



TERMOELEKTRIK GENERATOR DAN FUNGSINYA

Muh. Alfian Gibran^{1*}, Sentot Novianto², Supriyadi³, Annisa Bhikuning⁴

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti, Kota Jakarta, 11440, Indonesia

²Dosen Pembimbing, Universitas Trisakti, Jakarta, 11440, Indonesia

³Dosen Pembimbing, Universitas Trisakti, Jakarta, 11440, Indonesia

⁴Dosen Pembimbing, Universitas Trisakti, Jakarta, 11440, Indonesia

*Penulis koresponden: 161012100002@std.trisakti.ac.id

ABSTRAK

Artikel ini merangkum dan mengulas berbagai jurnal tentang performa, aplikasi, dan pengembangan Thermoelectric Generator (TEG) yang mengubah perbedaan suhu menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Tujuan dari ulasan ini adalah memberikan gambaran komprehensif mengenai kemajuan teknologi TEG serta potensinya dalam meningkatkan efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan. Metodologi yang digunakan meliputi tinjauan literatur terhadap metode penelitian yang diterapkan dalam studi-studi terdahulu, termasuk simulasi dan eksperimen yang bertujuan meningkatkan efisiensi TEG. Beberapa penelitian mengintegrasikan TEG dengan material perubahan fase (PCM) untuk memanen energi dari fluktuasi suhu lingkungan. Hasil ulasan ini menunjukkan bahwa inovasi dalam material dan desain TEG dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan teknologi ini. Selain itu, artikel ini membahas aplikasi TEG dalam berbagai bidang, seperti pemulihan panas buang dari industri dan kendaraan, serta penggunaan pada perangkat wearable untuk memanen energi dari panas tubuh. Tabel yang mencakup metode penelitian dan perbandingan studi sebelumnya disertakan untuk memberikan pandangan menyeluruh tentang perkembangan terkini dalam teknologi TEG. Simpulan dari ulasan ini adalah bahwa TEG memiliki potensi besar sebagai solusi untuk pemulihan panas buang, aplikasi pada perangkat wearable, dan sebagai sumber energi terbarukan yang efisien. Artikel ini juga memberikan saran untuk penelitian masa depan, termasuk pengembangan material baru dan desain yang lebih optimal, guna mengatasi tantangan yang ada dan memaksimalkan potensi TEG.

SEJARAH ARTIKEL

Diterima
Mei 2024
Revisi
Mei 2024
Disetujui
Juni 2024
Terbit online
Juli 2024

KATA KUNCI

- Thermoelectric Generator,
- Seebeck Effect,
- Waste Heat Recovery,
- Phase Change Materials,
- Energy Efficiency

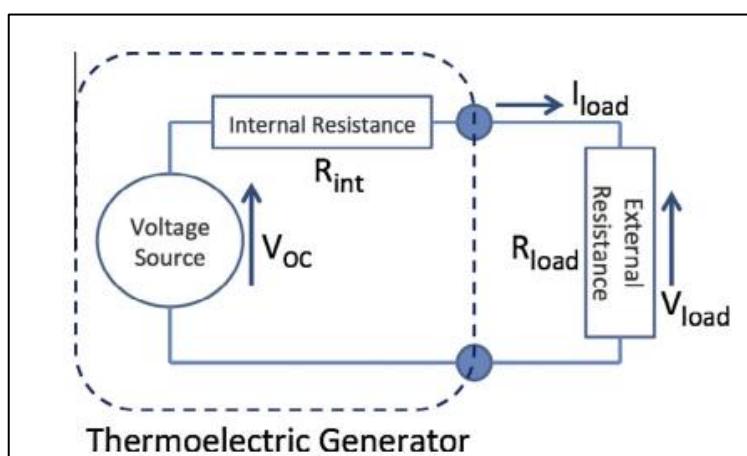
ABSTRACT

This article summarizes and reviews various journals on the performance, applications, and development of Thermoelectric Generators (TEG) that convert temperature differences into electrical energy through the Seebeck effect. The aim of this review is to provide a comprehensive overview of advancements in TEG technology and its potential in enhancing energy efficiency and renewable energy utilization. The methodology includes a

