



## Studi eksperimen prestasi termoelektrik sebagai pemanen energi listrik mikro: efek gradien temperatur dan konfigurasi modul

La Ode Ahmad Barata\*

Jurusan Teknik Mesin Universitas Halu Oleo, Kendari 93232

### Riwayat Artikel:

Diajukan: 10/05/2026

Diterima: 31/05/2026

Daring: 02/06/2026

Terbit: 30/06/2026

### Kata Kunci:

Efek seebeck

Heatpipe

Konversi energi

Disipasi panas

Efisiensi termal

### Keywords:

Seebeck effect

Heatpipe

Energy conversion

Heat dissipation

Thermal efficiency

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja termoelektrik sebagai sistem pemanen energi listrik mikro melalui pengujian terhadap efek gradien temperatur pada sisi modul termoelektrik (TEM). Prinsip dasar kerja generator termoelektrik (TEG) mengacu pada efek Seebeck, di mana perbedaan suhu antara dua sisi modul menghasilkan perbedaan potensial listrik. Studi eksperimen ini dilakukan menggunakan satu dan dua modul TEG dalam konfigurasi seri dan paralel dengan variasi kapasitas sumber panas sebesar 150 W dan 300 W. Sistem pendinginan *heat pipe* (HP) juga digunakan untuk meningkatkan pembuangan panas pada sisi dingin modul. Pengambilan data dilakukan secara otomatis menggunakan sistem akuisisi data (DAQmx) dan perangkat lunak LABView v.8.5 dengan durasi pengujian 120 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan gradien temperatur ( $\Delta T$ ) berbanding lurus dengan tegangan keluaran dan daya listrik yang dihasilkan. Penggunaan *heat pipe* terbukti signifikan dalam memperbesar  $\Delta T$ , meningkatkan disipasi panas, serta mencegah saturasi termal pada *cold junction* modul. Daya output maksimum pada konfigurasi tunggal dengan HP mencapai 1,2 W pada suhu operasi tinggi, sementara konfigurasi ganda seri mencapai hingga 14 W dengan efisiensi konversi energi sekitar 10%, jauh lebih tinggi dibandingkan konfigurasi paralel. Efisiensi tertinggi dicapai pada konfigurasi seri dengan suplai panas 300 W karena akumulasi efek tegangan antar modul yang menghasilkan kesesuaian antara resistansi internal dan eksternal sistem. Hasil ini menegaskan bahwa kombinasi gradien temperatur tinggi dan sistem pendingin efektif memegang peranan penting dalam mengoptimalkan kinerja TEG.

### Abstract

This study aims to analyze the thermoelectric performance of a micro-scale electrical energy harvesting system by investigating the effect of temperature gradients across the thermoelectric module (TEM). The basic operating principle of a thermoelectric generator (TEG) is based on the Seebeck effect, wherein a temperature difference between the two sides of the module generates an electric potential difference. Experimental studies were conducted using single and dual TEG modules in series and parallel configurations with heat source capacities of 150 W and 300 W. A heat pipe (HP) cooling system was also employed to enhance heat dissipation on the cold side of the modules. Data acquisition was performed automatically using a data acquisition system (DAQmx) and LabVIEW v.8.5 software, with a test duration of 120 minutes. The results of the study show that an increase in the temperature gradient ( $\Delta T$ ) is directly proportional to the output voltage and the electrical power generated. The use of heat pipes proved significant in increasing  $\Delta T$ , improving heat dissipation, and preventing thermal saturation at the module's cold junction. Maximum output power in a single-HP configuration reached 1.2 W at high operating temperatures, while a dual-series configuration achieved up to 14 W with an energy conversion efficiency of approximately 10%, far higher than that of the parallel configuration. The highest efficiency is achieved in a series configuration with a 300 W heat supply due to the cumulative voltage effect between modules, which results in a balance between the system's internal and external resistances. These results confirm that the combination of a high temperature gradient and an effective cooling system plays a crucial role in optimizing TEG performance.

\*Korespondensi: [ahmad.barata@uho.ac.id](mailto:ahmad.barata@uho.ac.id)



## Pendahuluan

Kebutuhan diverifikasi sumber energi menjadi tuntutan penting dan mendesak untuk mengatasi persoalan kelangkaan energi, utamanya energi berbasis fosil. Selain itu, tuntutan terhadap pentingnya kelestarian lingkungan menjadi isu utama saat ini, sehingga sumber-sumber energi baru dan terbarukan terus dieksplorasi seperti energi matahari, angin, aliran air, getaran dan lain-lain. Teknologi termoelektrik merupakan salah satu sumber alternatif energi yang memanfaatkan perilaku elektron akibat adanya gradien temperatur antara dua sisi permukaannya. Sistem energi ini diklaim ramah lingkungan, efisien, tahan lama, dan juga berpotensi menghasilkan energi dalam skala besar maupun kecil [1],[2]. Ada pun prinsip kerja dari modul termoelektrik (*TEM*) adalah dengan berdasarkan Efek Seebeck yaitu “jika 2 buah logam yang berbeda disambungkan salah satu ujungnya, kemudian diberikan suhu yang berbeda pada sambungan, maka terjadi perbedaan tegangan pada ujung yang satu dengan ujung yang lain”[3].

