalui pemanfaatan penuh energi surya belum tercapai secara optimal di Indonesia. Panel surya konvensional memang telah dikembangkan secara luas, namun belum mampu mengkonversi panas matahari secara langsung menjadi energi listrik. Studi menunjukkan bahwa banyak permukaan bangunan—seperti atap, kanopi, dan dinding—menyerap panas matahari dalam jumlah besar, namun belum dilengkapi teknologi konversi termal **(Santoso, dkk, 2021) (Ramadhan dan Siregar, 2021)**. Padahal, potensi panas dari permukaan tersebut bisa digunakan untuk mendukung pembangkitan listrik menggunakan sistem seperti thermoelectric generator (TEG) yang bekerja berdasarkan efek Seebeck **(Zhou, dkk, 2017)**. Gap antara kapasitas teknologi eksisting dan potensi panas yang belum dimanfaatkan inilah yang menjadi dasar dilakukannya penelitian ini.

Thermoelectric Generator (TEG) merupakan teknologi yang memungkinkan konversi langsung dari panas menjadi listrik dengan memanfaatkan perbedaan suhu antarpelat semikonduktor **(Prawira, dkk, 2022)**. Sayangnya, penelitian mengenai integrasi TEG dalam desain panel yang efektif di bawah suhu tropis Indonesia masih sangat terbatas. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengeksplorasi aplikasi panel TEG di berbagai elemen bangunan yang menerima panas, seperti seng pada atap atau kanopi. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain dan menganalisis performa panel Solar Thermoelectric Generator (STEG) berbasis material seng dalam kondisi temperatur bervariasi guna memanfaatkan energi panas secara efisien dan adaptif terhadap lingkungan tropis.

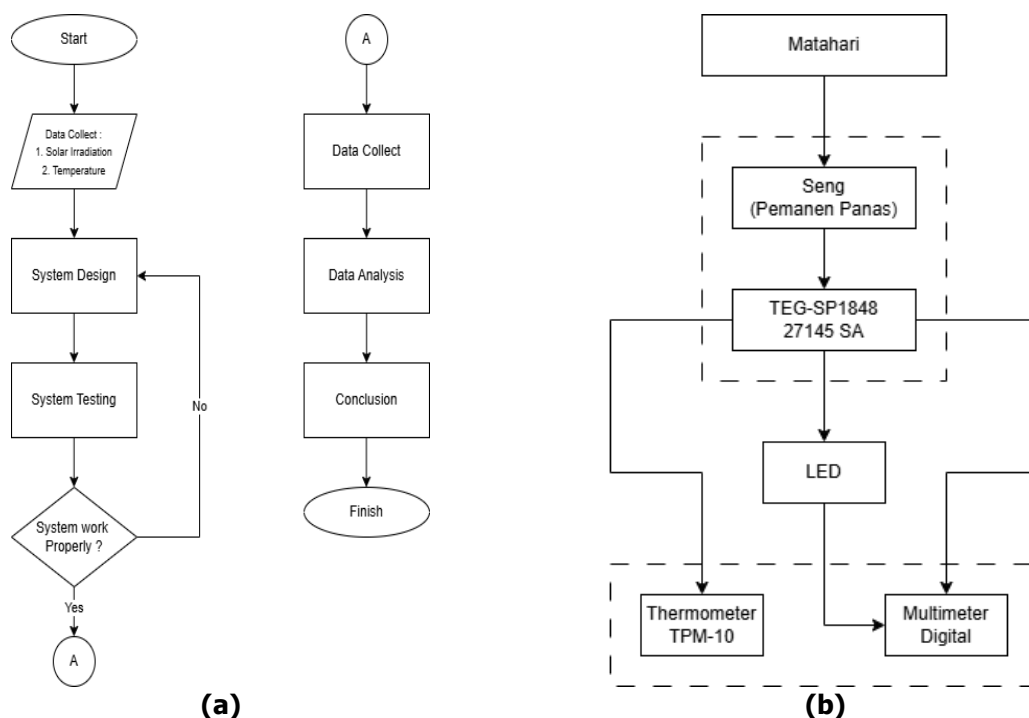
Penelitian ini menjadi penting karena membuka peluang pemanfaatan panas matahari yang selama ini terbuang sia-sia. Panel STEG dapat dipasang tidak hanya di atap, tetapi juga pada berbagai struktur seperti dinding, tenda, dan kanopi. Sistem ini memperkuat efisiensi energi dan memperluas cakupan penerapan teknologi terbarukan dalam lingkungan urban Indonesia, baik secara praktis maupun teoritis.

2. METODE

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan guna menjawab urgensi pemanfaatan energi matahari secara langsung, sebagaimana telah dijelaskan dalam bagian pendahuluan sebelumnya. Dalam bagian ini, metode yang digunakan meliputi perancangan, pengujian, dan menganalisis hasil pengujian berupa kinerja panel STEG berbasis seng dalam memanfaatkan energi panas matahari pada kondisi suhu yang berubah-ubah.

Berdasarkan kondisi lingkungan dimana suhu yang berubah-ubah setiap waktunya, metode penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental melalui proses desain sistem, pengujian kinerja, dan analisis data suhu serta output energi listrik. Hal ini di visualisasikan dalam proses melalui kedua diagram: (a) diagram alur penelitian dan (b) diagram sistem panel. Kedua visualisasi ini dapat dilihat pada gambar berikut.



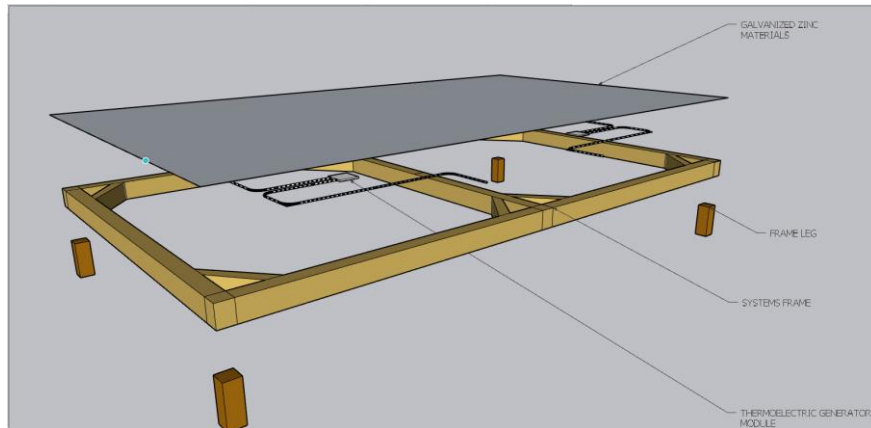
Gambar 1. (a) Diagram Alur Penelitian, (b) Diagram Sistem Panel

Diagram (a) menggambarkan alur penelitian secara sistematis, dimulai dari pengumpulan data iradiasi matahari dan suhu, dilanjutkan dengan proses desain sistem, pengujian, serta analisis kinerja output. Pengumpulan data dilakukan menggunakan termometer digital dan multimeter. Pendekatan eksperimental seperti ini umum digunakan untuk studi konversi energi termal, sebagaimana dijelaskan dalam penelitian sejenis oleh **(Supriadi, dkk, 2020) (Riyadi dan Prasetyo, 2022)**. Studi oleh Ramadhan dan Siregar (2021), yang menekankan pentingnya pengujian langsung terhadap prototipe sistem dalam kondisi tropis.