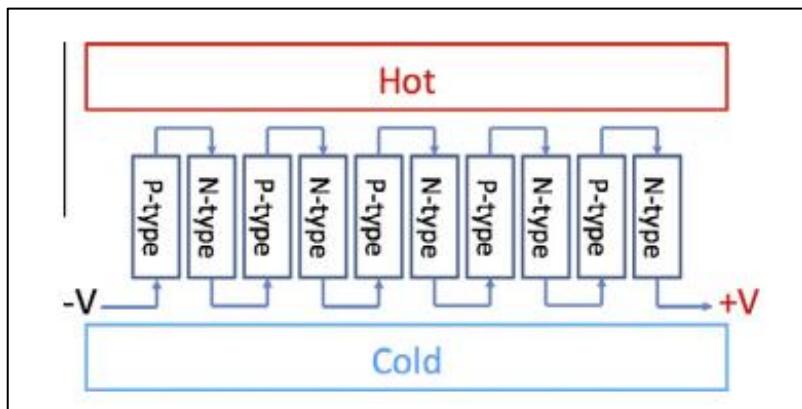
literature review of research methods applied in previous studies, including simulations and experiments aimed at improving TEG efficiency. Some studies also integrate TEG with phase change materials (PCM) to harvest energy from ambient temperature fluctuations. The review findings indicate that innovations in TEG materials and design can significantly improve the efficiency and sustainability of this technology. Additionally, this article discusses the applications of TEG in various fields, such as waste heat recovery from industrial processes and vehicles, as well as in wearable devices to harvest energy from body heat. A table presenting research methods and comparisons of previous studies is included to offer a thorough view of current developments in TEG technology. The conclusion of this review is that TEG has significant potential as a solution for waste heat recovery, wearable device applications, and as an efficient renewable energy source. The article also provides recommendations for future research, including the development of new materials and more optimal designs, to address existing challenges and maximize the potential of TEG.

1. PENDAHULUAN

Thermoelectric generators (TEG) telah menjadi fokus penelitian yang intensif karena potensinya untuk mengubah panas menjadi listrik dengan efisiensi tinggi. Penggunaan TEG mencakup berbagai aplikasi mulai dari pemanfaatan panas limbah industri hingga penerapan dalam perangkat portabel dan sistem energi terbarukan. TEG bekerja berdasarkan efek Seebeck, di mana gradien suhu pada material semikonduktor menghasilkan perbedaan potensial listrik. Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian tentang TEG telah berkembang pesat, mencakup berbagai aspek mulai dari material thermoelectric, desain modul, hingga penerapan praktisnya.



Gambar 1. Model listrik generator termoelektrik [8].

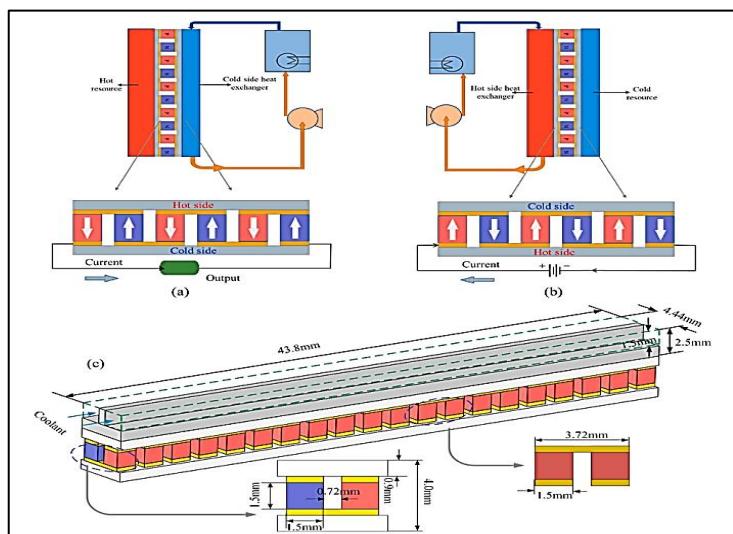


Gambar 2. Diagram skema pasangan termoelektrik dalam perangkat termoelektrik digunakan sebagai generator termoelektrik [8].

Ahiska (2014) mengemukakan bahwa TEG memiliki potensi besar dalam memanfaatkan sumber energi yang terbuang [1]. Shi et al. (2018) mengembangkan TEG yang dapat dikenakan dengan menggunakan busa tembaga sebagai pendingin untuk memanen panas tubuh, menunjukkan inovasi dalam desain TEG untuk aplikasi wearable [2]. Montecucco, Siviter, dan Knox (2015) mengkaji karakterisasi panas konstan dan optimasi geometris TEG, yang penting untuk meningkatkan efisiensi konversi energi [3].

Zhao et al. (2017) mengeksplorasi penggunaan transistor organik yang digerakkan oleh thermoelectric gating ionik, menambah dimensi baru dalam aplikasi TEG di bidang elektronik organik [4]. Yahya, Bilgin, dan Erfidan (2018) mengimplementasikan metode pelacakan daya maksimum berbasis pulsa arus pendek untuk sistem TEG, yang dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan [5]. Höglom dan Andersson (2014) melakukan analisis kinerja TEG melalui simulasi dan eksperimen, memberikan wawasan tentang pentingnya resistansi kontak dalam desain TEG [6].