Fenomena termoelektrik pertama kali ditemukan tahun 1821 oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johan Seebeck. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian. Di antara kedua logam tersebut lalu diletakkan jarum kompas. Ketika sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata bergerak. Belakangan diketahui, hal ini terjadi karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek Seebeck [2],[3]. Selanjutnya, Jean Charles Peltier untuk melihat kebalikan dari fenomena tersebut dengan mengalirkan listrik pada dua buah logam yang direkatkan dalam sebuah rangkaian. Ketika arus listrik dialirkan, terjadi penyerapan panas pada sambungan kedua logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang lainnya. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Fenomena ini kemudian dikenal dengan efek Peltier.

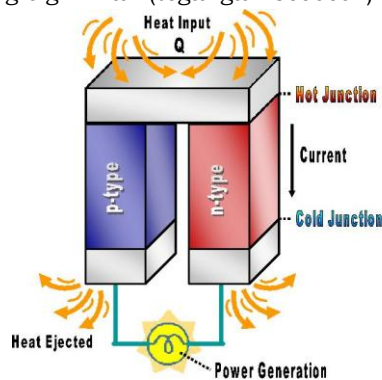
Efek Seebeck dan Peltier merupakan dasar pengembangan teknologi termoelektrik, bahwa jika ada aliran arus pada persentuhan dua buah konduktor yang tidak sejenis akan menghasilkan perbedaan temperatur diantara konduktor-konduktor tersebut. Modul Termoelektrik terdiri dari dua buah semikonduktor tipe *N* dan tipe *P*, panas akan di pindahkan sesuai dengan arah aliran arus pembawa. Semikonduktor tipe *N* akan menjadikan elektron sebagai arus pembawa sehingga elektron akan berperan sangat penting dalam menciptakan efek peltier [3],[4]

Penelitian termoelektrik muncul kembali tahun 1990-an setelah sempat menghilang hampir lima dasawarsa karena efisiensi konversi yang tidak bertambah. Setidaknya ada tiga alasan yang mendukung kemunculan tersebut. Pertama, ada harapan besar ditemukannya material termoelektrik dengan efisiensi yang tinggi, yaitu sejak ditemukannya material superkonduktor *High-Tc* pada awal tahun 1986 dari bahan yang selama ini tidak diduga (*ceramic material*). Kedua, sejak awal 1980-an, teknologi material berkembang pesat dengan kemampuan menyusun material tersebut dalam level nano. Ketiga, pada awal tahun 1990, tuntutan dunia tentang teknologi yang ramah lingkungan sangat besar. Ini memberikan imbas kepada teknologi termoelektrik sebagai sumber energi alternatif [6].

Pengintegrasian modul termoelektrik didalam sistem mesin diesel oleh [7] mampu meningkatkan efisiensi termal mesin sebesar 1,1% yang menunjukkan bahwa termoelektrik dapat memulihkan energi bahan bakar yang hilang di aliran gas buang pada mesin pembakaran dalam.

Modul termoelektrik tersusun atas dua substrat keramik yang berisikan termoelemen semikonduktor *Bismuth Telluride (Bi-Te)* tipe *P* dan tipe-*N* yang disusun secara seri listrik dan secara paralel termal antara dua keramik. Umumnya, bentuknya tipis, ukurannya bervariasi dari 3 mm dengan tebal 4 mm sampai 60 mm dengan tebal 5 mm. Beda temperatur antara sisi panas dan dingin bisa mencapai 70 derajat Celcius. Umumnya modul termoelektrik memiliki 3 - 127 pasang atau lebih semikonduktor [1]

Peralatan pembangkit daya termoelektrik umumnya menggunakan material semikonduktor khusus yang akan mengoptimalkan prinsip kerja dari efek Seebeck. Energi juga merupakan efek dari perpindahan pembawa muatan. Karena perpindahan Energi dapat membawa pembawa muatan (*charge carrier*) lebih jauh di dalam material semi konduktor daripada sirkuit pada arah balik, bagaimanapun ada perbedaan potensial yang signifikan (tegangan Seebeck) dibangkitkan.



**Gambar 1.** Fenomena elemen Termoelektrik

Heat pipe merupakan suatu mekanisme yang mengombinasikan prinsip konduktivitas termal dan perubahan fase zat untuk menaikan perpindahan panas antara dua permukaan padat yang berkontak, dengan demikian dapat meningkatkan pelepasan kalor pada sisi dingin modul sehingga menaikan beda temperatur antara dua sisi elemen. Referensi [1] dan [2] menunjukkan bahwa penggunaan heat pipe pada sistem TEG menaikan efisiensi melalui mekanisme penurunan beda temperatur antara dua sisi TE.

Penelitian ini menguji efek kuantitas sumber panas, jumlah modul dan efek penurunan temperatur (kenaikan gradien temperatur) antara dua sisi termoelektrik terhadap prestasi modul sebagai pemanen daya listrik mikro.

