



Studi Eksperimental Karakteristik *Output* Tegangan pada Variasi Susunan Seri-Paralel Modul *Thermoelectric Generator* (TEG)

Nazla Rizki Ramadhani¹¹Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231E-mail: *nazlaarr@gmail.com

Abstrak: Pemanfaatan energi panas yang terbuang melalui teknologi *Thermoelectric Generator* (TEG) menjadi solusi dalam konservasi energi, tetapi optimasi *output* listriknya sangat bergantung pada pemahaman karakteristik elektrik dan konfigurasi rangkaian modul. Masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh jumlah modul dan jenis rangkaian terhadap tegangan yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah TEG pada rangkaian seri dan paralel. Metode yang digunakan yakni eksperimental dengan variabel bebas jumlah modul (2 dan 3 unit) dan jenis rangkaian pada modul tipe SP1848 27145 SA berbahan *Bismuth Telluride*, dengan menjaga suhu tetap menggunakan sumber air panas dan es batu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada rangkaian seri, penambahan jumlah TEG meningkatkan tegangan secara signifikan, dari sekitar 2,9 V menjadi 3,3 V. Sebaliknya, pada rangkaian paralel penambahan modul tidak meningkatkan tegangan secara langsung dan cenderung konstan pada kisaran 1,73 V hingga 1,74 V. Simpulan pada penelitian ini yakni menegaskan bahwa konfigurasi seri lebih efektif untuk mencapai peningkatan tegangan, sementara rangkaian paralel memberikan stabilitas keluaran yang mendukung pengembangan sistem pembangkit termoelektrik yang efisien.

Kata kunci: *Bismuth Telluride*, Efek Seebeck, Tegangan, *Thermoelectric Generator*.

Abstract: The utilization of waste heat energy through Thermoelectric Generator (TEG) technology is a solution in energy conservation, but the optimization of its electrical output is highly dependent on understanding the electrical characteristics and module circuit configuration. The main issue in this study is how the number of modules and the type of circuit affect the voltage produced. This study aims to analyze the effect of the number of TEGs in series and parallel circuits. The method used was experimental with independent variables of the number of modules (2 and 3 units) and the type of circuit in the SP1848 27145 SA type module made of *Bismuth Telluride*, while maintaining a constant temperature using a hot water source and ice cubes. The results showed that in a series circuit, adding TEGs significantly increased the voltage from around 2.9 V to 3.3 V. Conversely, in parallel circuits, the addition of modules did not directly increase the voltage, which tended to remain constant in the range of 1.73 V to 1.74 V. The conclusion of this study confirms that series configuration is more effective for achieving voltage increases, while parallel circuits provide output stability that supports the development of efficient thermoelectric power generation systems.

Keywords: *Bismuth Telluride*, Seebeck Effect, Voltage, *Thermoelectric Generator*.

© 2025, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Dalam kehidupan sehari-hari banyak energi panas yang terbuang, misalnya pada saluran gas buang kendaraan, mesin pembakaran internal, cerobong asap industri, dan berbagai proses industri lainnya. Energi panas yang terbuang tersebut dapat dimanfaatkan dan diubah menjadi energi listrik menggunakan teknologi termoelektrik. Melalui penerapan teknologi ini gas buang kendaraan dan mesin pembakaran internal dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik yang dimanfaatkan sebagai sumber daya bagi berbagai sistem di dalam kendaraan, mengurangi beban pada sistem pengisian daya tradisional seperti alternator (Rifqi dan Yudiyanto, 2025). Selain itu, pemanfaatan panas buang pada cerobong asap industri berpotensi meningkatkan efisiensi energi sistem industri serta mendukung upaya pengurangan emisi dan konservasi energi. Selain pada transportasi dan industri, TEG juga

berpotensi digunakan sebagai sistem pembangkit listrik berskala kecil di daerah yang sulit dijangkau jaringan listrik konvensional.

Thermoelectric Generator (TEG) adalah pembangkit listrik yang mengubah energi panas atau perbedaan suhu menjadi energi listrik secara langsung berdasarkan prinsip termoelektrik. TEG adalah alat semikonduktor yang menghasilkan tegangan listrik berdasarkan perbedaan suhu. Pembangkit daya termoelektrik ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik konvensional. Diantaranya, TEG tidak memiliki komponen yang bergerak (*moving parts*), sehingga sistem ini efektif digunakan dan tidak memerlukan perawatan khusus (Krsimantoro et al., 2023). Selain itu, teknologi TEG dapat bekerja secara kontinu selama terdapat sumber panas yang tersedia,

menjadikannya ideal untuk aplikasi di Lokasi yang sulit dijangkau.