Seetawan et al. (2012) menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk menganalisis TEG, menunjukkan bahwa teknik simulasi dapat memberikan prediksi kinerja yang akurat [7]. Montecucco, Siviter, dan Knox (2014) juga mengevaluasi efek ketidakcocokan suhu pada TEG yang dihubungkan secara seri dan paralel, menyoroti pentingnya keseragaman suhu dalam modul TEG [8]. Kim et al. (2014) mengembangkan TEG yang dapat dikenakan untuk memanen panas tubuh manusia, memperluas aplikasi TEG ke dalam bidang kesehatan dan wearable devices [9].



Gambar 3. Skema dan model fisik 3D dari dua sistem termoelektrik yang umum: (a) TEG, (b) TEC, dan (c) domain komputasi [17].

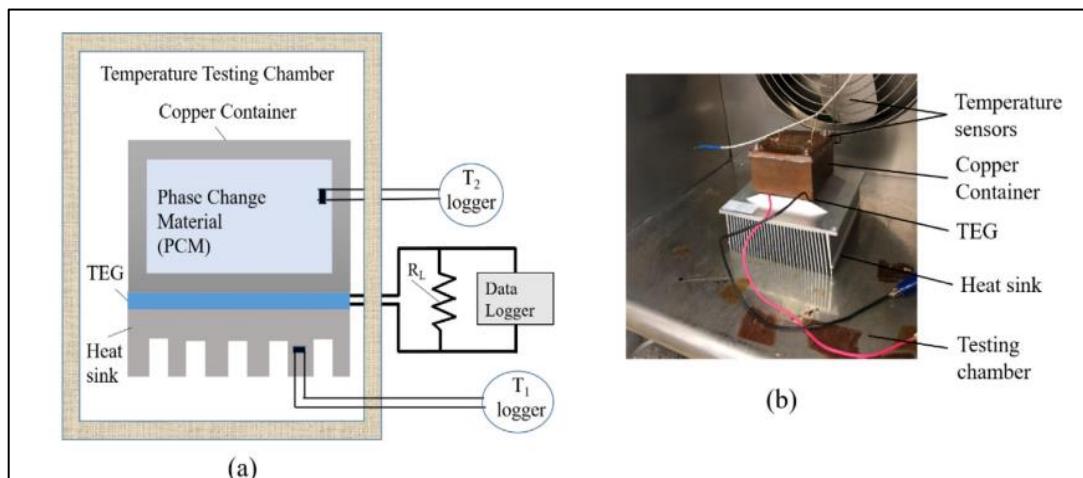
Karana dan Sahoo (2018) mengevaluasi performa TEG untuk pemulihan panas limbah pada mobil menggunakan pendingin nanofluid MgO dan ZnO, menunjukkan potensi peningkatan efisiensi dengan teknologi pendingin baru [10]. Snyder dan Toberer (2008) menyoroti material thermoelectric yang kompleks, yang merupakan kunci untuk meningkatkan efisiensi TEG [11]. Saleh et al. (2021) melakukan evaluasi konfigurasi sistem hibrid PV-TEG untuk meningkatkan keluaran energi, menunjukkan integrasi teknologi yang dapat memaksimalkan efisiensi energi terbarukan [12].

Doraghi et al. (2021) melakukan investigasi dan pemodelan komputasional pada variasi geometris kaki TEG, yang menunjukkan bahwa desain geometris dapat mempengaruhi performa TEG secara signifikan [13]. Jin et al. (2020) mengevaluasi sifat thermoelectric dari material berbasis PEDOT, memberikan pandangan baru pada penggunaan material polimer untuk TEG [14]. Mirza et al. (2022) menggunakan jaringan syaraf regresi umum dan optimasi berbasis kebugaran untuk memanen energi dari sistem TEG terpusat, menunjukkan pendekatan baru dalam optimasi kinerja TEG [15].

Pradhan et al. (2020) mengoptimalkan integrasi TEG dalam modul PV, menunjukkan bahwa kombinasi teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem energi surya [16]. Ruan et al. (2021) melakukan investigasi numerik dan analisis komparatif peningkatan pendinginan nanofluid untuk sistem TEG dan TEC, menunjukkan potensi nanofluid dalam meningkatkan performa termal TEG [17]. Tang et al. (2015) meneliti kinerja listrik TEG di bawah

kondisi ketidakcocokan suhu untuk sistem pemulihan panas limbah otomotif, menyoroti tantangan dan peluang dalam aplikasi TEG di sektor otomotif [18].

Jaziri et al. (2019) memberikan tinjauan komprehensif tentang teknologi dan aplikasi umum TEG, menyajikan berbagai inovasi dan tren dalam penelitian TEG [19]. Tuoi, Toan, dan Ono (2020) menyelidiki integrasi TEG dengan material perubahan fase (PCM) untuk memanen energi dari perubahan suhu lingkungan, menunjukkan pendekatan inovatif dalam desain TEG [20].



