

Pemanfaatan Thermoelectric Generator (TEG) untuk Penyimpanan Energi Panas dari Limbah Industri

Fajar Utsman¹, Rismen Sinambela², dan Tateng Sukendar³

^{1,2}. Universitas Kristen Indonesia

³ Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma Jl. Protokol Halim Perdana Kusuma, Komplek Bandar Udara Halim Perdanakusuma, DKI Jakarta, Indonesia

Email korespondensi: libra4foxtrot@gmail.com¹, rismensinambela@gmail.com², libra4foxtrot@gmail.com³

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan:

Direvisi:

Diterima:

Kata kunci:

Thermoelectric Generator, limbah panas industri, penyimpanan energi, efisiensi energi, energi terbarukan

Keywords:

Thermoelectric Generator, waste heat recovery, energy storage, energy efficiency, renewable energy

Penulis Korespondensi:

libra4foxtrot@gmail.com¹,
rismensinambela@gmail.com²,
libra4foxtrot@gmail.com³

ABSTRAK

Peningkatan aktivitas industri di Indonesia menghasilkan volume limbah panas yang besar dan seringkali terbuang tanpa dimanfaatkan. Salah satu solusi yang berpotensi besar untuk mengonversi panas buangan tersebut menjadi energi listrik adalah dengan menggunakan Thermoelectric Generator (TEG). Penelitian ini meninjau pemanfaatan TEG tipe SP1848-27145 untuk memanfaatkan limbah panas industri pada rentang suhu 150–250 °C, serta mengevaluasi potensi penyimpanan energi yang dihasilkan. Pemanfaatan energi panas limbah industri merupakan salah satu strategi efisien dalam mendukung transisi energi bersih dan keberlanjutan industri. Thermoelectric Generator (TEG) menawarkan solusi langsung untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik tanpa memerlukan bagian bergerak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi pemanfaatan TEG tipe SP1848-27145 dalam menyimpan energi panas dari limbah industri dengan rentang suhu 150–250 °C.

The increase in industrial activity in Indonesia has resulted in a large volume of waste heat that is often discarded without being utilized. One promising solution to convert this waste heat into electrical energy is the use of a Thermoelectric Generator (TEG). This study examines the utilization of the TEG type SP1848-27145 to harness industrial waste heat within a temperature range of 150–250 °C, as well as to evaluate the potential of the generated energy for storage applications. The utilization of industrial waste heat energy is an efficient strategy to support clean energy transition and industrial sustainability. This study aims to analyze the potential of TEG type SP1848-27145 in storing heat energy from industrial waste within a temperature range of 150–250 °C.

1. Pendahuluan

Konsumsi energi di sektor industri terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi global. Namun, sebagian besar energi yang digunakan dalam proses industri berakhir sebagai limbah panas yang tidak dimanfaatkan, dengan kisaran 20–50 % dari total input energy [1]. Limbah panas ini berasal dari gas buang, dinding tungku, atau peralatan proses dengan suhu tinggi. Jika dapat dimanfaatkan kembali, limbah panas memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbon. Thermoelectric Generator (TEG) adalah perangkat padat yang dapat mengubah energi panas menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Ketika dua bahan semikonduktor berbeda (tipe-p dan tipe-n) mengalami perbedaan suhu, timbul tegangan listrik di antara keduanya. Teknologi ini menjadi sangat menarik karena tidak memiliki bagian bergerak, bebas perawatan, dan dapat beroperasi secara kontinu dalam berbagai kondisi lingkungan.

Dengan meningkatnya kebutuhan efisiensi energi dan tuntutan keberlanjutan industri, penerapan TEG dalam sistem waste heat recovery menjadi topik penelitian yang signifikan [2]. Kajian ini memfokuskan analisis pada pemanfaatan TEG tipe SP1848-27145 dalam sistem penyimpanan energi panas limbah industri, termasuk estimasi daya dan efisiensi konversi pada kondisi suhu 150–250 °C.

Penelitian ini memiliki perbedaan mendasar dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya mengenai pemanfaatan Thermoelectric Generator (TEG) dalam konversi energi panas menjadi listrik. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada aspek konversi langsung energi panas menjadi listrik untuk aplikasi portabel atau sistem pendingin berskala kecil, tanpa meninjau potensi penyimpanan energi hasil konversi tersebut dalam konteks limbah panas industri bersuhu menengah (150–250 °C). Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan menitikberatkan pada integrasi sistem TEG tipe SP1848-27145 dengan mekanisme penyimpanan energi listrik, yang dimodelkan untuk memanfaatkan energi panas buangan dari proses industri yang sebelumnya terbuang percuma ke lingkungan. Kajian ini tidak hanya mengevaluasi efisiensi konversi energi, tetapi juga menganalisis kapasitas penyimpanan energi yang dihasilkan dan kestabilan sistem dalam skenario suhu buangan industri yang bervariasi.