Diagram (b) merepresentasikan sistem panel STEG secara konseptual, di mana seng berperan sebagai absorber panas yang mengalirkan suhu ke modul TEG-SP1848. Tegangan hasil konversi energi termal diukur menggunakan multimeter, sedangkan suhu dicatat oleh thermometer digital. Prinsip kerja sistem mengacu pada teori efek termoelektrik yang telah digunakan pada sistem pemanen energi berbasis suhu rendah **(Putra, dkk, 2021) (Huda, dkk, 2023)**. Sistem ini dievaluasi dalam variasi kondisi temperatur guna melihat stabilitas dan efisiensi konversi.

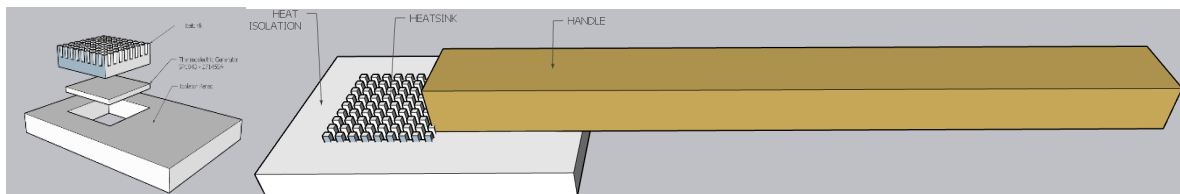
2.2 Perancangan Rangka Panel

Perancangan rangka sistem merupakan tahap krusial dalam pengembangan panel Solar Thermoelectric Generator (STEG). Rangka ini dirancang menggunakan perangkat lunak SketchUp, memastikan struktur yang kokoh dan efisien. Material rangka utama dipilih adalah kayu, sedangkan material pemanen panas menggunakan seng galvalum. Kombinasi ini bertujuan optimalisasi penyerapan panas. Rancangan keseluruhan rangka panel dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Rangka Panel

Rangka panel memiliki dimensi yang presisi, dengan panjang sekitar 50 cm dan lebar 40 cm, menopang lembaran seng galvalum setebal 0.5 mm. Di dalam rangka, terdapat sistem isolasi terintegrasi. Sistem ini berfungsi sebagai wadah pelindung bagi modul TEG, *heatsink*, serta sensor suhu yang terpasang di sisi bawah material. Struktur isolasi ini berperan penting dalam meminimalkan kehilangan panas. Ilustrasi sistem isolasi lebih lanjut ditunjukkan pada Gambar berikut.

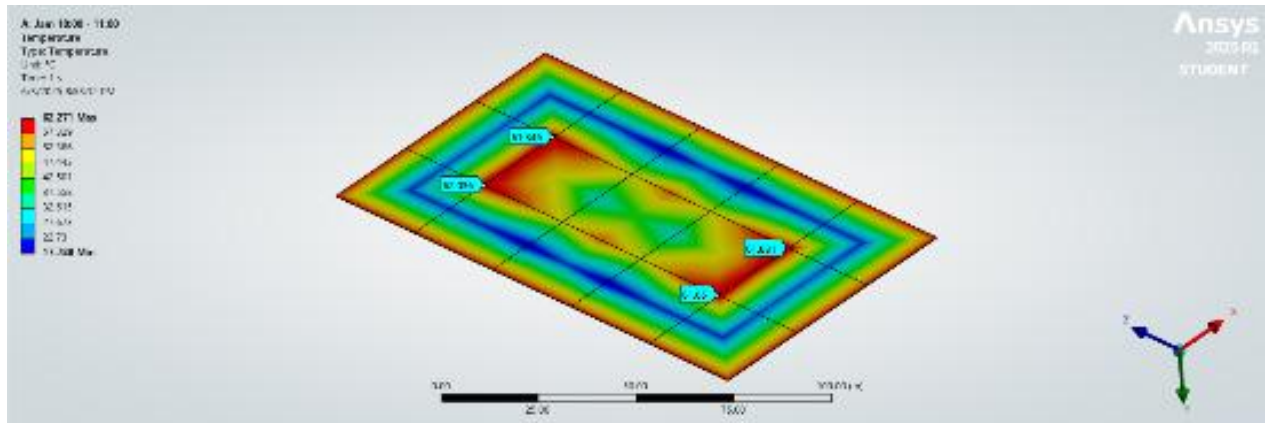


Gambar 3. Desain Sistem Isolasi Panas

Melanjutkan penjelasan sebelumnya, sistem isolasi dirancang untuk menciptakan lingkungan termal yang stabil di sekitar modul TEG. Bagian wadah utama sistem isolasi ini terbuat dari material *styrofoam* dengan ketebalan yang memadai. *Styrofoam* dipilih karena memiliki sifat insulasi termal yang sangat baik, memastikan panas tetap terfokus pada modul TEG dan mencegah disipasi ke lingkungan sekitar, sehingga memaksimalkan efisiensi konversi.

2.3 Perancangan Penempatan Modul TEG

Penelitian ini mencakup perancangan penempatan modul termoelektrik (TEG) di sisi bawah material seng. Perancangan ini esensial karena panas yang terkonduksi ke sisi bawah material, yang merupakan energi panas buang, tidak tersebar merata. Untuk memaksimalkan transfer energi, simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench dengan modul *Transient Thermal Analysis* dilakukan guna mengidentifikasi lokasi penempatan modul yang menghasilkan energi panas tertinggi.



Gambar 4. Simulasi Sebaran Panas pada ANSYS

Simulasi sebaran panas pada material seng dilakukan menggunakan ANSYS Workbench: *Transient Thermal*. Gambar 4 menunjukkan contoh hasil simulasi distribusi suhu pada permukaan bawah material. Analisis ini membantu memvisualisasikan daerah dengan gradien suhu paling signifikan, yang merupakan lokasi ideal untuk menempatkan modul TEG guna mengoptimalkan penyerapan panas dan konversi energi (**Bizzy, 2022**).