Gambar 4. (a) Skema pengaturan evaluasi menggunakan ruang pengujian suhu. (b) Pengaturan pengukuran [20].

Beberapa rumus dasar dalam analisis TEG mencakup persamaan efek Seebeck, yang mendeskripsikan tegangan yang dihasilkan sebagai fungsi dari perbedaan suhu (ΔT) dan koefisien Seebeck (S) [12-14]:

$$V = S \cdot \Delta T$$

Selain itu, untuk menganalisis efisiensi konversi energi dari TEG, digunakan rumus berikut [15-17]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}}$$

Rumus ini menjadi dasar untuk perhitungan efisiensi dan optimasi desain TEG dalam berbagai penelitian. Rumus-rumus lain yang relevan dalam analisis TEG meliputi [18-20]:

1. Konduktivitas Termal

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

2. Kekuatan Elektromotof (EMF):

$$\mathcal{E} = S \cdot (T_h - T_c)$$

3. Daya Output Maksimum

$$P_{max} = \frac{(\Delta T)^2 \cdot S^2 \cdot A}{4 \cdot \rho \cdot L}$$

4. Koefisien kinerja

$$COP = \frac{Q_c}{W}$$

5. Angka Merit(*Figure of Merit*):

$$ZT = \frac{S^2 \cdot \sigma \cdot T}{k}$$

6. Konduktivitas Listrik

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

7. Resistivitas Listrik

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

8. Efisiensi Konversi

$$\eta = \frac{\Delta T \cdot S \cdot I}{Q_{in}}$$

9. Hukum Termodinamika

$$Q_{out} = Q_{in} - W$$

10. Arus Termoelektrik

$$I = \frac{V}{R}$$

Nomenkultur

SS Kesalahan Jumlah kuadrat yang dinormalisasi

P Daya elektrik, W

Q Laju aliran Panas, W

I Arus, A

U Voltase, V

T Temperature, K

COP Koefisien kinerja

K Konduktansi Termal, W/K

A Area

L Panjang

ZT angka Merit

Simbol Yunani

η : Efisiensi

ρ Kepadatan, kg m⁻³

\mathcal{E} Kekuatan Elektromotif(EMF)

σ Konduktivitas listrik, S/m

Subskrip

TEG Termoelektrik generator

c Sisi Dingin

h Sisi Panas

Pendahuluan ini merangkum berbagai penelitian yang telah dilakukan di bidang TEG, menunjukkan beragam pendekatan dan aplikasi yang telah diimplementasikan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mendalam tentang kelebihan dan kekurangan TEG serta panduan bagi penelitian masa depan untuk meningkatkan efisiensi dan performa dari teknologi ini.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada review jurnal ini, penulis menjelaskan metodologi penelitian sebagai berikut:

1. Tempat dan Waktu

- **Tempat:** Penelitian ini dilaksanakan di rumah dengan akses ke berbagai database jurnal ilmiah seperti ScienceDirect, dan Google Scholar.
- **Waktu:** Review Penelitian ini dilaksanakan selama beberapa waktu pada tahun 2024.

2. Masyarakat Sasaran/Mitra Kegiatan

- **Latar Belakang Peserta:** Tidak ada peserta langsung karena tinjauan penelitian ini adalah studi literatur. Namun, tinjauan penelitian ini ditujukan untuk akademisi dan peneliti di bidang energi terbarukan, terutama yang bekerja dengan termoelektrik generator (TEG).

- **Pemilihan Sumber:** Artikel dan jurnal yang dipilih berasal dari beberapa tahun terakhir untuk memastikan relevansi dan kemutakhiran informasi.

3. Metode Pengabdian

- **Persiapan:** Mengidentifikasi kata kunci yang relevan seperti thermoelektrik generator, dll
- **Pengumpulan Data:** Melakukan pencarian literatur di database online menggunakan kata kunci yang telah ditentukan. Artikel yang relevan dikumpulkan untuk dianalisis lebih lanjut.
- **Penyuluhan dan Pelatihan:** Tidak ada penyuluhan dan pelatihan langsung karena ini adalah penelitian literatur.
- **Pendampingan dan Demonstrasi:** Peneliti membuat grafik yang mengilustrasikan hubungan antara perbedaan suhu dengan kuat arus dan tegangan berdasarkan data yang ditemukan.
- **Analisis dan Interpretasi:** Artikel yang terkumpul dianalisis untuk menilai kelebihan dan kekurangan penelitian yang telah dilakukan. Hasil utama dari setiap penelitian dikompilasi dan disajikan secara sistematis.