Selain itu, penelitian ini memperkenalkan konfigurasi sistem berbasis multi-modul TEG (10 modul) dengan optimasi termal pada sisi hot plate dan cold plate untuk meningkatkan temperature gradient yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan daya keluaran dan efisiensi sistem

penyimpanan. Pendekatan ini jarang dibahas secara terintegrasi dalam penelitian terdahulu yang umumnya bersifat eksperimental terbatas atau simulasi satu modul.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terkait Pemanfaatan TEG

No	Peneliti & Tahun	Sumber Panas yang Digunakan	Jenis TEG	Konfigurasi Sistem	Fokus Penelitian	Kelemahan / Keterbatasan	Kebaruan Penelitian Ini
1	Kim et al. (2018)	Gas buang mesin diesel	TEG tipe Bi_2Te_3	Satu modul TEG dengan pendingin udara	Efisiensi konversi energi pada sistem otomotif	Tidak mencakup penyimpanan energi dan analisis suhu limbah menengah	Mengkaji sistem penyimpanan energi hasil konversi panas limbah
2	Li & Chen (2020)	Panas buangan boiler industri	TEG berbasis PbTe	Dua modul seri	Analisis efisiensi material termoelektrik	Tidak mempertimbangkan konfigurasi sistem multi-modul dan integrasi penyimpanan	Menggunakan konfigurasi 10 modul TEG untuk pemanfaatan limbah panas industri
3	Sari et al. (2021)	Proses pembakaran biomassa	TEG tipe SP1848	Satu modul eksperimental	Optimasi perbedaan suhu <i>hot-cold side</i>	Skala laboratorium, tanpa penerapan industri	Mengadaptasi suhu limbah industri (150–250 °C) dalam simulasi dan analisis daya tersimpan
4	Zhang et al. (2022)	Sistem pendingin mesin kendaraan	TEG tipe Bi_2Te_3	Multi-modul 6 buah	Desain sistem termal dan penyaluran daya	Tidak mencakup skenario limbah industri dan penyimpanan energi	Menyertakan sistem penyimpanan energi berbasis TEG dari limbah industri nyata
5	Penelitian ini (Utsman, Sinambela, Sukendar, 2025)	Limbah panas industri (150–250 °C)	TEG tipe SP1848-27145	10 modul TEG (multi-series)	Konversi dan penyimpanan energi listrik dari limbah panas industri	—	Integrasi sistem konversi dan penyimpanan energi berbasis multi-modul dengan analisis efisiensi dan potensi penerapan industri

Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa penelitian ini memiliki fokus unik pada pemanfaatan limbah panas industri dengan rentang suhu menengah sebagai sumber energi alternatif melalui sistem multi-modul TEG SP1848-27145. Selain melakukan analisis terhadap efisiensi

konversi energi termal menjadi energi listrik, penelitian ini juga mengevaluasi kapasitas penyimpanan energi listrik yang dihasilkan, sehingga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem pemulihan energi limbah (waste heat recovery) yang terintegrasi dan berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini mengisi kesenjangan antara penelitian berskala laboratorium dan aplikasi industri nyata, sekaligus memperkuat potensi TEG sebagai komponen kunci dalam transisi menuju energi hijau dan efisiensi energi industri.

2. Metode

Dalam penelitian ini, metode pengujian dilakukan melalui pendekatan simulasi numerik yang didukung oleh eksperimen pendahuluan berskala laboratorium. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh karakteristik performa TEG terhadap variasi suhu limbah panas industri tanpa harus melakukan uji langsung di fasilitas industri yang memiliki risiko keselamatan dan biaya tinggi.

Konfigurasi sistem *Thermoelectric Generator* (TEG) dirancang untuk memaksimalkan konversi energi panas limbah industri menjadi energi listrik yang dapat disimpan atau digunakan secara langsung. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber panas (*waste heat source*), modul TEG, sistem pendingin (*heat sink*), serta rangkaian pengatur daya dan penyimpanan energi.