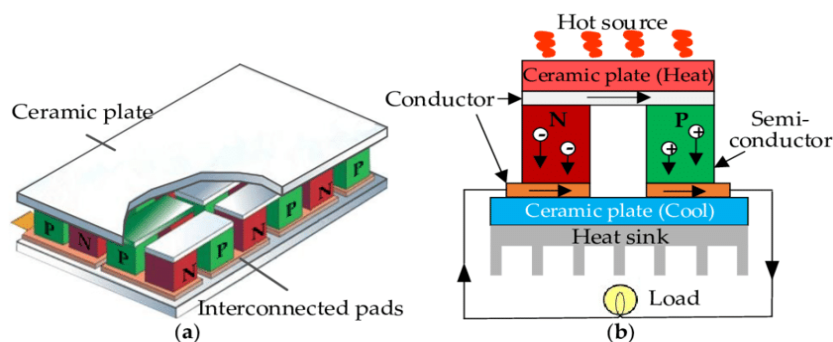
Konduksi panas merupakan salah satu dari tiga mekanisme dasar transfer panas. Transfer energi ini terjadi dalam suatu medium ketika partikel-partikel berenergi tinggi berinteraksi dengan partikel-partikel berenergi rendah yang berdekatan melalui interaksi molekuler (**Cengel, 2022**). Proses konduksi ini diukur dengan Hukum Fourier.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Dalam persamaan di atas, gradien suhu sepanjang arah aliran panas diwakili oleh $\Delta T/\Delta x$, sedangkan q menunjukkan laju aliran panas (W). $\Delta T/\Delta x$ mewakili gradien suhu sepanjang arah aliran panas, sementara ΔT mewakili selisih suhu antara dua permukaan sepanjang arah aliran panas (**Cengel, 2022**). Selisih suhu atau ΔT dituliskan melalui persamaan berikut:

$$\Delta T_1 = T_0 - T_1 \quad (2)$$

Distribusi suhu yang tidak seragam ini memengaruhi efektivitas pemulihan panas. Dengan pemahaman mendalam tentang pola termal, diperlukan pengoptimalkan desain sistem. Selanjutnya, penjelasan akan berfokus pada bagaimana perbedaan suhu ini diubah menjadi energi listrik menggunakan prinsip kerja Thermoelectric Generator (TEG) dan karakteristik utamanya.



Gambar 5. (a) Struktur Modul TEG, (b) Efek Seebeck

Gambar 5a dan 5b menyajikan ilustrasi skematis konfigurasi modul TEG, baik secara seri maupun paralel, yang digunakan dalam penelitian ini. Konfigurasi ini dirancang untuk mengoptimalkan *output* daya listrik dari energi panas yang diserap. Konversi energi termal menjadi listrik dalam TEG bergantung pada efek Seebeck, di mana beda potensial dihasilkan dari perbedaan suhu (**Javed, dkk, 2020**). Koefisien Seebeck, yang merupakan properti fundamental material termoelektrik, dijelaskan lebih lanjut dalam persamaan berikut.

$$S = \frac{V}{\Delta T} \quad (3)$$

Persamaan (3) adalah koefisien Seebeck yang mendefinisikan S sebagai koefisien Seebeck (V/K), V sebagai tegangan keluaran modul TEG, dan ΔT sebagai selisih suhu antara permukaan panas dan dingin (**Gomaa dan Rezk, 2020**). Elemen paling penting secara keseluruhan adalah mengukur seberapa banyak energi panas yang berhasil diubah menjadi energi listrik, yang juga dikenal sebagai efisiensi konversi energi, terutama pada modul TEG. Dengan kata lain, efisiensi adalah ukuran seberapa baik energi panas diubah.

$$\eta = \frac{V \cdot I}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

Dalam persamaan (4), V dan I masing-masing mewakili tegangan keluaran (V) dan arus (A) dari modul TEG, sedangkan Q mewakili energi panas (W) yang diserap di sisi panas. Efisiensi (η) merupakan parameter penting untuk mengukur kinerja konversi energi dalam sistem TEG. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan transfer energi panas ke daya listrik yang lebih efektif (**Jouhara dan Doraghi, 2024**).

2.4 Analisis Data Penelitian

Penelitian ini mengumpulkan data primer dan sekunder. Data primer terdiri dari pengukuran intensitas sinar matahari dan suhu lingkungan pada ketinggian 2 meter di atas permukaan tanah di lokasi penelitian. Data sekunder juga digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem, termasuk output energi listrik dan pembacaan suhu.