4. Indikator Keberhasilan

- **Indikator Keberhasilan:** Keberhasilan diukur dari kualitas dan jumlah artikel yang di-review, kedalaman analisis, serta kemampuan untuk menyajikan hasil review secara jelas dan sistematis. Hasil yang diharapkan termasuk publikasi yang komprehensif mengenai kondisi terkini penelitian TEG, dengan identifikasi kelebihan dan kekurangan, serta hasil utama yang telah dicapai.
- **Output:** Diharapkan publikasi ini memberikan kontribusi yang signifikan bagi penelitian TEG dan membuka peluang untuk penelitian lanjutan.

5. Metode Evaluasi

- **Evaluasi Kualitas Sumber:** Setiap artikel yang di-review dievaluasi berdasarkan relevansinya dengan topik TEG.
- **Review Internal:** Sebelum publikasi, tulisan akhir akan direview secara internal untuk memastikan tidak ada kesalahan logis atau interpretasi data yang keliru.

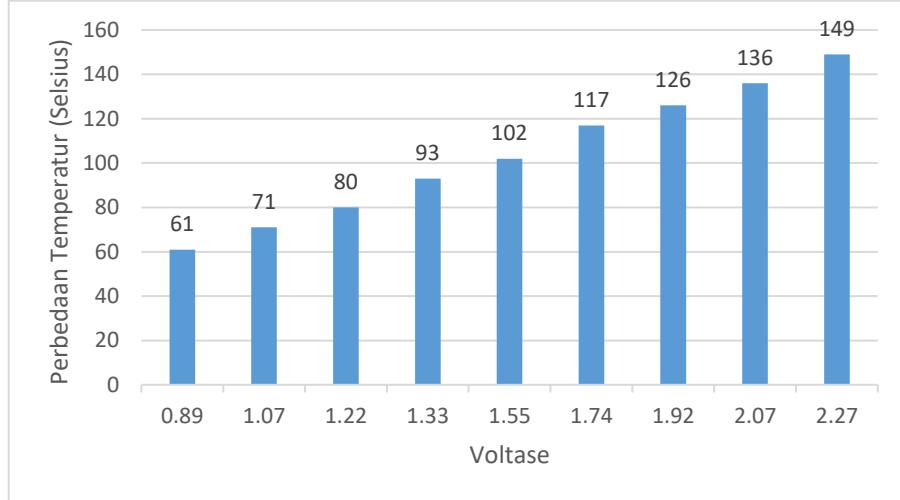
Dengan metodologi ini, diharapkan hasil review jurnal mengenai termoelektrik generator dapat memberikan gambaran serta memberikan wawasan baru bagi pengembangan di bidang tersebut.

3. HASIL DAN DISKUSI

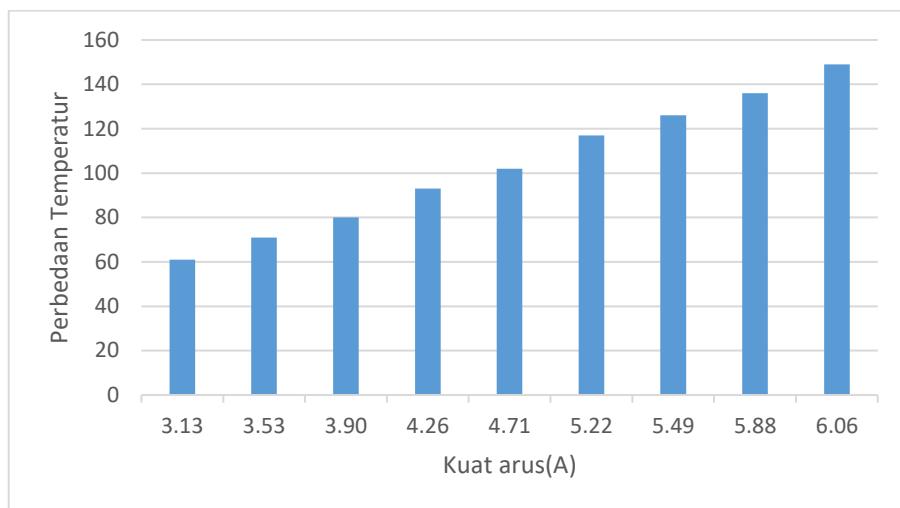
Data pengukuran untuk modul besar, TEHP1-12680-0.15, diambil pada sembilan titik beban yang berbeda, dengan variasi suhu pada sisi panas (T_h) dan sisi dingin (T_c), serta pengukuran tegangan (U), arus (I), aliran panas (Q), dan daya listrik (P). Data pengukuran ini dirangkum dalam Tabel 1[6].

Tabel 1. Data pengukuran untuk modul besar, TEHP1-12680-0.15 [6].