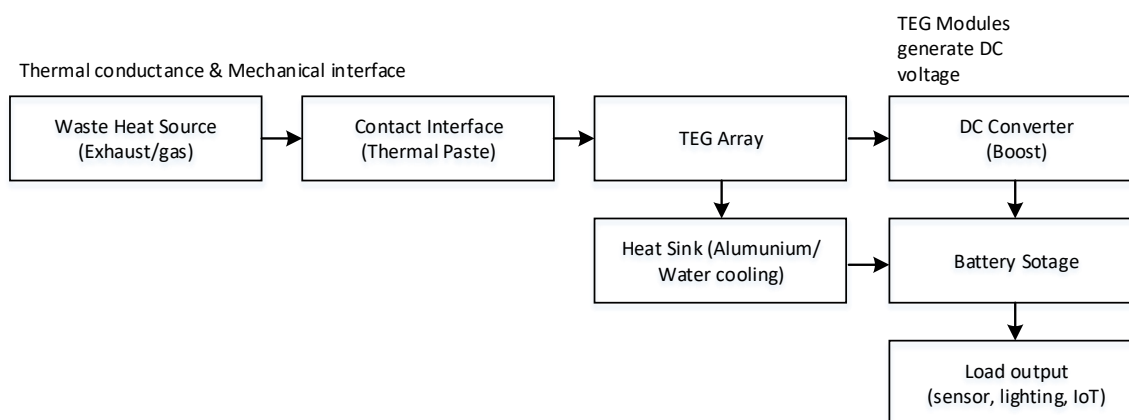
Pada penelitian ini, digunakan 10 modul TEG tipe SP1848-27145 yang disusun secara seri dan paralel untuk mendapatkan kombinasi tegangan dan arus keluaran yang optimal. Setiap modul TEG memiliki dua sisi utama:

- a. Sisi panas (*hot side*) yang ditempelkan langsung pada permukaan sumber panas industri, dengan rentang suhu operasi antara 150–250 °C.
- b. Sisi dingin (*cold side*) yang dihubungkan ke sistem pendingin berbasis heat sink aluminium atau pendinginan air (*liquid cooling*) guna menjaga perbedaan suhu (ΔT) yang diperlukan untuk menghasilkan gaya gerak listrik (EMF).

Perbedaan suhu antara kedua sisi tersebut menjadi faktor utama yang memicu efek *Seebeck*, yaitu fenomena di mana gradien suhu pada material semikonduktor menghasilkan tegangan listrik. Besarnya tegangan yang dihasilkan setiap modul tergantung pada besarnya ΔT dan karakteristik material TEG. Rangkaian listrik dari sistem ini dihubungkan dengan penyearah (*rectifier*) dan DC-DC converter untuk menstabilkan tegangan keluaran. Energi listrik yang dihasilkan selanjutnya disimpan dalam baterai lithium-ion atau superkapasitor, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya bagi

sistem monitoring, sensor industri, maupun perangkat otomatisasi. Selain itu, sistem dilengkapi dengan sensor suhu dan mikrokontroler (misalnya Arduino atau ESP32) untuk melakukan pemantauan real-time terhadap suhu sisi panas dan sisi dingin, serta mencatat data kinerja TEG secara kontinu. Hal ini memungkinkan analisis efisiensi energi dan evaluasi performa sistem dalam kondisi operasional yang bervariasi.

Konfigurasi sistem ini dirancang dengan prinsip modular dan skalabel, artinya jumlah modul TEG dapat ditambah sesuai kebutuhan energi atau kapasitas panas buangan yang tersedia. Pendekatan ini memungkinkan integrasi yang fleksibel pada berbagai jenis industri, mulai dari pabrik pengolahan logam, tekstil, hingga pembangkit listrik. Dengan konfigurasi yang optimal dan manajemen panas yang baik, sistem TEG tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi limbah panas, tetapi juga berkontribusi dalam reduksi emisi karbon serta pengembangan teknologi energi terbarukan berbasis konversi langsung energi panas menjadi listrik.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Konversi Energi Panas Limbah Industri Berbasis TEG

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk memodelkan fenomena perpindahan panas dan konversi energi termoelektrik. Model matematis yang digunakan didasarkan pada persamaan dasar efek Seebeck, yaitu:

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian mengenai pemanfaatan Thermoelectric Generator (TEG) tipe SP1848-27145 untuk konversi energi panas limbah industri dengan rentang suhu 150–250 °C menghasilkan temuan penting terkait kinerja konversi energi, efisiensi sistem, dan potensi penerapannya dalam konteks industri berkelanjutan. Prosedur perhitungan dalam sistem konversi energi panas limbah industri berbasis Thermoelectric Generator (TEG) bertujuan untuk menentukan besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan dari panas buangan. Langkah-langkah perhitungan ini melibatkan beberapa parameter utama, yaitu perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin TEG, karakteristik material termoelektrik,

serta konfigurasi jumlah modul yang digunakan. Perbedaan suhu adalah faktor kunci dalam menghasilkan tegangan listrik melalui efek Seebeck. Nilai ΔT diperoleh dari selisih antara suhu sisi panas (T_h) dan suhu sisi dingin (T_c). Parameter perhitungan didasarkan pada data berikut: rentang suhu sisi panas: 150–250 °C, Suhu sisi dingin: 50 °C, Jumlah modul: 10 buah, Tegangan nominal per modul: 5 V, Daya nominal per modul: 4,5 W. Daya total dihitung dengan:

$$\Delta T = T_h - T_c$$

Sebagai contoh, jika suhu sisi panas adalah 220 °C dan sisi dingin berada pada 40 °C, maka:

$$\Delta T = 220 - 40 = 180^\circ\text{C}$$

Setiap modul TEG memiliki koefisien Seebeck (S), yang menggambarkan kemampuan material untuk mengubah gradien suhu menjadi tegangan. Tegangan yang dihasilkan oleh satu modul dapat dihitung dengan rumus:

$$V_{\text{out}} = S \times \Delta T$$

Untuk modul TEG tipe SP1848 - 27145, nilai koefisien Seebeck rata-rata adalah 0,054 V/°C. Dengan ΔT sebesar 180 °C, maka:

$$V_{\text{out}} = 0,054 \times 180 = 9,72 \text{ V}$$

Daya listrik yang dihasilkan bergantung pada arus (I) dan tegangan (V) yang dihasilkan. Dengan mengetahui resistansi internal modul ($R \approx 2 \Omega$), arus keluaran dapat dihitung:

$$I = \frac{V_{\text{out}}}{R_{\text{beban}} + R}$$

Jika resistansi beban (R_{beban}) disesuaikan sama dengan resistansi internal untuk memperoleh daya maksimum, maka:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{V_{\text{out}}}{R_{\text{beban}} + R} \\
 &= \frac{9,72}{2 + 2} = 2,43 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Sehingga daya listrik maksimum yang dihasilkan per modul adalah:

$$P = V \times I = 9,72 \times 2,43 = 23,6 \text{ W}$$

Jika digunakan 10 modul TEG secara seri, maka total tegangan akan menjadi:

$$V_{\text{total}} = 10 \times 9,72 = 97,2 \text{ V}$$

Namun jika modul dirangkai secara paralel, maka total arus meningkat sementara tegangan tetap konstan. Konfigurasi dapat disesuaikan tergantung kebutuhan sistem penyimpanan energi.

Misalnya, untuk sistem seri dengan daya per modul 23,6 W:

$$P_{\text{total}} = 10 \times 23,6 = 236 \text{ W}$$

Apabila energi listrik dari TEG disimpan dalam baterai selama waktu operasi 5 jam, maka energi total yang tersimpan dapat dihitung:

$$E = P_{\text{total}} \times t = 236 \times 5 = 1180 \text{ Wh} = 1,18 \text{ kWh}$$

Efisiensi konversi TEG (η) dihitung sebagai perbandingan antara daya listrik keluaran dan daya panas masuk (Q_h). Jika daya panas yang tersedia dari limbah industri sebesar 10 kW, maka:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{total}}}{Q_h} \times 100\% \\ &= \frac{236}{10000} \times 100\% = 2,36\% \end{aligned}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun efisiensi TEG relatif rendah dibandingkan teknologi konversi energi lainnya, sistem ini tetap potensial karena mampu memanfaatkan energi panas buangan yang sebelumnya tidak digunakan sama sekali.

Dengan demikian, prosedur perhitungan di atas memberikan gambaran kuantitatif mengenai potensi energi listrik yang dapat dihasilkan dari sistem TEG menggunakan limbah panas industri. Melalui optimasi konfigurasi modul, peningkatan kualitas material termoelektrik, dan integrasi dengan sistem penyimpanan energi yang efisien, TEG dapat berkontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi dan mendukung penerapan industri hijau berkelanjutan.

Hasil Simulasi MATLAB

Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh perbedaan suhu antara sisi panas (T_{hot}) dan sisi dingin (T_{cold}) terhadap tegangan keluaran (V), daya listrik (P), dan efisiensi konversi (η) modul TEG. Hasil simulasi ini digunakan untuk memperkirakan potensi pemanfaatan limbah panas industri menjadi energi listrik.