Prinsip kerja dari *thermoelectric generator* didasarkan pada Efek *Seebeck*, di mana perbedaan temperatur antara dua material semikonduktor yang berbeda akan mengalirkan arus listrik dan menghasilkan beda potensial. Efek *Seebeck* ini mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Ketika dua bahan yang berbeda disambungkan pada kedua ujungnya dan terdapat perbedaan temperatur di antara kedua sambungan tersebut, maka akan terjadi aliran arus listrik. Setiap bahan memiliki koefisien *Seebeck* yang berbeda-beda, dan semakin besar koefisien ini, maka beda potensial yang dihasilkan juga semakin besar. Efek *Seebeck* merupakan kebalikan dari Efek *Peltier* (*Thermoelectric Cooling/TEC*). Pada Efek *Peltier*, ketika arus listrik dialirkkan melalui dua logam yang berbeda yang direkatkan dalam sebuah rangkaian, akan terjadi penyerapan panas pada satu sambungan dan pelepasan panas pada sambungan lainnya.

Modul TEG seringkali dikonfigurasi dalam bentuk rangkaian untuk mendapatkan output yang sesuai dengan kebutuhan. Konfigurasi rangkaian TEG dapat dilakukan secara seri maupun paralel, yang masing-masing memiliki karakteristik elektrik yang berbeda. Pada rangkaian seri, beberapa modul TEG dihubungkan secara berurutan sehingga tegangan total merupakan penjumlahan tegangan dari masing-masing modul, sedangkan arus yang mengalir tetap sama (Krsimantoro et al., 2023). Dengan demikian, rangkaian seri akan meningkatkan tegangan *output* secara signifikan seiring dengan penambahan jumlah modul TEG. Sebaliknya, pada rangkaian paralel, beberapa modul TEG dihubungkan dengan kutub positif dan negatif yang sama, sehingga tegangan *output* tetap konstan sama dengan tegangan satu modul, tetapi arus total merupakan penjumlahan arus dari setiap modul. Efisiensi TEG umumnya sekitar antara 3-8%, tergantung pada material yang digunakan dan perbedaan temperatur yang digunakan (Kusuma, et al., 2021). Pemahaman mendalam tentang karakteristik elektrik TEG pada berbagai konfigurasi rangkaian serta nilai koefisien *Seebeck* material yang digunakan menjadi kunci dalam pengembangan sistem pembangkit listrik termoelektrik yang efisien. Oleh karena itu, dilakukan praktikum ini untuk memahami karakteristik elektrik modul TEG berdasarkan Efek *Seebeck*, pengaruh jumlah TEG terhadap nilai tegangan pada rangkaian seri dan paralel.

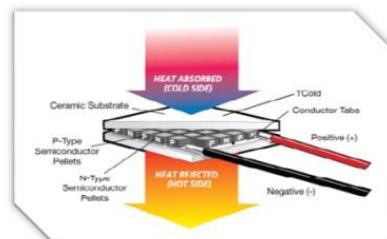
DASAR TEORI

Thermoelectric Generator (TEG)

Thermoelectric generator adalah memanfaatkan perbedaan suhu yang terjadi dilingkungan menjadi energi listrik. *Thermoelectric generator* menggunakan sebuah elemen yang disebut *peltier*. Termoelektrik terbuat dari *solid state material* (material zat padat) yang dapat mengkonversi energi dari perbedaan

temperatur ke beda potensial (Efek *Seebeck*), atau dari arus listrik menjadi perbedaan temperatur (Efek *Peltier*) (Putranto, et al., 2020). TEG tidak memiliki bagian yang bergerak, sehingga memiliki keunggulan seperti tidak bersuara, bebas perawatan, ramah lingkungan, dan memiliki umur operasi yang panjang (Saputra et al., 2020).