**Kinerja Modul Termoelektrik**

Untuk menganalisis prestasi modul Termoelektrik, koefisien Seebeck menjadi hal yang sangat penting, karena adanya tegangan yang muncul yang dikenal sebagai gaya gerak listrik Seebeck. Koefisien Seebeck dapat dinyatakan dengan persamaan Seebeck (1) yang dinyatakan dalam referensi [9], [10]:

$$\alpha = \frac{V_o}{(T_h - T_c)} \tag{1}$$

dimana:

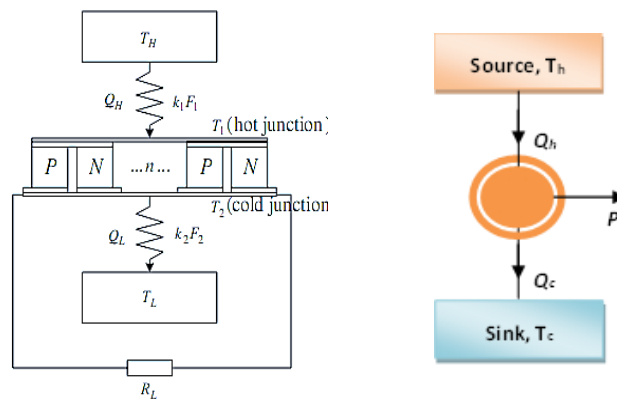
- Vo = Tegangan keluar (volt)
- $\alpha$  = koefisien Seebeck antara 2 material semikonduktor, P dan N (volt/K)
- $T_h, T_c$  = Temperatur termokopel panas dan dingin (K)

Sedangkan arus listrik yang dibangkitkan diberikan dengan persamaan sebagai berikut [10]:

$$I = \frac{\Delta\alpha \times \Delta T}{2 \times R}$$

Dimana:

- I = arus listrik yang mengalir dalam rangkaian elemen (A),
- R = Hambatan listrik elemen termoelektrik (ohm)
- $\Delta\alpha$  = Beda koefisien seebeck antara dua semikonduktor
- $\Delta T$  = Beda temperatur antara dua sisi elemen termoelektrik (K)



**Gambar 2.** Konsep termodinamika Termoelecteic Generator (TEG)

temperatur  $T_1$  dan laju perpindahan panas ( $Q_c$ ) dari cold junction pada temperatur  $T_2$  ke heat sink  $T_L$  adalah masing-masing sebagai berikut [11]:

$$Q_h = n[\alpha I T_h + k(T_h - T_c) - 0.5 \times I^2 \times R] \tag{3}$$

$$Q_c = n[\alpha I T_c + k(T_h - T_c) - 0.5 \times I^2 \times R] \tag{4}$$

dimana  $n$  adalah jumlah elemen termoelektrik pada generator,  $k$  adalah konduktivitas termal elemen (W/mK).

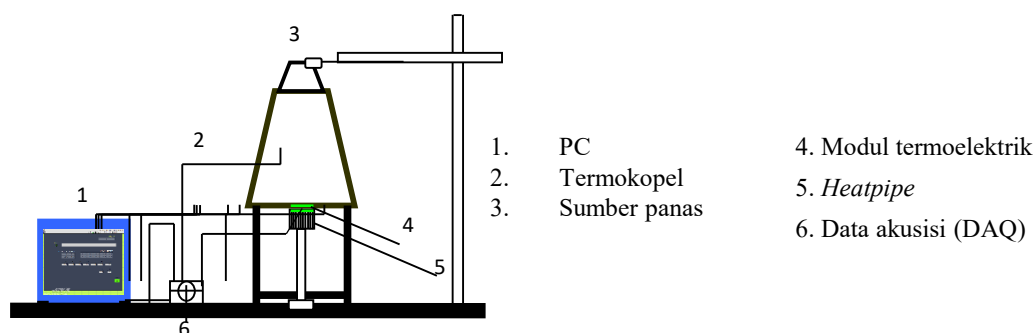
Total *power output* ( $P$ ) dan efisiensi ( $\eta$ ) dari generator multi – elemen termoelektrik sesuai dengan konsep mesin carnot (hukum termodinamika) dalam **Gambar 2** adalah dinyatakan dalam persamaan (5) dan (6) yang dinyatakan dalam [11], [12]:

$$P = Q_h - Q_c = n[\alpha I(T_h - T_c) - I^2 R] \quad (5)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \quad (6)$$

## Metodologi

Penelitian ini menggunakan satu modul termoelektrik, dan dua modul termoelektrik yang divariasikan secara seri dan paralel. Untuk menganalisis efek beda temperatur antara dua sisa modul, maka digunakan perangkat *heatpipe* yang berfungsi menyerap panas sisi modul *TEM*. Modul termoelektrik (*TEM*) diletakkan pada pelat tembaga sebagai media penyerap panas. Metode ini juga serupa digunakan dalam referensi [13], [14]. Pengambilan data temperatur dilakukan di lima titik di bagian atas pelat dan empat titik pada bagian bawah pelat serta satu titik pada termoelektrik (dua titik pada elemen yang disusun paralel).



**Gambar 3.** Skema rancangan pengujian prestasi termoelektrik sebagai pemanen energi listrik

Sumber panas disimulasikan dengan panas lampu halogen kapasitas 150W dan 300W. Setiap titik pengukuran temperatur dengan termokopel dihubungkan ke data akuisisi (*DAQmx*), data tersebut terekam secara otomatis di komputer. Temperatur tiap titik dan tegangan output terukur dengan bantuan perangkat lunak *LABview v.8.5* yang terintegrasi di data akuisisi. Lamanya pengujian untuk setiap perlakuan diambil 120 menit. Skema pengujian prestasi modul termoelektrik di tunjukkan pada **Gambar 3**.