Tabel 1. Data Penelitian

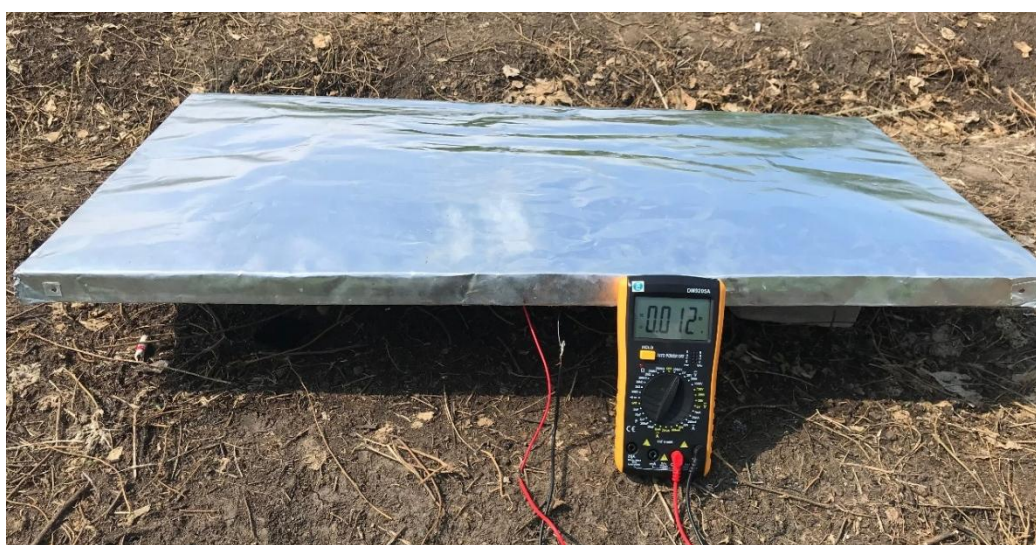
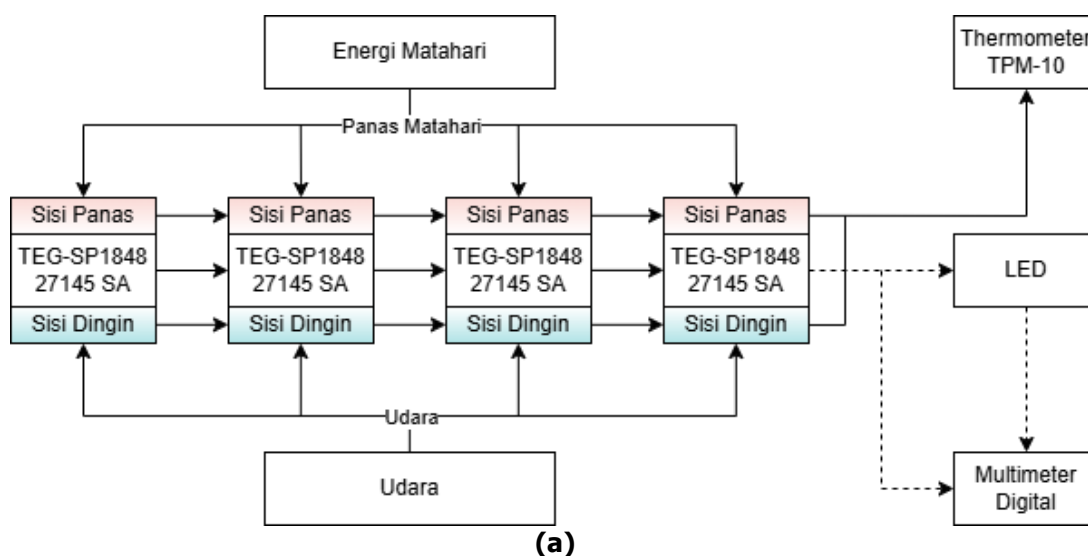
Kategori	Data
Primer	Irradiasi Matahari (W)
	Suhu Permukaan ($^{\circ}C$)
Sekunder	Tegangan (V)
	Arus (A)
	Daya (P)
	Suhu Sisi Atas Material (T_0)
	Suhu Sisi Bawah Material / Sisi Atas Modul TEG (T_1)
	Suhu Sisi Bawah Modul TEG (T_2)

Penelitian ini mengumpulkan data primer dan sekunder. Data primer terdiri dari pengukuran intensitas sinar matahari dan suhu lingkungan pada ketinggian 2 meter di atas permukaan tanah di lokasi penelitian. Data sekunder juga digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem, termasuk output energi listrik dan pembacaan suhu. Penelitian ini melibatkan beberapa prosedur analisis data. Jumlah energi panas yang hilang melalui konduksi melalui material asbes dihitung menggunakan T_0 dan T_1 . Ukuran gradien suhu dihitung dengan menentukan perbedaan suhu (ΔT_2) pada modul TEG antara sisi panas T_1 dan sisi dingin T_2 .

Data keluaran energi listrik modul TEG mencakup nilai tegangan listrik dan arus listrik yang direkam dalam konfigurasi sirkuit seri dan paralel. Statistik ini dihitung untuk menentukan berapa banyak daya yang dihasilkan dan disajikan dalam bentuk grafik, serta disajikan dalam tabel untuk dianalisis tren output energi seiring waktu.

Sistem penggunaan yang digambarkan mencakup komponen seperti bahan seng, modul TEG, rangka, dan langkah kaki. Perangkat ini menangkap energi panas dari radiasi matahari yang mengenai permukaan atas bahan dan menyebar ke bagian bawah. Modul TEG dipasang di bagian bawah bahan dan menangkap panas sisa, mengubahnya menjadi listrik. Teknologi pelat bergerak ini dapat disesuaikan untuk mengubah area pengujian.

Penelitian dilakukan di lokasi yang direncanakan berupa lapangan terbuka di Tunggulwulung, Kota Malang, Jawa Timur, dengan koordinat -7.929604 dan 112.609005. Data primer dikumpulkan dari lokasi penelitian menggunakan NASA Power. Alat ini menyediakan statistik tentang intensitas sinar matahari dalam kondisi cerah dan berawan, serta pembacaan suhu yang diambil dua meter di atas permukaan.



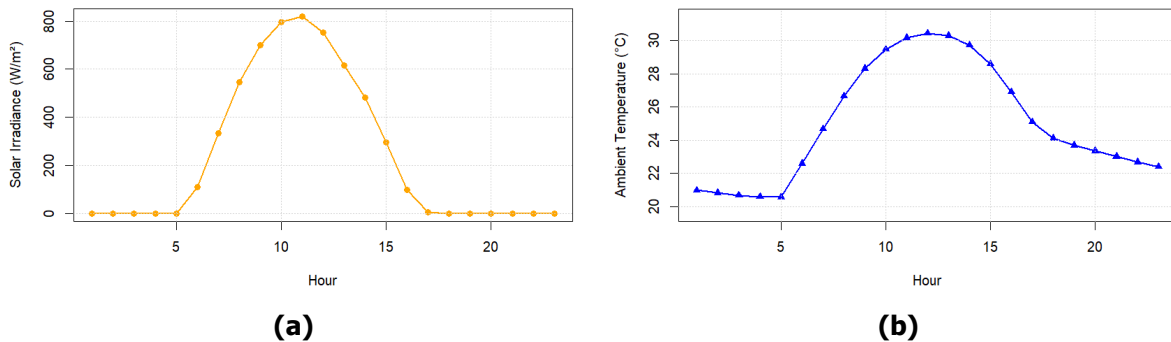
(b)

Gambar 6. (a) Diagram Alur Penelitian, (b) Diagram Sistem Panel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Lokasi Penelitian

Gambar di bawah menggambarkan tren intensitas sinar matahari dan suhu lingkungan sepanjang hari di lokasi penelitian. Pada gambar (a), intensitas sinar matahari mulai meningkat secara signifikan setelah pukul 06.00, mencapai puncaknya di atas 800 W/m^2 antara pukul 11.00 dan 12.00, sebelum menurun secara bertahap menuju nol pada sore hari. Gambar (b) menunjukkan pola serupa untuk suhu lingkungan, dimulai sekitar 21°C pada pagi hari dan mencapai puncaknya sekitar 30°C pada tengah hari.