TEG terdiri dari pasangan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang dihubungkan secara elektrik dalam konfigurasi seri dan secara termal dalam konfigurasi paralel. TEG terdiri dari sisi panas dan sisi dingin yang memungkinkan dapat mengalirkan elektron dari sisi panas ke sisi yang lebih dingin. Seperti pada gambar dibawah, penjelasan *Seebeck* terkait hal ini yakni jika kedua simpangan stabil pada temperatur berbeda, maka akan menghasilkan tegangan. Konduktivitas termal air biasanya lebih tinggi dari pada udara, sehingga koefisien perpindahan panas lebih maksimal. Efek *Peltier* merupakan kebalikan Efek *Seebeck* yakni perbedaan temperatur disebabkan oleh tegangan, dan ketidak stabilan temperatur yang disebabkan oleh koefisien *Seebeck* merupakan Efek Thomson. Dari sini TEG dibangun menggunakan prinsip dasar efek *Seebeck*, sehingga panas yang tersedia di bumi dapat dimanfaatkan lebih maksimal (Umam et al., 2017).



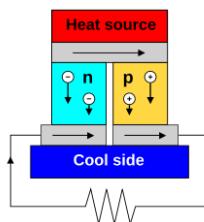
Gambar 1. Skema modul termoelektrik
(Sumber: Arruafy et al., 2024)

Prinsip Kerja *Thermoelectric Generator (TEG)*

Prinsip kerja TEG berlandaskan pada konsep perpindahan panas dan interaksi pembawa muatan di dalam material semikonduktor. Modul TEG umumnya terdiri dari banyak pasangan elemen semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Kedua elemen ini disusun secara seri secara elektrik untuk memperbesar tegangan keluaran, sedangkan secara termal elemen-elemen tersebut disusun paralel sehingga seluruh pasangan mengalami perbedaan suhu yang sama. Penyusunan ini memungkinkan pembentukan jalur konversi panas menjadi listrik yang efisien di dalam modul (Jayanegara et al., 2023).

Ketika salah satu sisi modul TEG diberi sumber panas, seperti *heater*, pembakaran, atau radiasi matahari, suhu pada sisi tersebut meningkat dan menciptakan gradien suhu terhadap sisi lainnya. Sisi dingin dijaga tetap pada temperatur lebih rendah menggunakan *kon*, pendingin udara, atau pendingin air sehingga gradien temperatur dapat dipertahankan. Perbedaan temperatur ini memicu pembawa muatan (elektron pada tipe-n dan *hole* pada tipe-p) untuk

bergerak dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah. Pergerakan terarah ini menghasilkan beda potensial sehingga tercipta gaya gerak listrik (GGL). Besarnya GGL dipengaruhi oleh perbedaan suhu, jumlah pasangan termoelektrik dalam modul, dan sifat material itu sendiri. Kinerja TEG sangat bergantung pada kemampuannya mempertahankan perbedaan suhu yang besar antara sisi panas dan sisi dingin. Jika perbedaan suhu mengecil, gaya gerak listrik akan turun secara signifikan (Saputra et al., 2023). Karena itu desain TEG modern sering menyertakan teknologi pendinginan yang lebih baik untuk mengoptimalkan tegangan keluaran. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa TEG lebih efisien bila digunakan pada kondisi dengan sumber panas stabil dan pendinginan efektif. Efisiensi konversi TEG sangat bergantung pada sifat material termoelektrik yang digunakan, yang diukur melalui parameter *figure of merit* (ZT). Semakin tinggi nilai ZT material, maka semakin tinggi pula efisiensi konversi energi yang dapat dicapai. Prinsip TEG ini telah diterapkan diberbagai penelitian eksperimental, seperti pemanfaatan panas buang knalpot kendaraan, cerobong asap industri serta panas permukaan atap seng akibat radiasi matahari.



Gambar 2. Prinsip Kerja thermoelektrik
(Sumber: Umam et al., 2017)

Efek Seebeck

Efek Seebeck terjadi karena pemanasan pada salah satu sisi material meningkatkan energi kinetik pembawa muatan. Pada semikonduktor tipe-n, elektron akan bergerak dari sisi panas ke sisi dingin, sedangkan pada tipe-p, *hole* bergerak dari sisi panas menuju sisi dingin. Migrasi pembawa muatan ini menyebabkan akumulasi muatan pada salah satu sisi sehingga tercipta beda potensial listrik. Beda potensial inilah yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai sumber listrik. Besarnya tegangan Seebeck bergantung pada beberapa faktor, yaitu perbedaan suhu, sifat intrinsik material, tingkat doping semikonduktor, dan mobilitas pembawa muatan. Fenomena ini bersifat hampir linier untuk perbedaan temperatur tertentu, sehingga semakin besar gradien suhu yang diterapkan, semakin besar pula tegangan yang dihasilkan (Mainil et al., 2020).