Titik Beban	T_h (°C)	T_c (°C)	U (V)	I (A)	Q (W)	P (W)
1	111	50	0.89	3.13	202	2.8
2	127	56	1.07	3.53	239	3.8
3	140	60	1.22	3.90	271	4.8
4	158	65	1.33	4.26	311	5.7
5	171	69	1.55	4.71	354	7.3
6	179	62	1.74	5.22	419	9.1
7	192	66	1.92	5.49	457	10.5
8	207	71	2.07	5.88	507	12.2
9	225	76	2.27	6.06	547	13.8



Grafik 1. Perbandingan antara Voltase dengan Perbedaan temperature. [6].



Grafik 2. Perbandingan antara Kuat Arus dengan Perbedaan temperatur. [6].

Analisis Data Pengukuran

1. Tegangan (U) dan Arus (I):

Tegangan dan arus meningkat seiring dengan peningkatan suhu pada sisi panas (Th). Pada titik beban pertama, tegangan adalah 0.89 V dengan arus 3.13 A, sedangkan pada titik beban kesembilan, tegangan meningkat menjadi 2.27 V dengan arus 6.06 A.

2. Aliran Panas (Q):

Aliran panas juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu pada sisi panas. Pada titik beban pertama, aliran panas adalah 202 W, dan pada titik beban kesembilan, aliran panas meningkat menjadi 547 W. Ini menunjukkan bahwa lebih banyak energi panas yang ditransfer melalui modul saat suhu meningkat.

3. Daya Listrik (P):

Daya listrik yang dihasilkan oleh modul meningkat dengan peningkatan suhu pada sisi panas. Pada titik beban pertama, daya listrik adalah 2.8 W, dan pada titik beban kesembilan, daya listrik meningkat menjadi 13.8 W. Ini menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik meningkat dengan peningkatan suhu.

4. Efisiensi Modul

Efisiensi modul dapat dihitung dengan membandingkan daya listrik yang dihasilkan (P) dengan aliran panas (Q). Misalnya, pada titik beban pertama, efisiensi adalah sekitar 1.39% ($2.8 \text{ W} / 202 \text{ W}$), sedangkan pada titik beban kesembilan, efisiensi meningkat menjadi sekitar 2.52% ($13.8 \text{ W} / 547 \text{ W}$). Ini menunjukkan bahwa efisiensi modul meningkat dengan peningkatan suhu pada sisi panas[6].

5. Dampak Resistansi Kontak

Penelitian ini menunjukkan bahwa resistansi kontak memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja modul TEG. Dengan mengurangi resistansi kontak, efisiensi modul dapat ditingkatkan. Metodologi yang disajikan dalam penelitian ini memungkinkan penentuan resistansi kontak dengan akurat dan menunjukkan bahwa efek resistansi kontak harus selalu diperhitungkan dalam simulasi modul. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mengabaikan resistansi kontak dalam simulasi dapat menyebabkan prediksi yang berlebihan terhadap aliran panas dan output daya listrik[6].

Data pengukuran menunjukkan bahwa modul besar, TEHP1-12680-0.15, memiliki kinerja yang meningkat dengan peningkatan suhu pada sisi panas. Tegangan, arus, aliran panas, dan daya listrik semuanya meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Efisiensi modul juga meningkat dengan peningkatan suhu, menunjukkan bahwa modul ini lebih efektif dalam mengkonversi energi panas menjadi energi listrik pada suhu yang lebih tinggi. Analisis ini memberikan wawasan penting tentang bagaimana modul termoelektrik berfungsi dan bagaimana kinerjanya dapat ditingkatkan dengan mengoptimalkan kondisi operasional. Penelitian ini juga menekankan pentingnya mempertimbangkan resistansi kontak dalam simulasi untuk mendapatkan prediksi yang akurat dan untuk mengidentifikasi potensi peningkatan kinerja modul dengan mengurangi resistansi kontak[6].

Berikut rangkuman beberapa metode-metode yang diaplikasikan beberapa penelitian terkumpul dalam tabel di bawah ini:

Tabel 1. Metode-Metode Penelitian TEG

No	Penulis	Tahun	Metode Penelitian	Jenis TEG	Bahan	Hasil Utama
1	Högblom & Andersson	2014	Simulasi & Eksperimen	-	-	Efisiensi tinggi pada kondisi tertentu [6]
2	Seetawan et al.	2012	Metode Elemen Hingga	-	-	Optimasi struktur TEG [7]
3	Montecucco et al.	2014	Eksperimen	-	-	Pengaruh ketidakcocokan suhu [8]
4	Ahiska	2014	Review	-	-	Tinjauan umum TEG dalam energi terbarukan [1]
5	Montecucco et al.	2015	Eksperimen	-	-	Karakterisasi panas konstan dan optimasi geometris [3]