## Hasil dan Pembahasan

### A. Karakteristik parameter kinerja modul termoelektrik

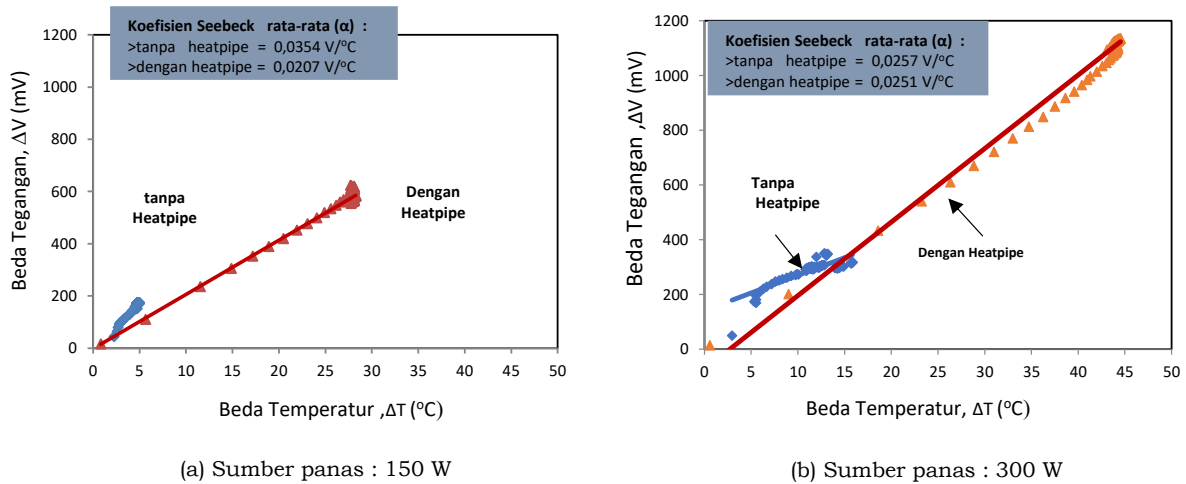
Kenaikan tegangan *output* meningkat seiring dengan naiknya beda temperatur antara dua sisi modul. Modul yang menggunakan *heatpipe* pada sisi dingin menghasilkan beda tegangan yang lebih besar daripada modul tanpa *heatpipe*, demikian pula pada suplai panas lampu 300W. Hal ini karena penggunaan *heatpipe* memperbesar disipasi panas ke sisi dingin termoelektrik. Dengan demikian bahwa ketika terjadi beda temperatur antara dua buah semikonduktor maka timbul beda potensial listrik (efek *Seebeck*).

Kenaikan beda temperatur rata-rata pada modul tunggal suplai panas lampu tanpa *heatpipe* menghasilkan beda tegangan sebesar 35,4 mV dan modul dengan *heatpipe* sebesar 20,7 mV. Pada modul termoelektrik tunggal yang mendapat suplai panas lampu 300W beda tegangan output rata-rata yang dihasilkan setiap kenaikan 1°C tanpa *heatpipe* dan dengan *heatpipe* masing-masing mencapai 25,7 mV dan 25,1 mV. Beda tegangan maksimum modul termoelektrik tunggal tanpa *heatpipe* dan dengan *heatpipe* pada suplai panas lampu 150W masing-masing sebesar 175,2 mV( $\Delta T = 4,8^\circ\text{C}$ ) dan 623,5mV( $\Delta T = 27,7^\circ\text{C}$ ). jika sistem TEG disuplai panas sebesar 300W, hal itu mencapai masing-masing 350,2 mV( $\Delta T = 12,83^\circ\text{C}$ ) dan 1136,2 mV( $\Delta T = 44,51^\circ\text{C}$ ).

Efek utama penggunaan *heatpipe* selain meningkatkan koefisien *seebeck*, juga memperbesar kapasitas disipasi panas modul. Dengan mempertahankan temperatur *cold junction TEM* yang rendah, sistem *TEG* menghasilkan  $\Delta T$  yang besar terhadap input panas yang diberikan. Model tanpa *heatpipe* memiliki saturasi termal rendah, yang membatasi konversi beda tegangan yang terbatas seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.