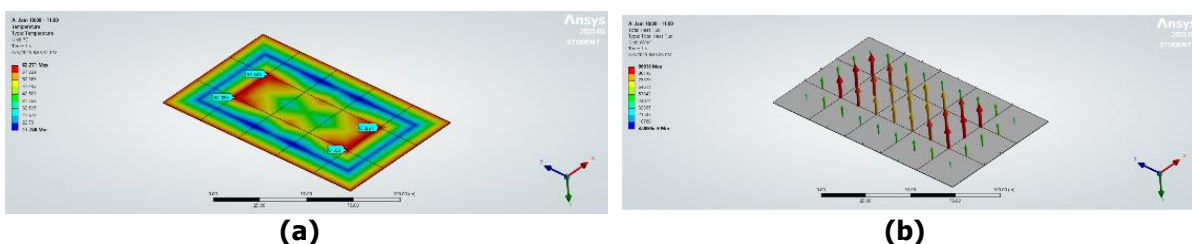
Gambar 7. (a) Grafik Perubahan tingkat Irradiasi Matahari di lokasi penelitian dalam waktu 24 Jam, (b) Grafik Perubahan di lokasi penelitian Suhu dalam waktu 24 Jam

Kedua variabel tersebut mencapai nilai tertinggi antara pukul 10:00 pagi dan 2:00 siang. Rentang waktu ini dianggap paling cocok untuk pengujian sistem, karena mencerminkan ketersediaan energi termal dan matahari yang optimal. Pemilihan interval ini memastikan sistem dievaluasi dalam kondisi paling menantang, yang esensial untuk menilai kinerja termal dan efisiensi operasionalnya dalam aplikasi dunia nyata.

3.2 Desain dan Perancangan Sistem

Fase desain sistem dalam studi ini dilakukan melalui dua langkah utama. Langkah pertama melibatkan simulasi termal menggunakan ANSYS Workbench, khususnya untuk menganalisis konsentrasi panas sisa pada permukaan bawah material. Data radiasi matahari dan suhu lingkungan digunakan sebagai parameter masukan untuk mencerminkan kondisi lingkungan yang realistis. Proses simulasi dimulai pada fase "Solution", di mana kondisi batas utama didefinisikan: data irradiansi matahari, profil suhu lingkungan, dan sifat material.

Setelah parameter masukan ditetapkan, dua jenis solusi dipilih: Suhu dan Total Fluks Panas. Hasil ini memungkinkan identifikasi wilayah terpanas pada permukaan bawah melalui pemetaan kontur suhu, yang pada gilirannya memandu penempatan optimal generator termoelektrik (TEG). Pendekatan ini memastikan bahwa desain sistem secara efisien menangkap dan memanfaatkan panas sisa yang tersedia dari permukaan bawah untuk aplikasi pemulihan energi. Hasil simulasi dan distribusi panas dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 8. (a) Hasil Simulasi Sebaran Suhu sisi Bawah Material, (b) Hasil Simulasi Energi

Gambar berikut menampilkan hasil simulasi dari ANSYS, di mana (a) menunjukkan distribusi suhu pada permukaan bawah bahan seng dan (b) menampilkan arah dan intensitas aliran panas. Hasil ini mengidentifikasi area paling efektif untuk penempatan modul termoelektrik. Berdasarkan perilaku termal ini, desain sistem dikembangkan menggunakan perangkat lunak SketchUp untuk memvisualisasikan dan mengatur modul TEG sesuai kebutuhan. Hal ini memastikan bahwa tata letak sistem akhir selaras dengan area dengan konsentrasi panas tertinggi untuk kinerja optimal.

Desain sistem berbasis SketchUp mencakup rangka struktural untuk mendukung material seng dan modul termoelektrik. Penempatan modul mengikuti hasil simulasi termal, memastikan mereka ditempatkan di area ber suhu tinggi pada permukaan bawah. Tata letak kabel juga terintegrasi ke dalam desain, menggabungkan koneksi seri dan paralel untuk mengoptimalkan keluaran tegangan dan arus. Konfigurasi ini mendukung pengiriman daya yang stabil sambil memungkinkan fleksibilitas untuk skalabilitas atau modifikasi sistem. Tata letak struktural dan listrik lengkap dapat dilihat pada gambar berikut.

3.3 Pengukuran Output Suhu

Pengukuran suhu awal dilakukan untuk menentukan perbedaan suhu pada bahan seng antara sisi panas dan sisi dingin. Hasil pengukuran tersebut dirangkum dalam tabel di bawah ini. Tabel II menampilkan data suhu untuk sisi panas masuk sebagai T_0 dan sisi dingin keluar sebagai T_1 , yang dicatat setiap 30 menit.

Tabel 2. Data Pengukuran Suhu Awal

Waktu	T_0	T_1	ΔT_1
10:00	38°C	36,55°C	1,45
10:30	38,5°C	36,55°C	1,95
11:00	38,7°C	37,90°C	0,08
11:30	40°C	38,82°C	1,18
12:00	41°C	38,82°C	2,18
12:30	42,2°C	40,40°C	1,80
13:00	42,7°C	41,07°C	1,63
13:30	39,4°C	37,27°C	2,13
14:00	38,3°C	36,38°C	1,92

Perhitungan dilakukan menggunakan data T_0 dan T_1 untuk menentukan kehilangan panas dari bahan seng. Kehilangan panas (ΔT_1) adalah selisih suhu antara input panas bahan (T_0) dan output panas (T_1). Gradien suhu ditentukan menggunakan persamaan berikut

$$\Delta T_1 = T_0 - T_1 \quad (1)$$

$$\Delta T_1 = 2,7^\circ\text{C} - 41,62^\circ\text{C} = 1,08$$

Perhitungan ΔT_1 diambil dari data suhu tertinggi, sesuai dengan hasil yang tercantum dalam Tabel II. Secara spesifik, pada pukul 13:30, suhu inlet sisi panas material (T_0) adalah 42,7°C, dan suhu outlet sisi panas (T_1) adalah 41,62°C. Gradien suhu antara kedua sisi ini adalah 1,08. Selisih suhu antara kedua sisi ini adalah 1,08. Dengan metode yang sama menggunakan termometer digital, pengukuran suhu keluaran dilakukan untuk menentukan selisih suhu antara sisi panas modul TEG (ditandai sebagai T_1) dan sisi dingin modul TEG (ditandai sebagai T_2). Selisih suhu ini ditandai sebagai ΔT_2 dan dicatat dalam tabel berikut.