Dengan kata lain, Efek Seebeck merupakan fenomena yang mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik (Wirawan, 2021). Prinsip dasar Efek Seebeck dapat dijelaskan melalui hubungan antara tegangan yang muncul dan gradien suhu pada material termoelektrik. Koefisien Seebeck

didefinisikan sebagai perubahan tegangan terhadap perubahan suhu:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

Persamaan di atas menggambarkan bahwa besarnya tegangan yang muncul akan mengikuti perubahan suhu. Untuk menghitung total tegangan yang dihasilkan oleh suatu modul TEG, persamaan tersebut dapat diintegralkan sepanjang rentang suhu dari sisi dingin (T_{cold}) hingga sisi panas (T_{hot}):

$$V = \int_{T_{cold}}^{T_{hot}} S(T) dT \quad (2)$$

Pada material termoelektrik seperti Bi_2Te_3 yang digunakan dalam praktikum, nilai koefisien Seebeck cenderung tetap pada rentang suhu operasi. Dengan mengasumsikan bahwa S tidak berubah terhadap T , proses integrasi dapat disederhanakan menjadi:

$$V = S(T_{hot} - T_{cold}) \quad (3)$$

Adapun perbedaan suhu didefinisikan sebagai:

$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold} \quad (4)$$

Sehingga bentuk akhir persamaan adalah:

$$V = S \cdot \Delta T \quad (5)$$

Keterangan:

S = Koefisien Seebeck (V/K)

dV = Perubahan tegangan listrik yang muncul akibat perubahan suhu

dT = Perubahan suhu antara dua titik material

V = Tegangan total yang dihasilkan modul TEG (V)

T_{cold} = Suhu sisi dingin (K)

T_{hot} = Suhu sisi panas (K)

ΔT = Selisih suhu antara sisi panas dan dingin (K)

Persamaan tersebut merupakan bentuk dasar dari Efek Seebeck, yang menyatakan bahwa tegangan yang dihasilkan berbanding lurus terhadap koefisien Seebeck material dan besar perbedaan suhu yang diberikan. Dengan demikian, semakin besar nilai ΔT pada modul TEG, maka semakin besar pula tegangan yang dapat dibangkitkan, selama sifat termal material tetap berada dalam kondisi stabil. Penelitian oleh Angeline et al. (2017) menunjukkan bahwa modul $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-PbTe}$ terjadi variasi suhu panas dan dingin secara langsung memengaruhi keluaran tegangan dan daya generator. Selain itu, modul tersebut memiliki distribusi suhu yang signifikan meningkatkan konversi termal listrik pada generator termoelektrik. Temuan ini memperkuat bahwa fenomena Efek Seebeck menunjukkan hubungan sebanding antara tegangan dengan perbedaan temperatur modul TEG.

Konfigurasi Rangkaian Seri dan Paralel

Rangkaian Peltier Seri-Parallel merupakan konfigurasi pengaturan dari modul termoelektrik yang penting dalam aplikasi pengelolaan energi. Dalam konfigurasi seri beberapa modul Peltier dihubungkan secara berurutan. Hal ini memungkinkan tegangan yang dihasilkan dari masing-masing modul untuk dijumlahkan, sehingga total tegangan *output* dari rangkaian dapat meningkat. Konfigurasi ini sering digunakan ketika aplikasi memerlukan peningkatan tegangan, seperti dalam pengisian baterai atau untuk