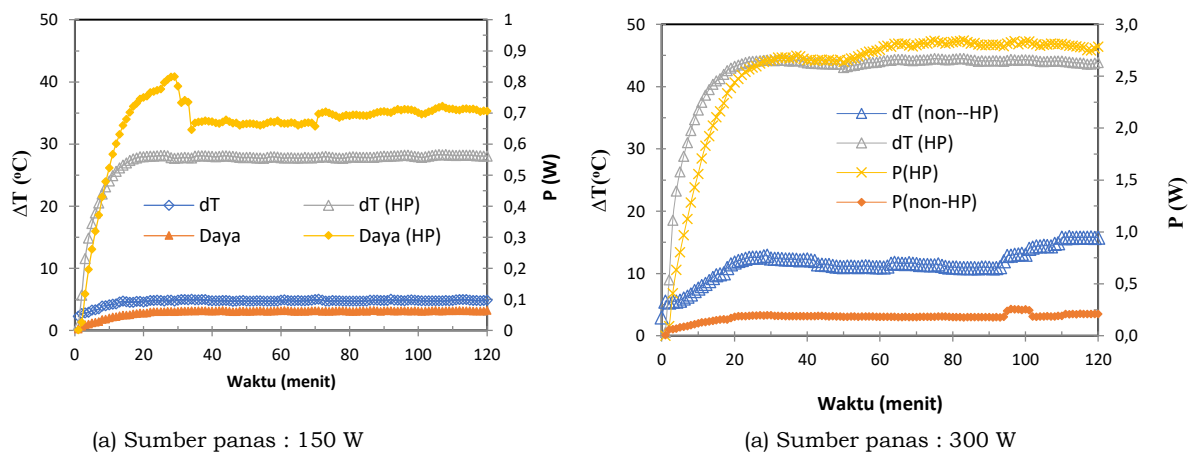
Variasi temporal daya listrik yang dibangkitkan ( $P$ ) dan gradien temperatur ( $\Delta T$ ) pada *TEG* tunggal dengan dua variasi kapasitas sumber panas dan sistem disipasi panas ditunjukkan pada **Gambar 5**.

$\Delta T$  didefinisikan sebagai gradien panas antara sisi panas dan dingin dari modul, yang merupakan parameter kunci pembangkitan daya menurut efek seebeck.



**Gambar 4.** Beda potensial listrik dari model Uji TEG tunggal dengan variasi kuantitas sumber panas

**Gambar 5(a)** dengan aliran panas 150W, *non-HP* menunjukkan  $\Delta T$  yang rendah sekitar 5C, dengan konversi daya Listrik hanya sekitar 0.05W. Sebaliknya, sistem dengan *HP* menaikkan disipasi panas secara signifikan menjadi 28°C dengan daya konversi sebesar maksimum 0.8 W dan stabil pada 0,7W. Jika sistem *TEG* disuplai dengan panas 300W, daya keluaran sistem naik sekitar 14 kali lipat pada sistem dengan *HP*, padahal kenaikan suplai panas hanya 2 kali lipat. Hal ini menunjukkan bahwa menggunakan sistem *HP* pada *TEG* dengan suplai panas tinggi memberikan daya pembangkitan yang lebih baik dibandingkan pada intensitas panas rendah.

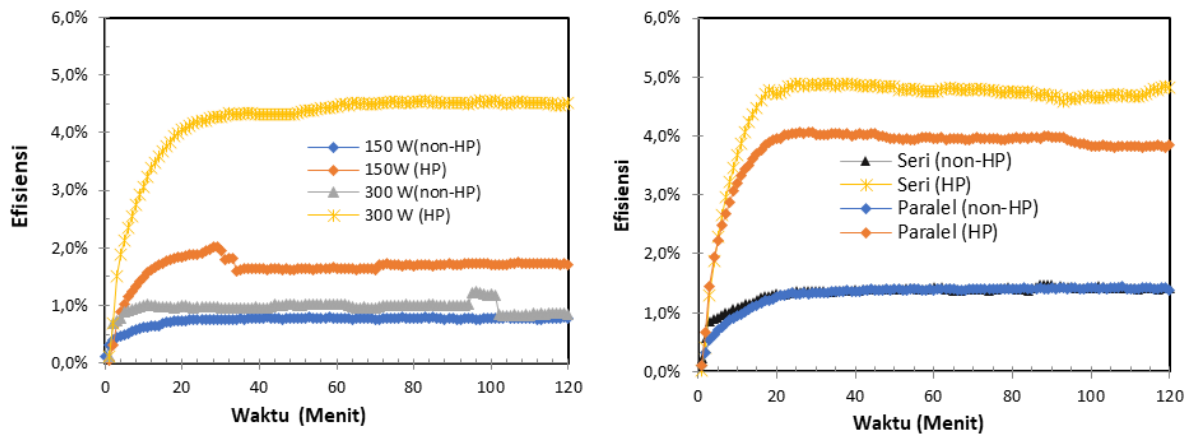


**Gambar 5.** Variasi daya listrik yang dibangkitkan dengan penambahan system pendingin permukaan satu sisi modul termoelektrik tunggal

Peningkatan signifikan atas kemampuan *TEG* dalam konversi panas menjadi daya listrik menunjukkan bahwa *TEG* sangat tergantung pada sistem pendingin salah satu sisinya. Tanpa adanya mekanisme pembuangan panas, kenaikan panas pada sisi dingin *TEM* meminimalisir efek seebeck. Sistem *HP* bertindak sebagai superkonduktor panas yang secara efektif memindahkan panas dari *cold junction* *TEM* ke lingkungan sehingga mengoptimalkan prinsip efisiensi dari mesin Carnot [11].