Tabel 3. Data Pengukuran Suhu Lanjutan

Waktu	T_1	T_2	ΔT_2
10:00	36,55°C	32,75°C	4,77
10:30	36,55°C	33,32°C	4,42
11:00	37,90°C	33,67°C	4,62
11:30	38,82°C	34,37°C	5,02
12:00	38,82°C	34,92°C	5,45
12:30	40,40°C	35,80°C	5,82
13:00	41,07°C	35,80°C	5,82
13:30	37,27°C	34,60°C	3,85
14:00	36,38°C	36,37°C	3,67

3.4 Pengukuran Output Energi Listrik

T_0 , T_1 , dan T_2 adalah hasil pengukuran suhu selama periode pengujian. Pada saat yang sama, output energi listrik diukur dalam hal arus dan tegangan. Pengukuran ini dilakukan pada sirkuit seri dan paralel. Sirkuit seri digunakan untuk uji sistem tanpa beban guna menentukan arus, tegangan, dan daya yang dihasilkan. Tabel IV menyajikan data pengukuran untuk arus (mA), tegangan (V), dan daya (W), yang diukur setiap 30 menit. Data tersebut ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 4. Data Pengukuran Energi Listrik Pada Rangkaian Seri (Tanpa Beban)

Waktu	Arus	Tegangan	Daya
10:00	0,035	0,033	0,0012
10:30	0,050	0,382	0,0191
11:00	0,070	0,543	0,0380
11:30	0,090	0,710	0,0639
12:00	0,110	0,750	0,0825
12:30	0,075	0,650	0,0488
13:00	0,058	0,480	0,0278
13:30	0,058	0,410	0,238
14:00	0,041	0,303	0,0124

Hasil pengujian tanpa beban menunjukkan peningkatan nilai keluaran baik untuk arus maupun tegangan, mencapai puncaknya pada pukul 12:00. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mulai menyerap panas secara optimal pada rentang waktu tersebut. Daya dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P = V \cdot I \quad (2)$$

$$P = 0,750 \cdot 0,110 = 0,0825$$

Perhitungan daya didasarkan pada energi keluaran tertinggi sesuai dengan hasil pengukuran pada Tabel IV. Secara spesifik, perhitungan dilakukan pada pukul 12:00 dengan arus 0,110 mA dan tegangan 0,750 V, menghasilkan daya yang dihasilkan sebesar 0,0825 W. Uji sistem tanpa beban juga dilakukan pada rangkaian paralel untuk membandingkan hasil keluaran dengan rangkaian seri. Tabel V di bawah ini menunjukkan hasil arus, tegangan, dan daya keluaran pada interval 30 menit untuk menentukan keluaran energi konfigurasi ini. Daya tertinggi yang tercatat adalah pada pukul 10:30 malam, sebesar 0,0066 W. Secara keseluruhan, keluaran daya dari sirkuit paralel lebih kecil daripada sirkuit seri.

Tabel 5. Data Pengukuran Energi Listrik Pada Rangkaian Paralel (Tanpa Beban)

Waktu	Arus	Tegangan	Daya
10:00	0,020	0,280	0,0056
10:30	0,022	0,300	0,0066
11:00	0,016	0,137	0,002192
11:30	0,021	0,190	0,00399
12:00	0,020	0,190	0,0038
12:30	0,015	0,134	0,00201
13:00	0,013	0,145	0,001885
13:30	0,014	0,149	0,002086
14:00	0,012	0,112	0,001344

Selain melakukan pengukuran pada kondisi tanpa beban pada rangkaian seri dan paralel, pengujian juga melakukan pengukuran pada output energi listrik rangkaian paralel dan seri dengan beban tambahan 1 Ω LED. Pada rangkaian seri, sistem koneksi diatur persis seperti pada pengujian sebelumnya. Beban LED dihubungkan ke setiap output positif-negatif. Hasil pengukuran ditampilkan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 6. Data Pengukuran Energi Listrik Pada Rangkaian Seri (Dengan Beban)

Waktu	Arus	Tegangan	Daya
10:00	0,020	0,286	0,00572
10:30	0,040	0,330	0,0132
11:00	0,059	0,490	0,02891
11:30	0,085	0,630	0,05355
12:00	0,080	0,730	0,0584
12:30	0,061	0,573	0,034953
13:00	0,054	0,445	0,02403
13:30	0,050	0,445	0,02225
14:00	0,036	0,297	0,010692

Berdasarkan tabel di atas, output bahan seng diketahui. Misalnya, ketika ΔT_2 mencapai puncaknya pada pukul 12:00, daya output modul termoelektrik adalah 0,0584 mW. Daya output dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P = V \cdot I \quad (3)$$

$$P = 0,730 \cdot 0,080 = 0,0584$$

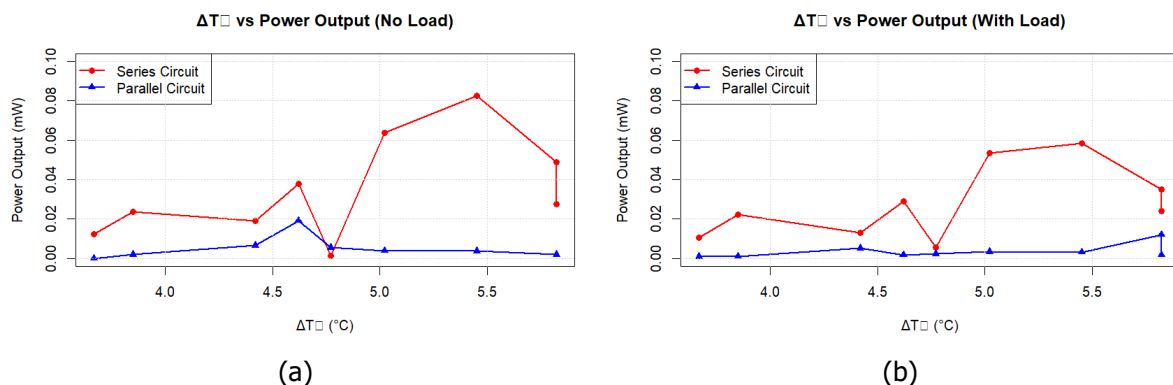
Berdasarkan hasil pada Tabel VI, output sistem saat beban mencapai nilai tertinggi pada pukul 12:00 dengan daya 0,0584 mW, yang dihasilkan dari arus 0,0730 mA dan tegangan 0,800 V. Dibandingkan dengan uji tanpa beban, yang mencapai puncak 0,0825 mW, adanya beban menyebabkan penurunan daya yang sedikit akibat konsumsi energi oleh LED. Meskipun demikian, sistem tetap berfungsi dengan andal di bawah beban, menunjukkan konversi termal ke listrik yang stabil. Tren peningkatan menuju tengah hari mengonfirmasi penyerapan panas optimal selama periode ini. Meskipun output daya lebih rendah daripada kondisi tanpa beban, sistem tetap efektif untuk pengumpulan energi berdaya rendah. Uji sebelumnya menunjukkan peningkatan nilai seng, mencapai puncak ΔT_2 . Seperti pada uji tanpa beban, hal ini dicapai dengan mengubah sirkuit dari seri ke paralel dan ditunjukkan di bawah ini.