aplikasi yang memerlukan sumber tegangan yang lebih tinggi. Konfigurasi paralel, di sisi lain, melibatkan penyusunan beberapa modul *Peltier* dalam konfigurasi paralel, dimana setiap modul menerima tegangan yang sama, tetapi arus yang dihasilkan adalah jumlah dari arus yang dihasilkan oleh masing-masing modul. Ini memungkinkan arus total dari rangkaian meningkat, yang berguna untuk aplikasi yang memerlukan aliran arus yang besar, seperti pengoperasian motor atau perangkat yang membutuhkan daya tinggi. Prinsip kerja dari kedua konfigurasi ini berdasarkan Efek *Peltier*, dimana aliran arus listrik melalui sambungan antara dua bahan semikonduktor menghasilkan pemindahan panas dari satu sisi ke sisi lainnya (Arruafy et al., 2024). Dalam konfigurasi seri, perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin masing-masing modul harus dijaga agar tetap optimal untuk memastikan efisiensi konversi energi yang baik. Di sisi lain, konfigurasi paralel memerlukan perhatian terhadap perbedaan arus yang dapat terjadi, terutama jika modul-modul memiliki karakteristik yang tidak seragam. Fleksibilitas dari konfigurasi seri-paralel ini memungkinkan pengaturan yang lebih baik terhadap berbagai kondisi operasional dan kebutuhan daya dari sistem pengelolaan limbah atau aplikasi energi lainnya.

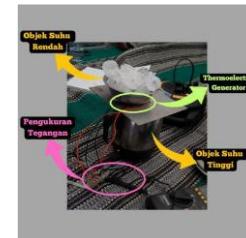
Studi oleh Pahrudin et al. (2025) menunjukkan bahwa perbedaan suhu yang stabil pada TEG dapat menghasilkan daya listrik yang konsisten terutama jika dikombinasikan dengan konfigurasi rangkaian yang tepat. Hal ini menegaskan bahwa prinsip TEG sangat bergantung pada pengelolaan sumber panas dan sistem pendinginan yang efektif. Selain itu, variasi konfigurasi pada rangkaian memengaruhi karakteristik keluaran listrik yang dihasilkan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menguji karakteristik elektrik modul *Thermoelectric Generator* (TEG) tipe SP1848 27145. Dengan menggunakan variabel bebas jumlah TEG (2 dan 3 unit) serta jenis konfigurasi rangkaian (seri dan paralel), variabel tergantung yakni tegangan yang langsung terbaca menggunakan multimeter digital dan variabel kontrolnya yakni suhu dingin, suhu panas serta tipe modul. Metode ini digunakan untuk menguji pengaruh variabel bebas terhadap variabel tergantung yang pengujiannya melibatkan manipulasi variabel bebas. Pemilihan variasi jumlah modul sebanyak dua dan tiga unit bertujuan untuk mengamati pengaruh penambahan jumlah modul terhadap karakteristik keluaran serta menjaga kestabilan sistem. Variasi ini memungkinkan analisis perubahan karakteristik tegangan secara bertahap pada masing-masing konfigurasi rangkaian.

Tahapan penelitian dimulai dengan merangkai modul TEG di antara plat logam yang berfungsi sebagai penghubung termal antara sumber panas dan sumber dingin. Perbedaan suhu dijaga agar tetap stabil selama pengambilan data. Pengukuran suhu pada sisi

panas dan dingin dilakukan menggunakan termometer berskala celcius, sehingga perbedaan suhu dapat dipantau dan dijaga stabil selama proses pengambilan data. Pengujian dilakukan dengan dua konfigurasi, yaitu seri dan paralel. Pada pengujian pertama, modul disusun secara seri, dimana kutub-kutub modul dihubungkan secara berurutan. Pada pengujian kedua, modul disusun secara paralel, dimana setiap kutub positif dan negatif dihubungkan pada titik yang sama. Tegangan keluaran yang dihasilkan dari setiap konfigurasi rangkaian diukur secara langsung menggunakan multimeter digital Sanwa pada mode pengukuran tegangan DC dengan rentang hingga 20 V.



Gambar 3. Rangkaian alat percobaan *thermoelectric generator* (TEG)

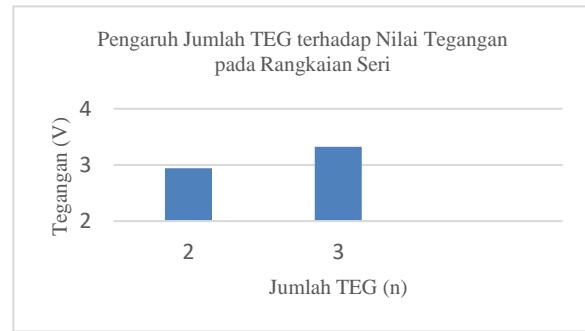
(Sumber: Tim Laboratorium Eksperimen, 2020)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel ini merupakan hasil pengujian eksperimental terhadap modul TEG untuk menganalisis karakteristik elektriknya. Pengujian dilakukan dengan membandingkan konfigurasi rangkaian seri dan paralel. Data hasil pengujian dapat dilihat di bawah ini:

TABEL I
Data hasil percobaan *Thermoelectric Generator* (TEG) pada rangkaian seri

No.	Jumlah TEG (n)	Tegangan (V)
1.	2 TEG	2,925
		2,937
		2,941
		2,945
		2,952
2.	3 TEG	3,308
		3,319
		3,323
		3,327
		3,333



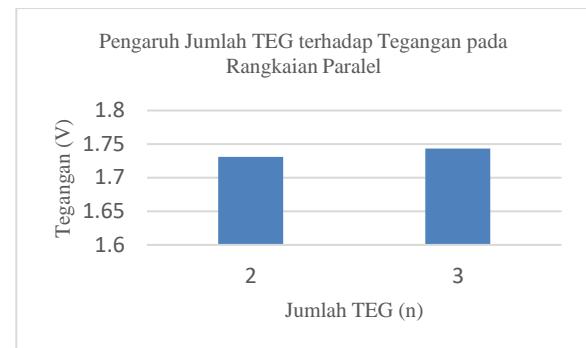
Gambar 4. Grafik pengaruh jumlah TEG terhadap nilai tegangan pada rangkaian seri

Pada pengujian pertama menggunakan rangkaian seri, peningkatan jumlah modul TEG secara langsung berpengaruh pada tegangan keluaran karena setiap modul berperan sebagai sumber energi listrik yang berasal dari Efek *Seebeck*. Ketika modul-modul tersebut dihubungkan seri, pasangan-pasangan semikonduktor tersebut memperluas lintasan termal-listrik sehingga semakin banyak pasangan yang berkontribusi secara kumulatif terhadap pembentukan tegangan. Secara fisik, fenomena ini menunjukkan hubungan langsung antara jumlah elemen konversi energi dengan besarnya energi listrik yang dihasilkan. Selain itu, menurut teori konversi energi termal, lebih banyak modul berarti lebih banyak titik pertemuan panas dan dingin yang berpindah energi dari bentuk termal ke bentuk listrik. Tegangan yang dihasilkan berada pada kisaran sekitar 2,9 volt, sedangkan ketika jumlah modul ditingkatkan menjadi tiga TEG, tegangan meningkat menjadi sekitar 3,3 V. Peningkatan ini mengindikasikan adanya penambahan tegangan yang signifikan. Pola peningkatan ini sangat sesuai dengan prinsip dasar rangkaian seri dimana setiap modul yang ditambahkan akan berkontribusi menambah tegangan total sistem. Visualisasi grafik ini dengan jelas membuktikan bahwa dalam rangkaian seri, semakin banyak modul TEG yang dipasang, semakin tinggi tegangan listrik yang dapat dihasilkan. Hal ini mengonfirmasi teori bahwa tegangan dalam rangkaian seri merupakan hasil penjumlahan dari tegangan masing-masing komponen yang tersusun secara berurutan. Ketika lebih banyak modul disusun dalam satu jalur, maka jumlah elemen yang berpartisipasi dalam proses konversi energi termal menjadi energi listrik juga semakin banyak. Dengan demikian, total energi termal yang dikonversi akan lebih besar, sehingga tegangan yang dihasilkan meningkat seiring penambahan modul. Selain itu, pada rangkaian seri setiap modul ikut memperluas lintasan perpindahan energi dari bagian panas menuju bagian dingin, sehingga fenomena termal-listrik yang terjadi pada gabungan modul semakin signifikan.