**Gambar 6** mengilustrasikan efisiensi konversi *TEG* tunggal dalam percobaan selama 120 menit dengan empat scenario berbeda. Data hasil tersebut menunjukkan korelasi langsung antara parameter kuantitas panas, sistem dengan *HP* dan efisiensi konversi. Input panas yang besar (300W) menghasilkan efisiensi yang lebih baik dari pada input panas 150W, demikian pula penggunaan *HP* dalam meningkatkan  $\Delta T$ . Relasi ini dapat dijelaskan bahwa kuantitas panas mempengaruhi temperatur pada sisi panas *TE*, sedangkan sistem *HP* menurunkan aliran panas di *cold-junction* *TE*, dimana dua konsep ini menciptakan  $\Delta T$  yang besar. Semua model konfigurasi sistem *TEG* pada gambar 6 menunjukkan fase transien pertama di periode 20 – 40 menit dimana sistem mencapai keadaan

ekuilibrium termal. Setelah fase ini, kenaikan efisiensi hampir tidak ada lagi yang mengindikasikan keadaan operasi *steady*. Fluktuasi pada menit 30 dan 100 dianggap sebagai efek dari dinamika perubahan fase atau perubahan sistem pendinginan di dalam *HP*.



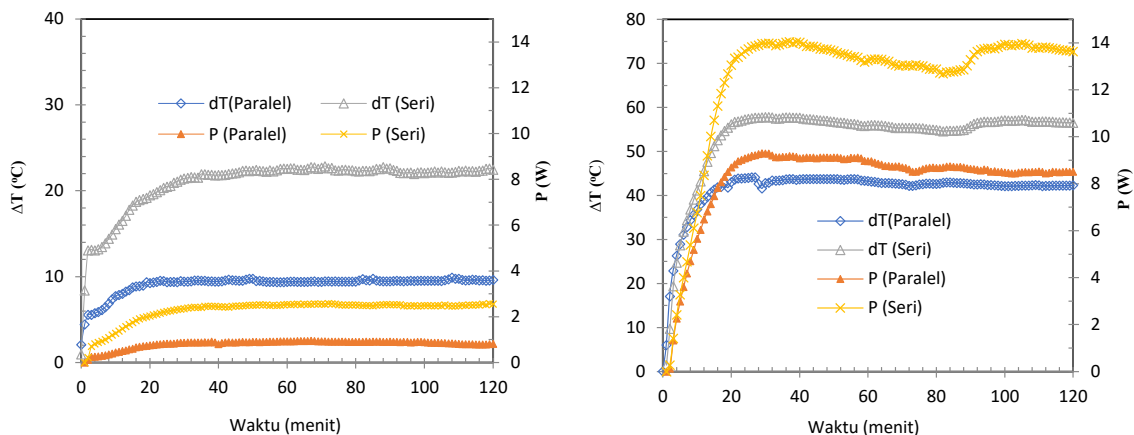
**Gambar 6.** Efisiensi konversi listrik generator termoelektrik (TEG) tunggal

Sistem panas maksimum (300W) memberikan efisiensi konversi maksimum adalah 4,5% sedangkan efisiensi terendah diperoleh 1% (atau penggunaan *heat pipe* menaikkan hampir 5 kali lipat). Sebaliknya, sistem dengan panas 150W dengan *HP* hanya mampu menaikkan efisiensi sekitar dua kali lipat saja.

*B. Efek konfigurasi modul dan peningkatan gradien temperatur*

**Gambar 7** menunjukkan efek konfigurasi modul dan peningkatan aliran panas pada sistem *TEG* ganda. Analisis tersebut difokuskan pada relasi antara  $\Delta T$  dan daya yang dibangkitkan selama periode pengujian 120 menit. Kurva relasi parameter menunjukkan fase transien pada periode sekitar 20 menit, lalu kemudian memasuki fase *steady* dimana relasi parameter terhadap waktu dianggap konstan. Menariknya, sistem pendinginan *HP* pada *TEG* mencegah saturasi termal sehingga menghasilkan dari luaran (*P*) yang lebih tinggi dari pada tanpa sistem *HP*. Hal ini juga menunjukkan bahwa sistem *HP* memperpanjang atau mempertahankan durasi optimum daya listrik keluaran.

Konfigurasi seri memberikan daya listrik luaran optimum dibandingkan dengan konfigurasi paralel, dimana panas 150 W mengasilkan 2,5 W sedangkan pada 300W menghasilkan daya output 14W. Konfigurasi paralel untuk sumber panas 150 dan 300W hanya menghasilkan daya listrik output masing-masing 1 dan 9W. Hal ini karena konfigurasi seri menjumlahkan voltase individual *TEM* yang lebih efektif dalam membangkitkan daya listrik, dibandingkan dengan konfigurasi paralel. Voltase luaran yang rendah membatasi aliran arus listrik yang mengalir dalam tahanan internal, sehingga menimbulkan efek pemanasan Joule ( $I^2R_{int.}$ ) akibat naiknya tahanan internal. Hal ini, memperkecil gradien temperatur ( $\Delta T$ ) yang menurunkan efek seebeck.