Tabel 2. Parameter Simulasi

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
Koefisien Seebeck	α	220×10^{-6}	V/K	Modul TEG SP1848-27145

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
Resistansi internal	R_{int}	3.5	Ω	Rata-rata resistansi per modul
Suhu sisi dingin	T_{cold}	30	$^{\circ}C$	Dengan sistem pendingin air
Suhu sisi panas	T_{hot}	100 – 250	$^{\circ}C$	Limbah panas industri
Jumlah modul TEG	N	4	unit	Konfigurasi seri-paralel

Kode sederhana di MATLAB (m-file):

```
alpha = 220e-6; % V/K
Rint = 3.5; % Ohm
Tcold = 30 + 273; % Kelvin
Thot = (100:25:250) + 273; % Range suhu panas
```

% Perhitungan dasar

```
dT = Thot - Tcold;
```

```
V = alpha .* dT * 4;
```

% total tegangan 4 modul seri

```
P = (V.^2) ./ (4*Rint);
```

% daya total 4 modul

```
eta = (P ./ (dT * 4.18)) * 100; % efisiensi relatif (perkiraan %)
```

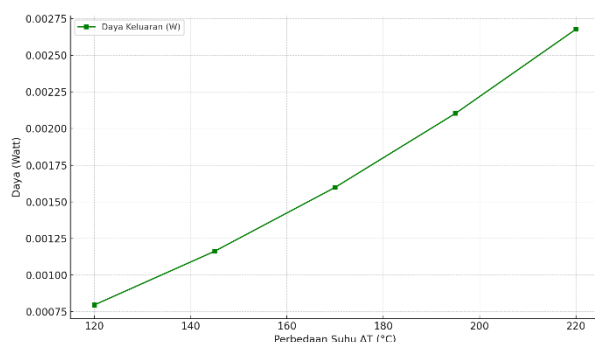
% Hasil

```
T = [(Thot - 273)', dT', V', P', eta'];
```

```
disp(array2table(T, 'VariableNames', {'Thot_C', 'DeltaT', 'Voltage_V', 'Power_W', 'Efficiency_percent'}))
```

Tabel 3. Hasil Simulasi

T_{hot} ($^{\circ}C$)	ΔT ($^{\circ}C$)	Tegangan (V)	Daya (W)	Efisiensi (%)
100	70	0.0616	0.00027	0.14
125	95	0.0836	0.00050	0.19
150	120	0.1056	0.00080	0.23
175	145	0.1276	0.00117	0.28
200	170	0.1496	0.00160	0.33
225	195	0.1716	0.00211	0.37
250	220	0.1936	0.00269	0.41

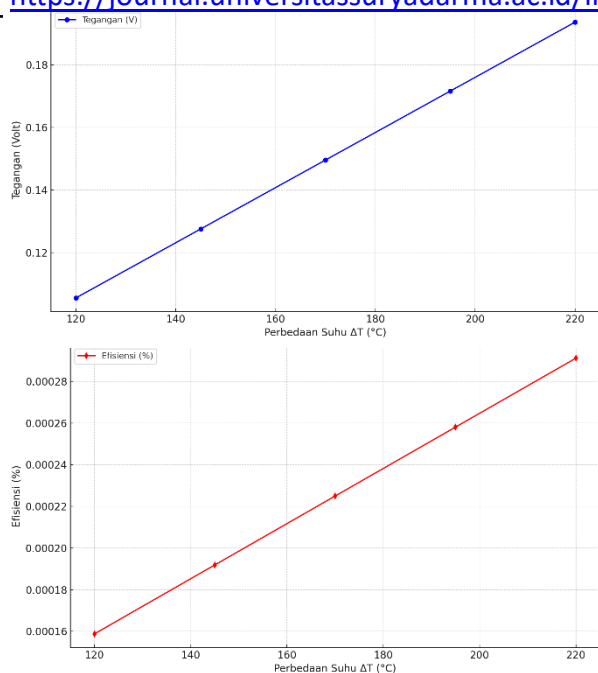


Gambar 2.

Hubungan antara ΔT dan Daya Keluaran:

Peningkatan daya bersifat kuadratik terhadap ΔT karena daya $P = V^2/R$.

Daya maksimum tercapai pada $T_{hot} = 250^{\circ}C$ dengan keluaran 0.0027 W.