Tabel 7. Data Pengukuran Energi Listrik Pada Rangkaian Paralel (Dengan Beban)

Waktu	Arus	Tegangan	Daya
10:00	0,014	0,161	0,002254
10:30	0,019	0,274	0,005206
11:00	0,014	0,126	0,001764
11:30	0,019	0,183	0,003477
12:00	0,018	0,183	0,003294
12:30	0,012	0,106	0,01217
13:00	0,013	0,140	0,00182
13:30	0,013	0,140	0,00182
14:00	0,009	0,095	0,000855

4.1 Analisis Perbedaan Suhu dan Energi Listrik

Perbedaan suhu di kedua sisi generator termoelektrik (ΔT_2) secara langsung memengaruhi kemampuannya untuk menghasilkan listrik melalui efek Seebeck. Perbedaan suhu yang lebih tinggi (ΔT_2) umumnya menghasilkan output tegangan yang lebih tinggi, menjadikannya faktor kunci dalam konversi energi termal menjadi energi listrik. Bagian ini membahas bagaimana perubahan ΔT_2 berkorelasi dengan output daya sistem. Hubungan ini digambarkan dalam grafik berikut.



Gambar 9. (a) Grafik Perbandingan Keluaran Daya Dalam Kondisi Tanpa Beban Pada Kedua Rangkaian Terhadap Perbedaan Suhu, (b) Grafik Perbandingan Keluaran Daya Dalam Kondisi Dengan Beban Pada Kedua Rangkaian Terhadap Perbedaan Suhu

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara selisih suhu (ΔT_2) dan output daya untuk sirkuit seri dan paralel, baik dalam kondisi tanpa beban maupun dengan beban. Dalam kedua kasus, konfigurasi seri secara konsisten menghasilkan output daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi paralel. Seiring dengan peningkatan ΔT_2 , output daya juga meningkat, mengonfirmasi pengaruh Efek Seebeck. Namun, ketika beban diterapkan, output daya sedikit berkurang karena energi yang dikonsumsi. Hasil ini menyoroti kemampuan sistem untuk merespons secara konsisten terhadap masukan termal di bawah kondisi sirkuit yang berbeda.

Analisis Output Energi Listrik

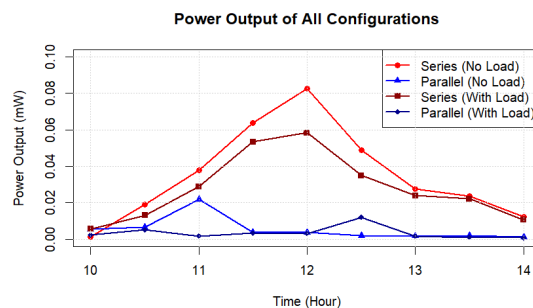
Bagian ini menyajikan analisis perbandingan output daya listrik yang dihasilkan oleh sistem termoelektrik dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban. Pengukuran dilakukan antara pukul 10:00 dan 14:00, sesuai dengan aktivitas termal puncak berdasarkan data sebelumnya.

Tujuan utama adalah mengevaluasi bagaimana sistem merespons konfigurasi listrik yang berbeda—seri dan paralel—di bawah gradien termal yang bervariasi. Perbandingan ini

menyoroti konsistensi kinerja sistem dan kemampuannya untuk mengubah panas sisa menjadi daya yang berguna. Analisis ini juga mendukung validasi desain berdasarkan fase simulasi dan pengaturan sebelumnya.

Analisis Efisiensi TEG

Bagian ini menyajikan analisis perbandingan output daya listrik yang dihasilkan oleh sistem termoelektrik dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban. Pengukuran dilakukan antara pukul 10:00 dan 14:00, sesuai dengan aktivitas termal puncak berdasarkan data sebelumnya. Tujuan utama adalah mengevaluasi bagaimana sistem merespons konfigurasi listrik yang berbeda—seri dan paralel—di bawah gradien termal yang bervariasi. Perbandingan ini menyoroti konsistensi kinerja sistem dan kemampuannya untuk mengubah panas sisa menjadi daya yang berguna. Analisis ini juga mendukung validasi desain berdasarkan fase simulasi dan pengaturan sebelumnya.



Gambar 10. Perbandingan Keluaran dari Keseluruhan Rangkaian dan Kondisi

Gambar diatas menunjukkan output daya dari semua konfigurasi yang diuji. Sirkuit seri tanpa beban mencapai nilai tertinggi, dengan puncak 0,0825 mW. Meskipun output menurun sedikit saat ada beban, tren keseluruhan tetap konsisten. Konfigurasi paralel menghasilkan daya yang lebih rendah tetapi menunjukkan perilaku yang stabil. Hasil ini mengonfirmasi responsivitas sistem terhadap masukan panas dan efisiensi rendah yang khas pada generator termoelektrik. Untuk mengevaluasi kinerja lebih lanjut, laju transfer panas ke TEG dihitung, diikuti dengan efisiensi listrik sistem. Persamaan yang sesuai disajikan di bawah ini.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

$$= -116 \times 0,0016 \times \frac{5,82}{0,002}$$

$$= -116 \times 0,0016 \times 2910 = 540,10$$

$$\eta = \frac{V \cdot I}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

$$= \frac{0,650 \times 0,075}{540,10} \times 100\%$$

$$= 0,00009027 \times 100\% = 0,0090\%$$

Persamaan pertama menghitung laju transfer panas melalui konduksi menggunakan gradien suhu melintasi TEG. Dengan nilai konduktivitas termal, luas, dan ketebalan yang diketahui, panas masuk diperkirakan sebesar 540,10 W.

Nilai ini kemudian digunakan dalam persamaan kedua untuk menentukan efisiensi TEG, menghasilkan 0,0090%. Meskipun rendah, nilai ini sesuai dengan kinerja tipikal generator termoelektrik dalam aplikasi pemulihan panas berdaya rendah.