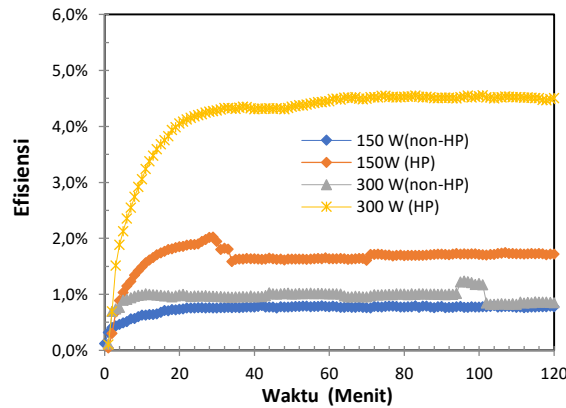


(a) Sumber panas : 150 W

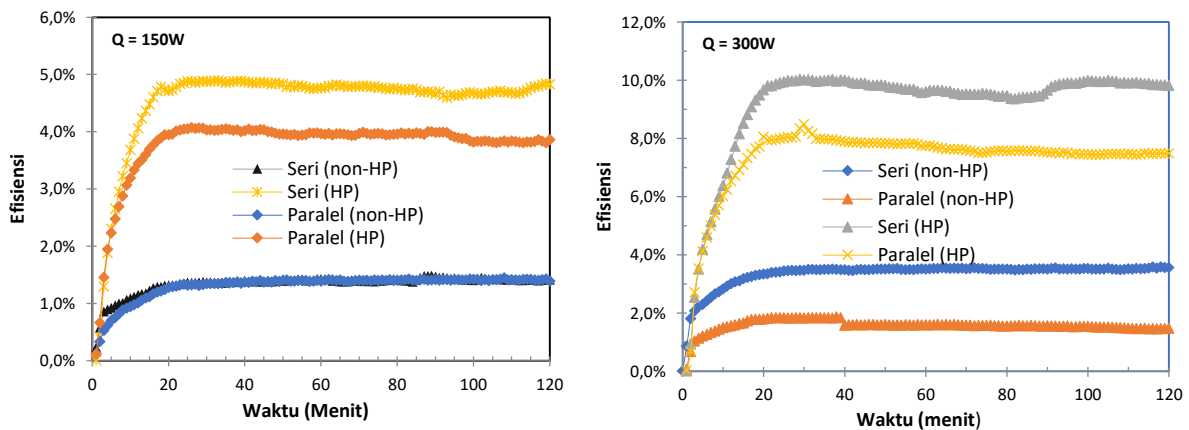
(b) Sumber panas : 300 W

**Gambar 7.** Variasi daya listrik yang dibangkitkan dengan penambahan system pendingin permukaan satu sisi modul termoelektrik dan susunan panel dengan dua modul

**Gambar 8** menunjukkan efisiensi termal sistem *TEG* terhadap waktu dengan variasi beban penanamanasa (150 dan 300W), konfigurasi *TE* (seri vs paralel), dan efek penggunaan heat pipe. Baik gambar 8(a) dan 8(b) efisiensi meningkat selama periode awal transien (0 – 30 menit), dan mencapai kondisi steady setelahnya. Pada kasus *TE* tunggal (**Gambar 8(a)**), kenaikan beban panas 150 W menjadi 300W pada sistem dengan HP menaikkan efisiensi dari 1,8% menjadi 4,5%. Hal ini menunjukkan bahwa tahanan termal menurun atau perpindahan panas naik yang mengakibatkan gradien temperatur sisi *TE* naik.



**Gambar 8(a).** Efisiensi konversi listrik generator termoelektrik (*TEG*) Tunggal



**Gambar 8(b).** Efisiensi konversi listrik generator termoelektrik (*TEG*) ganda

Efek konfigurasi *TE* ganda terhadap kinerja *TEG* dengan variasi input panas dan konfigurasi *TEM* ditunjukkan pada **Gambar 8(b)**. Pada input panas 150W dengan *HP*, perbedaan kinerja *TEG* ganda relatif hampir identik ketika disusun seri dan paralel, meskipun susunan *TE* seri tetapi lebih tinggi dari pada susunan paralel. Hal ini dianggap bahwa beban panas rendah belum cukup memaksimalkan perubahan fase zat pendingin *HP* sehingga koefisien perpindahan panas konveksi belum optimum [1]. Akibatkan,  $\Delta T$  masih relatif rendah. Sebaliknya, variasi yang cukup dominan jelas terlihat ketika input panas adalah 300W dengan efisiensi mencapai sekitar 10%, sedangkan *TE* paralel mencapai 7,5% pada keadaan steady (fenomena perbedaan ini juga identik pada kasus *TE* tunggal). Kondisi panas ini, memberikan mekanisme perubahan fasa zat pendingin *HP* bekerja optimum dalam menaikkan koefisien perpindahan panas konvektif sehingga  $\Delta T$  naik. Kenaikan ini proporsional dengan kinerja *TE*. Fluktuasi kinerja, utamanya pada  $Q = 300W$  *TEG* paralel mengindikasikan kondisi fase tidak stabil dari proses atau mekanisme pendingin pada *HP*, dimana hal ini akan mencapai kondisi stabil setelah mencapai kondisi ekuilibrium termal [1]. Karenanya, superioritas kinerja *TEG* dengan *HP* sangat dipengaruhi oleh mekanisme konduksi panas yang efektif sebagaimana dijelaskan sebelumnya.