TABEL II

Data hasil percobaan *Thermoelectric Generator* (TEG) pada rangkaian paralel

No.	Jumlah TEG (n)	Tegangan (V)
1.	2 TEG	1,727
		1,728
		1,730
		1,732
		1,737
2.	3 TEG	1,738
		1,741
		1,743
		1,746
		1,748



Gambar 5. Grafik pengaruh jumlah TEG terhadap nilai tegangan pada rangkaian paralel

Pada percobaan kedua menggunakan rangkaian paralel, dimana setiap modul TEG ditempatkan pada jalur yang sejajar sehingga masing-masing modul bekerja sebagai sumber energi yang berbagi beban secara kolektif. Dalam teori termoelektrik, setiap modul TEG tetap menghasilkan gaya gerak listrik melalui Efek *Seebeck*, tetapi tegangan yang terbentuk tidak dijumlah seperti pada rangkaian seri karena kutub positif dan negatif setiap modul dihubungkan pada titik yang sama. Meskipun demikian, keberadaan lebih banyak modul paralel memberikan manfaat berupa tegangan keluaran yang lebih stabil ketika sistem dihubungkan dengan beban. Hal ini dapat dijelaskan melalui teori energi dan rugi daya, bahwa dengan bertambahnya jalur penghantar arus, hambatan internal sistem menurun sehingga kehilangan energi dalam bentuk panas berkurang, dan tegangan tidak mudah turun saat arus mengalir ke beban. Oleh karena itu, pada penggunaan tiga modul TEG paralel, meskipun tegangan tidak meningkat secara signifikan dibandingkan dua modul, stabilitas tegangan dan kemampuan suplai arus menjadi lebih baik sesuai prinsip teori kelistrikan dan konversi energi termoelektrik.

Pada grafik batang pertama yang merepresentasikan konfigurasi dua TEG menunjukkan tegangan sekitar 1,73 volt, sementara batang kedua untuk tiga TEG menunjukkan tegangan sekitar 1,74 volt. Perbedaan antara kedua konfigurasi ini hanya sekitar 0,01 V sehingga dapat dianggap hampir konstan. Visualisasi grafik ini dengan sangat jelas menjelaskan prinsip dari rangkaian paralel, dimana tegangan pada setiap cabang paralel tidak meningkatkan tegangan secara signifikan. Ketinggian batang yang hampir sama antara dua konfigurasi membuktikan bahwa dalam rangkaian paralel, tegangan bersifat konstan terlepas dari berapa banyak modul yang dipasang. Stabilitas nilai tegangan yang terlihat pada grafik paralel ini juga mengindikasikan bahwa modul-modul TEG bekerja dengan baik dan konsisten, dimana setiap modul menghasilkan tegangan yang relatif seragam sehingga ketika diparalelkan tidak terjadi perbedaan potensial yang signifikan. Fenomena ini dapat dijelaskan berdasarkan prinsip dasar rangkaian listrik, dimana pada konfigurasi ini kutub positif dan kutub negatif

dihubungkan pada pasangan yang sama. Hal ini menyebabkan beda potensial listrik yang terukur pada keluaran sistem ditentukan oleh tegangan satu modul TEG bukan pada jumlah modul yang terpasang. Selain itu, setiap modul TEG bekerja pada perbedaan temperatur yang relatif sama. Akibatnya, tegangan yang dihasilkan pada setiap masing-masing modul relatif sama.

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori dasar termoelektrik dan temuan peneliti-peneliti sebelumnya terkait sistem pembangkit listrik termoelektrik. Berdasarkan Efek *Seebeck*, tegangan keluaran TEG berbanding lurus dengan berbedaan temperatur serta jumlah modul yang digunakan yang disusun secara seri. Selain itu, pada konfigurasi paralel menunjukkan tegangan keluaran relatif konstan meskipun jumlah modul bertambah yang juga sesuai dengan karakteristik rangkaian paralel. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi rangkaian menjadi faktor penting dalam perancangan sistem pembangkit listrik termoelektrik. Pemilihan konfigurasi rangkaian seri atau paralel dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa jumlah modul TEG sangat berpengaruh terhadap besar keluaran listrik yang dihasilkan. Pada rangkaian seri, penambahan jumlah TEG dapat meningkatkan nilai tegangan karena setiap modul memberikan tegangan berdasarkan Efek *Seebeck* sehingga semakin banyak elemen konversi energi yang bekerja secara berurutan maka semakin besar tegangan yang diperoleh. Konfigurasi seri sesuai untuk aplikasi yang memerlukan peningkatan tegangan listrik. Pada rangkaian paralel, penambahan jumlah TEG tidak memberikan peningkatan tegangan secara langsung, tetapi menghasilkan keluaran tegangan yang relatif konstan karena setiap modul bekerja saling mendukung dalam mempertahankan nilai tegangan meskipun terjadi fluktuasi pada proses pemanasan. Karakteristik ini menunjukkan bahwa konfigurasi ini sesuai digunakan pada sistem yang membutuhkan kestabilan tegangan keluaran. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi sistem TEG sebagai pembangkit listrik tambahan pada pemanfaatan panas buang di sektor industri maupun transportasi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk meneliti karakteristik arus dan daya keluaran, mengoptimalkan sistem serta mengevaluasi kinerja TEG pada skala yang lebih besar untuk mendukung implementasi secara luas.