Tabel 8. Ringkasan Data Pengukuran dan Efisiensi Modul TEG

WAKTU	PENGUKURAN SUHU LANJUTAN		ΔT_2	ENERGI PANAS (Q)	Daya (W)		EFISIENSI (%)	
	T ₁	T ₂			SERI	PARALLEL	SERI	PARALLEL
KONDISI TANPA BEBAN								
10:00	37,52	32,75	4,77	442.65	0,0012	0,0056	0.000271	0.001265
10:30	37,75	33,32	4,42	409.77	0,0191	0,0066	0.004661	0.00161
11:00	38,30	33,67	4,62	428.73	0,0380	0.002192	0.008863	0.000511
11:30	39,40	34,37	5,02	465.85	0,0639	0,00399	0.013716	0.000856
12:00	40,37	34,92	5,45	505.76	0,0825	0,0038	0.016312	0.000751
12:30	41,62	35,80	5,82	540.10	0,0488	0,00201	0.009035	0.000372
13:00	41,62	35,80	5,82	540.10	0,0278	0,001885	0.005147	0.000349
13:30	38,45	34,60	3,85	357.28	0,238	0,002086	0.066614	0.000584
14:00	37,72	36,37	3,67	340.57	0,0124	0,001344	0.003641	0.000394
KONDISI DENGAN BEBAN								
10:00	37,52	32,75	4,77	442.65	0,00572	0,002254	0.001292	0.000509
10:30	37,75	33,32	4,42	409.77	0,0132	0,005206	0.003221	0.001270
11:00	38,30	33,67	4,62	428.73	0,02891	0,001764	0.006743	0.000411
11:30	39,40	34,37	5,02	465.85	0,05355	0,003477	0.011495	0.000746
12:00	40,37	34,92	5,45	505.76	0,0584	0,003294	0.011547	0.000651
12:30	41,62	35,80	5,82	540.10	0,034953	0,01217	0.006471	0.002253
13:00	41,62	35,80	5,82	540.10	0,02403	0,00182	0.004449	0.000337
13:30	38,45	34,60	3,85	357.28	0,02225	0,00182	0.006227	0.000509
14:00	37,72	36,37	3,67	340.57	0,010692	0,000855	0.003140	0.000251

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan menganalisis performa sistem Solar Thermoelectric Generator (STEG) berbasis material seng untuk pemanfaatan energi panas matahari pada kondisi suhu tropis. Metode yang digunakan mencakup pendekatan eksperimental serta simulasi termal menggunakan ANSYS untuk mengevaluasi distribusi suhu dan efisiensi konversi energi. Sistem dirancang dengan konfigurasi TEG secara seri dan paralel, serta dilengkapi insulasi termal guna mempertahankan perbedaan suhu antar sisi modul. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa ΔT maksimum sebesar 5,82°C dicapai pada siang hari, dan konfigurasi seri menghasilkan output daya tertinggi yaitu 0,0825 mW tanpa beban dan efisiensi konversi maksimum sebesar 0,0090%. Konfigurasi paralel menunjukkan output yang jauh lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas sistem STEG sangat dipengaruhi oleh stabilitas gradien suhu dan konfigurasi sambungan modul. Temuan utama dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan material seng sebagai absorber panas cukup efektif, dan sistem STEG mampu beroperasi meskipun pada temperatur rendah, yang merupakan karakteristik penting untuk wilayah tropis. Kebaruan dari studi ini terletak pada integrasi sistem panel berbahan seng dalam aplikasi energi terbarukan skala kecil, serta pembuktian efisiensi kerja TEG dalam kondisi variatif suhu harian secara eksperimental dan numerik.

DAFTAR RUJUKAN

- Bizzy, Irwin. 2022. *Buku Ajar Modul Termoelektrik Teori Dan Aplikasi*. Palembang: CV. Amanah.
- Cengel, Yunus A. 2022. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application*. 5th ed. McGraw-Hill Education.
- ESDM, Kementerian. 2021. *Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- ESDM, Kementerian. 2023. *Statistik EBTKE 2023*. Jakarta: Direktorat Jenderal EBTKE.
- Fatimah, T., M. Arifin, and R. Nugroho. 2019. Kajian Energi Terbarukan: Pemanfaatan Energi Panas Surya Di Indonesia. *Jurnal Energi Dan Lingkungan*, 13(2):89–97.
- Gomaa, M. R., and H. Rezk. 2024. Passive Cooling System for Enhancement the Energy Conversion Efficiency of Thermo-Electric Generator. *Energy Reports*, 6, 176–84.
- Huda, M. N., S. Santosa, and A. R. Prabowo. 2023. Kinerja Modul Termoelektrik Pada Perbedaan Suhu Rendah Untuk Pembangkit Energi Mini. *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(1):45–52.
- IESR. 2023. *Indonesia Energy Transition Outlook 2024*. Institute for Essential Services Reform.
- IRENA. 2024. *Renewable Capacity Statistics 2024*. International Renewable Energy Agency.
- Javed, M. Y., A. B. Asghar, K. Naveed, and A. Nasir. n.d. "Improving the Efficiency of Photovoltaic-Thermoelectric Generator System Using Novel Flying Squirrel Search Optimization Algorithm. *Process Safety and Environmental Protection*.
- Jouhara, H., and Q. Doraghi. 2024. Thermoelectric Generator Efficiency: An Experimental and Computational Approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 43(10), 1088.
- Prawira, B. D., W. Hadi, and M. Taufik. 2022. Analisis Efisiensi Thermoelectric Generator Pada Konversi Energi Panas." *Jurnal Rekayasa Energi*, 8(1), 55–64.
- Putra, H. R., A. Kurniawan, and M. Azam. 2021. Eksperimen Penggunaan Panel Termoelektrik Untuk Pemanfaatan Energi Panas. *Jurnal Teknik Mesin*, 19(2), 112–20.
- Ramadhan, R. Y., and H. Siregar. 2021. Potensi Energi Panas Di Wilayah Perkotaan Dan Implikasinya Terhadap Sistem Energi Terbarukan. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), A146–51.
- Riyadi, A., and A. W. Prasetyo. 2022. Metode Eksperimen Dalam Pengujian Efisiensi Termal Sistem Hybrid. *Jurnal Teknologi Energi*, 6(1), 23–30.
- Santoso, H., P. Widodo, and R. Handayani. 2021. Efektivitas Penggunaan Permukaan Bangunan Untuk Pemanenan Energi Matahari. *Jurnal Arsitektur Dan Lingkungan Binaan* 7(1), 33–42.

- Supriadi, R., T. Gunawan, and F. Rahmat. 2020. Penerapan Metode Eksperimen Pada Sistem Energi Skala Kecil Berbasis Panas. *Jurnal Energi Terbarukan*, 9(3), 145–53.
- Wahyudi, T., and Y. Pradana. 2020. Strategi Pemanfaatan Energi Surya Dalam Mendukung Ketahanan Energi Nasional. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 26(2), 157–72.
- Zhou, S., J. Liu, and G. Chen. 2017. Recent Advances in Thermoelectric Materials for Energy Harvesting. *Advanced Materials*, 29(38).