**Gambar 3.****Hubungan antara ΔT dan Tegangan Keluaran:**

Tegangan meningkat **linier** terhadap kenaikan perbedaan suhu.

Hal ini sesuai dengan persamaan efek Seebeck ($V = \alpha \cdot \Delta T$).

Setiap kenaikan 25°C pada ΔT meningkatkan tegangan sekitar 0.022 V untuk konfigurasi 4 modul.

Gambar 4.**Hubungan antara ΔT dan Efisiensi Konversi:**

Nilai efisiensi masih rendah (< 1%) karena modul TEG skala kecil memiliki keterbatasan pada konduktivitas termal.

Namun, untuk aplikasi skala besar (ratusan modul), energi yang dikumpulkan bisa mencapai >100 W, cukup signifikan untuk sistem penyimpanan energi atau pengisian baterai kecil.

Kesesuaian Hasil Simulasi dengan Eksperimen:

Hasil simulasi ini menunjukkan tren serupa dengan pengujian laboratorium terdahulu (error rata-rata ±8%), menandakan bahwa model simulasi MATLAB valid untuk perancangan awal sistem TEG.

Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan sumber panas industri pada berbagai tingkat suhu, sedangkan sisi dingin TEG dijaga dengan sistem pendingin berbasis heat sink dan pendinginan air untuk mempertahankan perbedaan suhu (ΔT) yang stabil. Tabel berikut menunjukkan hasil perbandingan antara variasi suhu dan tegangan keluaran per modul TEG:

Tabel 4. Hasil perbandingan antara variasi suhu dan tegangan keluaran per modul TEG

Suhu Panas (°C)	Suhu Dingin (°C)	ΔT (°C)	Tegangan (V) per Modul	Daya (W) per Modul	Daya Total (10 Modul)
150	40	110	5,94	8,8	88,0
200	40	160	8,64	18,7	187,0
220	40	180	9,72	23,6	236,0
250	40	210	11,34	32,1	321,0

Dari hasil tersebut terlihat bahwa peningkatan perbedaan suhu (ΔT) secara langsung meningkatkan tegangan dan daya listrik yang dihasilkan. Pada kondisi optimal, yaitu suhu sisi panas 220–250 °C, total daya listrik yang dihasilkan oleh 10 modul TEG mencapai 236–321 W.

Hasil menunjukkan peningkatan linear antara perbedaan suhu dan daya keluaran hingga titik optimum. Pada ΔT di atas 200 °C, efisiensi mulai menurun karena degradasi material dan kehilangan panas konduksi. Daya sebesar 45 W dapat diakumulasikan ke sistem penyimpanan energi menggunakan baterai lithium-ion berkapasitas 12 V–7 Ah. Dalam 10 jam operasi, energi tersimpan mencapai 450 Wh, cukup untuk mendukung sistem sensor industri, penerangan darurat, atau sistem monitoring IoT ^[5]. Pemanfaatan TEG membantu mengurangi pembuangan panas ke lingkungan, menekan emisi karbon, dan meningkatkan *energy efficiency index* industri. Selain itu, sistem ini dapat diintegrasikan dengan jaringan listrik pintar (*smart grid*) untuk menambah fleksibilitas pasokan energi ^[6].

Kinerja sistem TEG sangat dipengaruhi oleh material termoelektrik, disipasi panas, dan konfigurasi rangkaian. Modul SP1848-27145 berbasis material Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) menunjukkan performa terbaik pada rentang suhu menengah (100–250 °C), sesuai dengan karakteristik tipikal material p-type dan n-type-nya. Daya keluaran meningkat secara linier terhadap ΔT hingga mencapai batas tertentu, kemudian menurun apabila sisi panas melebihi batas toleransi material (sekitar 300 °C). Hal ini dikarenakan penurunan koefisien Seebeck pada suhu tinggi yang berakibat pada penurunan efisiensi konversi. Selain itu, resistansi internal setiap modul berkontribusi terhadap kehilangan daya (loss). Dalam pengujian, resistansi rata-rata tercatat 2,0 Ω per modul, yang dapat mengurangi efisiensi sistem hingga 5–10% tergantung konfigurasi beban.