Pada kasus konfigurasi seri/paralel *TEG*, *TEG* seri menunjukkan superioritas kinerja dibandingkan dengan *TEG* paralel. Pada kasus *TEG* seri, tegangan output dijumlahkan sehingga memperbesar peluang kesesuaian resistensi beban dan resistensi internal dari arus yang mengalir. Hal ini mengurangi munculnya panas internal yang dapat mempengaruhi *cold-junction TE*. Selain itu, konfigurasi ini memungkinkan aliran panas berurutan dan mengoptimalkan panas terkonsentrasi pada hot-junction *TE* sebagai kontak primer dengan sumber panas. Adapun konfigurasi paralel, aliran panas didistribusikan yang mengakibatkan penurunan konsentrasi intensitas panas tiap modul sehingga temperatur hot-junction rendah pada setiap modul sehingga efisiensi tidak optimal.

## Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja *Thermoelectric Generator (TEG)* sangat dipengaruhi oleh besar gradien temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul. Peningkatan suplai panas dari 150 W menjadi 300 W mampu meningkatkan tegangan keluaran, daya listrik, dan efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan. Penggunaan heat pipe terbukti efektif dalam meningkatkan disipasi panas pada sisi dingin modul sehingga gradien temperatur ( $\Delta T$ ) meningkat dan proses konversi energi berlangsung lebih optimal. Konfigurasi modul termoelektrik juga memberikan pengaruh signifikan terhadap prestasi sistem. Susunan seri menghasilkan daya output dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi paralel karena akumulasi tegangan antar modul lebih efektif dalam meningkatkan performa pembangkitan listrik. Efisiensi tertinggi diperoleh pada konfigurasi seri dengan suplai panas 300 W yang mencapai sekitar 10%. Secara umum, kombinasi antara gradien temperatur tinggi, penggunaan sistem pendingin heat pipe, dan konfigurasi modul seri merupakan faktor utama dalam meningkatkan kinerja termoelektrik sebagai sistem pemanen energi listrik mikro.

## Daftar Pustaka

- [1] Y. Zhao et al., "A review of heat pipe thermoelectric generators: principles, applications, and challenges," *Sol. energi*, vol. 300, no. March, p. 113850, 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113850.
- [2] X. Cui, Y. Wu, and X. Chen, "Thermoelectric generation: principles, applications, and prospects," *Renew. Sustain. energi Rev.*, vol. 224, no. July, p. 116081, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.116081.
- [3] M. Ridwan, M. Gasulla, and F. Reverter, "Principle and Applications of Thermoelectric Generators: A Review," *Sensors*, vol. 25, no. 8, 2025, doi: 10.3390/s25082484.
- [4] Y. Kimura, K. Utsumi, and H. Tohmyoh, "Experimental relationship between the Seebeck and Peltier effects in thermoelectric modules based on Fe and Al metals," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 255, no. July, p. 124009, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124009.
- [5] R. Liu, Y. Ge, D. Wang, and Z. Shuai, "Understanding the Temperatur Dependence of the Seebeck Coefficient from First-Principles Band Structure Calculations for Organic Thermoelectric Materials," *CCS Chem.*, vol. 3, no. 10, pp. 1477–1483, 2021, doi: 10.31635/ccschem.021.202100813.
- [6] D. Beretta et al., "Thermoelectrics: From history, a window to the future," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 138, no. October, 2019, doi: 10.1016/j.mser.2018.09.001.
- [7] R. Sok and J. Kusaka, "Experimental and modeling analysis on thermoelectric heat recovery to maximize the performance of next-generation diesel engines dedicated for future electrified powertrains," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 219, no. PB, p. 119530, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119530.
- [8] Y. Liu, Z. Shi, G. Wang, Y. Y. Yan, and Y. Zhang, "Experimental Investigation for a Novel Prototype of a Thermoelectric Power Generator With Heat Pipes," *Front. energi Res.*, vol. 9, no. September, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.744366.
- [9] J. Lv et al., "Touch-activated information interaction system based on body-heat-powered flexible thermoelectric generator for food spoilage monitoring," *Nano energi*, vol. 123, no. February, p. 109418, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109418.
- [10] A. Shukla, N. Tripathi, and D. T. Marx, "Oxide thermoelectrics: a review and a case study," *Dyn. Process. Solids*, no. 0, pp. 137–152, 2023, doi: 10.1016/B978-0-12-818876-7.00006-4.
- [11] Y. A. Cengel, M. A. Boles, and M. Kanoglu, *Thermodynamics: an engineering approach*, Ninth. McGraw-Hill Education, 2019.
- [12] L. Chen, F. Sun, and C. Wu, "Thermoelectric-generator with linear phenomenological heat-transfer law," *Appl. energi*, vol. 81, no. 4, pp. 358–364, 2005, doi: 10.1016/j.apenergi.2004.09.011.
- [13] F. A. Purnama Putra and B. Suprianto, "Solar Thermoelectric Generator Prototype with Flat Black Color Coating on Copper Plate Heat Absorber," *Ina. Indones. J. Electr. Eletronics Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 25–31, 2024, doi: 10.26740/inajeee.v8n1.p25-31.
- [14] A. Halim, Z. Djafar, and W. H. Piarah, "Enhancing Solar Power Harvest By Using Absorber Plates on Thermoelectric Generator Modules," *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 53–59, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-3629-6\_6.

## Ucapan penghargaan

"Tidak tersedia"

## Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini. Semua penulis menyetujui penerbitan artikel ini.

## Lampiran

"Tidak tersedia"