6	Zhao et al.	2017	Eksperimen	-	-	Gating ionik pada transistor organik [4]
7	Yahya et al.	2018	Eksperimen	-	-	Implementasi MPPT pada TEG [5]
8	Tuoi et al.	2020	Eksperimen	TEG dengan PCM	-	Energi dari fluktuasi suhu [20]
9	Kim et al.	2014	Eksperimen	Wearable TEG	-	Pemanenan energi dari panas tubuh [9]
10	Shi et al.	2018	Eksperimen	Wearable TEG	Copper foam	Efisiensi pemindahan panas [2]
11	Karana & Sahoo	2018	Eksperimen	TEG otomotif	-	Pemulihan panas buang kendaraan [10]
12	Jaziri et al.	2019	Review	-	-	Teknologi dan aplikasi umum TEG [19]
13	Snyder & Toberer	2008	Review	-	-	Bahan termoelektrik kompleks [11]
14	Saleh et al.	2021	Eksperimen	Hybrid PV-TEG	-	Output energi lebih tinggi [11]
15	Doraghi et al.	2021	Simulasi	-	-	Model komputasi geometri kaki TEG [13]
16	Jin Bae et al.	2020	Eksperimen	PEDOT:PSS TEG	-	Peningkatan sifat termoelektrik [14]
17	Ruan et al.	2021	Eksperimen	-	-	Pendinginan nanofluid untuk TEG [17]
18	Tang et al.	2015	Eksperimen	-	-	Kinerja listrik pada ketidakcocokan suhu [18]
19	Mirza et al.	2022	Eksperimen	-	-	Analisis bentuk kaki TEG optimasi geometri [15]
20	Pradhan et al.	2020	Eksperimen	PV-TEG	-	Optimasi integrasi TEG dalam modul PV [16]

3.1 Keunggulan dan Kelemahan dari Beberapa Penelitian

Berikut rangkuman beberapa keunggulan dan kelemahan yang diaplikasikan beberapa penelitian terkumpul dalam tabel di bawah ini:

Tabel 2. Keunggulan dan Kelemahan Penelitian TEG

No	Penulis	Tahun	Keunggulan	Kelemahan
1	Högblom & Andersson	2014	Efisiensi tinggi pada konfigurasi tertentu	Efisiensi rendah pada suhu tidak stabil [6]
2	Seetawan et al.	2012	Optimasi struktur meningkatkan performa	Proses optimasi rumit [7]
3	Montecucco et al.	2014	Menemukan pengaruh ketidakcocokan suhu	Ketidakcocokan suhu menurunkan efisiensi [8]
4	Ahiska	2014	Tinjauan komprehensif TEG dalam energi terbarukan	Fokus hanya pada teori [1]
5	Montecucco et al.	2015	Karakterisasi panas konstan dan optimasi geometris	Proses eksperimen kompleks [3]

6	Zhao et al.	2017	Gating ionik meningkatkan performa	Material transistor khusus [4]
7	Yahya et al.	2018	MPPT meningkatkan efisiensi pemanenan energi	Implementasi teknologi tinggi [5]
8	Tuoi et al.	2020	Pemanenan energi dari fluktuasi suhu	Integrasi PCM rumit [20]
9	Kim et al.	2014	Pemanenan energi dari panas tubuh	Efisiensi terbatas pada suhu rendah [9]
10	Shi et al.	2018	Efisiensi pemindahan panas dengan copper foam	Material copper foam mahal [2]
11	Karana & Sahoo	2018	Pemulihan panas buang kendaraan	Ketergantungan pada suhu tinggi [10]
12	Jaziri et al.	2019	Pandangan komprehensif teknologi dan aplikasi TEG	Fokus lebih pada review daripada inovasi [19]
13	Snyder & Toberer	2008	Analisis bahan termoelektrik kompleks	Material termoelektrik mahal [11]
14	Saleh et al.	2021	Output energi lebih tinggi dengan PV-TEG	Integrasi PV-TEG rumit [12]
15	Doraghi et al.	2021	Model komputasi geometri meningkatkan efisiensi	Proses simulasi kompleks [13]
16	Jin Bae et al.	2020	Peningkatan sifat termoelektrik dengan PEDOT:PSS	Material spesifik [14]
17	Ruan et al.	2021	Pendinginan nanofluid meningkatkan performa TEG	Kebutuhan nanofluid mahal [17]
18	Tang et al.	2015	Menemukan kinerja listrik pada ketidakcocokan suhu	Efisiensi menurun pada ketidakcocokan suhu [18]
19	Mirza et al.	2022	Optimasi bentuk kaki meningkatkan performa	Proses optimasi rumit [15]
20	Pradhan et al.	2020	Optimasi integrasi TEG dalam modul PV	Proses integrasi rumit [16]