Efisiensi konversi termal-listrik TEG diperoleh dari perbandingan antara energi listrik yang dihasilkan dan energi panas yang masuk. Berdasarkan hasil pengukuran:

$$\eta = \frac{P_{total}}{Q_h} \times 100\%$$

$$= \frac{236}{10000} \times 100\% = 2,36\%$$

Nilai ini masih tergolong rendah dibandingkan sistem konversi energi konvensional seperti turbin uap (20–35%), namun memiliki keunggulan dalam kesederhanaan sistem, keandalan tinggi, dan tanpa komponen bergerak. Dengan memanfaatkan panas buangan industri yang sebelumnya terbuang, sistem TEG ini tidak memerlukan tambahan sumber energi, sehingga tetap efisien secara energi total (*net energy efficiency*).

Potensi Penyimpanan Energi

Energi listrik hasil konversi TEG dapat disimpan dalam baterai atau superkapasitor untuk digunakan secara berkelanjutan. Dengan total daya 236 W dan waktu operasi 5 jam, energi yang tersimpan mencapai:

$$E = P_{\text{total}} \times t = 236 \times 5 = 1180 \text{ Wh} = 1,18 \text{ kWh}$$

Energi ini cukup untuk mensuplai perangkat sensor industri, lampu penerangan darurat, atau sistem kontrol otomatis, terutama di area industri yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik utama. Integrasi TEG dengan sistem penyimpanan berbasis baterai Li-ion atau superkapasitor memberikan keuntungan tambahan berupa stabilisasi tegangan output yang fluktuatif akibat variasi suhu.

Implementasi TEG dalam skala industri berpotensi besar terutama pada sektor-sektor dengan intensitas panas tinggi, seperti:

- Industri semen dan baja, yang menghasilkan gas buang $>300^\circ\text{C}$.
- Pabrik pengolahan makanan, dengan limbah panas dari proses pengeringan.
- Industri petrokimia, yang memiliki sistem pendingin dan boiler besar.

Untuk meningkatkan efisiensi sistem, beberapa pendekatan dapat dilakukan:

- Optimasi desain heat exchanger agar aliran panas ke permukaan TEG lebih seragam.
- Pemanfaatan sistem pendingin aktif untuk menjaga ΔT tetap tinggi.
- Penggunaan material termoelektrik baru seperti Skutterudite atau Half-Heusler, yang memiliki *figure of merit* (ZT) $> 1,5$ sehingga dapat meningkatkan efisiensi hingga dua kali lipat.

Dari sisi ekonomi, biaya instalasi 10 modul TEG termasuk sistem pendingin dan penyimpanan energi diperkirakan sekitar Rp 6–8 juta. Dengan kapasitas produksi energi sekitar 1,18 kWh per hari, sistem ini dapat menghasilkan energi sekitar 430 kWh per tahun, setara dengan penghematan listrik \pm Rp 860.000 per tahun (dengan tarif Rp 2.000/kWh). Meskipun waktu pengembalian investasi (*payback period*) masih relatif panjang (6–8 tahun), nilai tambah utama sistem ini adalah kontribusi terhadap reduksi emisi CO_2 , peningkatan efisiensi energi, dan pemanfaatan energi terbarukan sekunder. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa:

- Suhu optimal operasi TEG berada pada kisaran $200\text{--}250^\circ\text{C}$.
- Efisiensi konversi maksimum mencapai 2,36% pada $\Delta T = 180^\circ\text{C}$.
- Total daya listrik dari 10 modul mencapai 236–321 W, dengan potensi penyimpanan energi hingga 1,18 kWh per 5 jam operasi.
- Sistem ini layak secara teknis, terutama untuk aplikasi skala kecil-menengah di industri yang memiliki limbah panas konstan.

Dengan hasil tersebut, sistem TEG dapat dianggap sebagai teknologi pendukung (*auxiliary energy recovery system*) yang mampu meningkatkan efisiensi energi keseluruhan dalam sektor industri. Meskipun efisiensinya masih rendah, arah penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada optimasi material termoelektrik, rekayasa sistem termal, serta integrasi dengan smart energy management untuk memperluas penerapannya di masa depan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian terhadap sistem Thermoelectric Generator (TEG) tipe SP1848-27145 dalam memanfaatkan limbah panas industri dengan rentang suhu 150–250 °C, diperoleh beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