REFERENSI

Jurnal:

1. Angeline, A. A., Jayakumar, J., & Asirvatham, L. G. Performance Analysis of (Bi₂-Te₃-PbTe) Hybrid Thermoelectric Generator. International

Journal of Power Electronics and Drive System (LJPEDS). 2017; 8 (2): 917-925.

2. Arruafy, M. G., Wulandari, D., Sakti, A. M., & Ganda, A. N. F. Rancang Bangun Pembangkit Listrik Berbasis Generator Termoelektrik pada Alat Pengolah Limbah Sampah. Jurnal Rekayasa Mesin. 2024; 9 (02): 345-351.
3. Jayanegara, S., Rifqie, D. M., & Hidayat, A. Optimisasi Sumber Energi Listrik Dari Mesin Pengering Rak Telur Menggunakan Modul Termoelektrik Generator. Indonesia Journal of Embedded Systems, Security and Intelligent Systems. 2023; 04 (02): 64-69.
4. Krsimantoro, D., Soetedjo, A., & Limpraptomo, F. Y. Aplikasi Thermoelectric Generator (TEG) Pada Kompor Gas Menggunakan Dc/Dc Boost Konverter dan Kontrol Mppt Incremental Conductance (Inc). Magnetika: Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro. 2023; 7 (2): 88-97.
5. Kusuma, R. F., Afroni, M. J., & Melfazen, O. Perhitungan Efisiensi Peltier TEG (Thermoelectric Generator) SP-1848 Menggunakan Perbandingan Suhu Panas dan Dingin sebagai Energi Alternatif. Science Electro. 2021; 13(1).
6. Mainil, R. I., Andrapica, G., & Aziz, A. Pengaruh Laju Aliran Air Pendingin terhadap Kinerja Pembangkit Listrik berbasis Thermoelectric Generator (TEG). Jurnal Sains dan Teknologi. 2020; 19 (1): 36-41.
7. Pahrudin, D., Arbie, A., Setiawan, D., Yunus, M., Kurniasari, S., & Irsan. Pemanfaatan Thermoelectric Generator (TEG) untuk Konversi Panas Atap Seng Menjadi Energi Listrik. Buletin Fisika. 2025; 26 (1): 46-53.
8. Putranto, L. H. dan Haryudo, S. I. Pemanfaatan Solar Cell Dan Thermoelektric Generator (Teg) Sebagai Sumber Energi Listrik Lampu Penerangan Jalan 50 Watt. Jurnal Teknik Elektro. 2020; 9(1).
9. Rifqi, A. B., & Yudiyanto, E. Analisa Pemanfaatan Thermoelectric Generator sebagai Pembangkit Listrik Menggunakan Panas Gas Buang Kendaraan Bermotor. Jurnal Teknik Mesin (Journal of Mechanical Engineering). 2025; 4 (1): 386-393.
10. Saputra, N., Mainil, R. I., & Aziz, A. Pembangkit energi listrik memanfaatkan penyerapan panas jalan beton menggunakan teknologi termoelektrik generator (TEG) dengan pelat penyerap tembaga berbentuk I. Jurnal Teknologi. 2023; 15 (2): 325-336.

11. Umam, F., Budiarto, H., & Wahyuni, S. Perancangan Thermoelectric Generator (TEG) sebagai Sumber Energi Terbarukan. Rekayasa. 2017; 10 (2): 123-127.

Teksbooks:

1. Tim Laboratorium Eksperimen. Buku Panduan Praktikum Termodinamika. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya. 2020.
2. Wirawan, M. Teori Dasar dan Aplikasi Pendinginan Termoelektrik (Pendingin Tanpa Freon). Deepublish. 2021.