4. KESIMPULAN

Thermoelectric Generator (TEG) menawarkan solusi yang menarik untuk pemanfaatan energi terbarukan dan peningkatan efisiensi energi. Melalui berbagai metode penelitian dan aplikasi, TEG dapat dioptimalkan untuk berbagai keperluan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi tantangan dalam efisiensi dan material, serta untuk mengembangkan desain inovatif yang dapat diterapkan secara praktis. Inovasi dalam material dan desain akan memungkinkan TEG untuk menjadi solusi energi yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan. Potensi aplikasi dalam perangkat wearable, otomotif, dan sistem hybrid seperti PV-TEG menunjukkan bahwa TEG memiliki peran penting dalam masa depan energi terbarukan. Penelitian dan pengembangan yang terus menerus diperlukan untuk memaksimalkan potensi teknologi ini.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih untuk Bapak Dr. Sentot Novianto, Bapak Dr. Supriyadi, dan Bu Annisa Bhikuning, Ph.D. atas bantuan dan bimbingannya dalam menyukseskan review jurnal ini

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Mamur, H., & Ahiska, R. (2014). A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. Retrieved from <https://www.ijrer.ijrer.org/index.php/ijrer/article/view/1040/pdf>
2. Shi, Y., Wang, Y., Mei, D., & Chen, Z. (2018). Wearable thermoelectric generator with copper foam as the heat sink for body heat harvesting. *IEEE Access*, 6, 43602-43611. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863018>
3. Montecucco, A., Siviter, J., & Knox, A. R. (2015). Constant heat characterisation and geometrical optimisation of thermoelectric generators. *Applied Energy*, 149, 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.120>
4. Zhao, D., Fabiano, S., Berggren, M., & Crispin, X. (2017). Ionic thermoelectric gating organic transistors. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms14214>
5. Yahya, K., Bilgin, M. Z., & Erfidan, T. (2018). Practical implementation of maximum power tracking based short-current pulse method for thermoelectric generators systems. *Journal of Power Electronics*, 18(4), 1201-1210. <https://doi.org/10.6113/JPE.2018.18.4.1201>
6. Höglom, O., & Andersson, R. (2014). Analysis of thermoelectric generator performance by use of simulations and experiments. *Journal of Electronic Materials*, 43(6), 2247-2254. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3020-x>
7. Seetawan, T., et al. (2012). Analysis of thermoelectric generator by finite element method. *Procedia Engineering*, 32, 1006-1011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.046>
8. Montecucco, A., Siviter, J., & Knox, A. R. (2014). The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Applied Energy*, 123, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.030>
9. Kim, M.-K., Kim, M.-S., Lee, S., Kim, C., & Kim, Y.-J. (2014). Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy. *Smart Materials and Structures*, 23(10). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/10/105002>
10. Karana, D. R., & Sahoo, R. R. (2018). Effect on TEG performance for waste heat recovery of automobiles using MgO and ZnO nanofluid coolants. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12, 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.05.006>
11. Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7, 105-114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
12. Saleh, U. A., Johar, M. A., Jumaat, S. A. B., Rejab, M. N., & Jamaludin, W. A. W. (2021). Evaluation of a PV-TEG hybrid system configuration for an improved energy output: A review. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(2), 385-400. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33917>

13. Doraghi, Q., Khordehgah, N., Źabnieńska-Góra, A., Ahmad, L., Norman, L., Ahmad, D., & Jouhara, H. (2021). Investigation and computational modelling of variable TEG leg geometries. *ChemEngineering*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030045>
14. Jin, B. E., Hun, K. Y., Jang, K.-S., & Yun, C. S. (2020). Thermoelectric properties of PEDOT based materials. *Journal of Electronic Materials*, 49(1), 123-132. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07658-4>
15. Mirza, A. F., et al. (2022). Generalized regression neural network and fitness dependent optimization: Application to energy harvesting of centralized TEG systems. *Energy Reports*, 8, 6332-6346. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.003>
16. Pradhan, P., et al. (2020). Optimization of TEG integration in PV modules. *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110635>
17. Ruan, H., Xie, H., Wang, J., Liao, J., Sun, L., Gao, M., & Li, C. (2021). Numerical investigation and comparative analysis of nanofluid cooling enhancement for TEG and TEC systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101331. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101331>
18. Tang, Z., Deng, Y., Su, C., Shuai, W., & Xie, C. (2015). A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.006>
19. Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2019). A comprehensive review of thermoelectric generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 6, 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.011>
20. Tuoi, T. T. K., Toan, N. V., & Ono, T. (2020). Theoretical and experimental investigation of a thermoelectric generator (TEG) integrated with a phase change material (PCM) for harvesting energy from ambient temperature changes. *Energy Reports*, 6, 2022-2029. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.023>