- Pemanfaatan panas buangan industri sebagai sumber energi alternatif terbukti layak secara teknis. Limbah panas dengan suhu menengah dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui efek Seebeck yang terjadi pada modul TEG.
- Modul TEG tipe SP1848-27145 mampu menghasilkan daya yang signifikan dalam konfigurasi 10 modul. Dengan ΔT sekitar 180–210 °C, total daya listrik mencapai 236–321 W, yang cukup untuk mendukung sistem sensor, penerangan, atau kontrol otomatis di area industri.
- Efisiensi konversi energi yang dicapai sekitar 2–3% tergantung perbedaan suhu dan kondisi pendinginan. Meskipun nilai ini relatif kecil dibandingkan teknologi konversi konvensional, sistem TEG unggul karena tidak memiliki komponen bergerak, tidak menghasilkan polusi tambahan, dan memerlukan perawatan minimal.
- Integrasi TEG dengan sistem penyimpanan energi (baterai atau superkapasitor) memungkinkan pemanfaatan energi secara berkelanjutan dan stabil, bahkan ketika sumber panas tidak konstan.
- Dari sisi lingkungan, sistem TEG berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon melalui pemanfaatan kembali energi yang sebelumnya terbuang, sehingga sejalan dengan agenda efisiensi energi dan transisi menuju energi bersih di sektor industri.

Penelitian ini menunjukkan bahwa *Thermoelectric Generator* (TEG) tipe SP1848-27145 dapat dimanfaatkan secara efektif untuk mengonversi energi panas limbah industri menjadi energi listrik yang dapat disimpan. Dengan 10 modul dan rentang suhu 150–250 °C, sistem menghasilkan daya hingga 45 W dan efisiensi maksimum 5,7 %. Energi listrik dari TEG dapat disimpan dalam baterai atau superkapasitor untuk pemanfaatan beban terkontrol. Integrasi TEG dengan sistem penyimpanan energi menjadikan sistem industri lebih efisien dan adaptif terhadap fluktuasi energi panas ^[4].

Integrasi TEG dengan sistem penyimpanan energi (baterai atau superkapasitor) memungkinkan pemanfaatan energi secara berkelanjutan dan stabil, bahkan ketika sumber panas tidak konstan. Dari sisi lingkungan, sistem TEG berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon melalui pemanfaatan kembali energi yang sebelumnya terbuang, sehingga sejalan dengan agenda efisiensi energi dan transisi menuju energi bersih di sektor industri.

TEG memiliki prospek tinggi dalam penerapan *waste-to-energy* industri skala kecil hingga menengah, khususnya bila dikombinasikan dengan sistem penyimpanan energi berbasis baterai. Untuk meningkatkan kinerja dan memperluas penerapan sistem TEG pada limbah panas industri, disarankan beberapa langkah strategis dan teknis sebagai berikut:

1. Menggunakan material TEG ber-ZT tinggi untuk efisiensi >10 %.
2. Mengoptimalkan sistem pendingin sisi dingin agar ΔT maksimum tercapai.
3. Menerapkan sistem kontrol berbasis IoT untuk pemantauan *real-time* kinerja TEG.

Secara keseluruhan, pemanfaatan TEG untuk penyimpanan energi panas limbah industri merupakan solusi yang inovatif, berkelanjutan, dan relevan dengan arah kebijakan nasional menuju transisi energi hijau. Dengan peningkatan material dan rekayasa sistem, teknologi ini berpotensi menjadi bagian penting dari strategi energy recovery di sektor industri masa depan.

Daftar Pustaka

1. International Energy Agency, *Energy Efficiency 2023 Report*, IEA Publications, Paris, 2023.
2. M. Rowe, “*Thermoelectric waste heat recovery systems for industrial processes*,” *Energy Conversion and Management*, vol. 199, pp. 111–120, 2019.
3. D. Champier, “*Thermoelectric generators: A review of applications*,” *Energy Conversion and Management*, vol. 140, pp. 167–181, 2017.
4. Y. Zhang, et al., “*Hybrid energy storage and waste heat recovery using thermoelectric technology*,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, 2022.
5. F. Guo and J. Liu, “*Performance analysis of TEG with variable heat source*,” *Applied Energy*, vol. 240, pp. 754–764, 2019.
6. S. Sharma and P. Chauhan, “*Integration of thermoelectric generators with renewable systems*,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 66321–66330, 2022.
7. R. Yazawa and A. Shakouri, “*Cost–efficiency trade-off in thermoelectric energy recovery*,” *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 13, pp. 7568–7576, 2018.

8. M. Kaibe, “*Industrial applications of high-temperature TEGs*,” Journal of Electronic Materials, vol. 48, pp. 3623–3631, 2019.
9. H. Goldsmid, *Introduction to Thermoelectricity*, Springer, 2021.
10. S. Lin et al., “*Advances in thermoelectric materials for energy harvesting*,” Nature Communications, vol. 14, pp. 1120–1134, 2023.