

Analisis Performa Termoelektrik Generator Menggunakan Sistem Pendingin Heatsink Dengan Prinsip Thermosiphon

Yohanes Regiarto Anggut¹, Ben V. Tarigan^{2*}, Muhammad Jafri³, Boy Bistolen⁴, Jemssy R. Rohi⁵
^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang, NTT, 85001, Tlp. (0380)881597

*Corresponding author: ben_tarigan@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Dalam era modern ini, kebutuhan listrik terus meningkat, terutama di Indonesia, di mana banyak daerah terpencil masih mengandalkan sumber energi yang tidak ramah lingkungan. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan generator termoelektrik (TEG) untuk mengubah energi panas buangan dari tungku menjadi listrik. Dengan menggunakan sistem pendingin *heatsink* yang menerapkan prinsip *termosipon*, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konversi energi tanpa memerlukan pompa tambahan, sehingga dapat mengurangi konsumsi energi dan biaya pemeliharaan. Analisis dilakukan pada tiga ketinggian berbeda: 50 cm, 60 cm, dan 70 cm. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Hasil menunjukkan bahwa ketinggian 50 cm memberikan performa optimal dengan daya puncak 550,123 mW dan efisiensi tertinggi 4,41%, dari hasil konduksi panas yang lebih cepat. Sebaliknya, pada ketinggian 60 cm dan 70 cm, daya dan efisiensi cenderung menurun meskipun volume air yang keluar lebih besar. Sirkulasi panas pada ketinggian ini berjalan lebih lambat, sehingga perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin tercapai lebih lambat dibandingkan dengan ketinggian 50 cm. Pada ketinggian 60 cm, daya puncak mencapai 332,592 mW, sedangkan pada 70 cm daya puncaknya sebesar 437,082 mW. Walaupun volume air yang keluar meningkat, suhu air yang lebih tinggi menunjukkan bahwa proses pendinginan berjalan lebih lambat, yang mengurangi efisiensi sistem.

ABSTRACT

In the modern era, the demand for electricity is rising, particularly in Indonesia, where many remote areas still depend on environmentally unfriendly energy sources. This research investigates the use of a thermoelectric generator (TEG) to convert waste heat energy from furnaces into electricity. By employing a heatsink cooling system based on the thermosyphon principle, the study aims to enhance energy conversion efficiency without additional pumps, thereby reducing energy consumption and maintenance costs. The analysis was conducted at three different heights: 50 cm, 60 cm, and 70 cm, using an experimental method with a quantitative approach. Results indicate that a height of 50 cm yields optimal performance, achieving a peak power of 550.123 mW and the highest efficiency of 4.41%, attributed to faster heat conduction. In contrast, at heights of 60 cm and 70 cm, both power and efficiency decline despite an increase in the volume of water discharged, as heat circulation is slower. At 60 cm, the peak power reached 332.592 mW, while at 70 cm, it was 437.082 mW. Higher water temperatures at these heights suggest a slower cooling process, which reduces system efficiency.

Keywords: Thermoelectric Generator; Thermosyphon; Efficiency; Power

1. PENDAHULUAN

Dalam kehidupan modern saat ini, listrik memainkan peran yang sangat penting dan menjadi kebutuhan vital untuk aktivitas sehari-hari. Di Indonesia, permintaan listrik terus meningkat dari tahun ke tahun, didorong oleh pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan pembangunan ekonomi [1]. Berdasarkan data dari Tracking SDG 7 : The Energy Progress Report 2020, 789 juta orang masih belum memiliki akses energi listrik yang memadai, terutama di wilayah terpencil di Indonesia.

Akibatnya, penduduk desa sering kali terpaksa bergantung pada lampu minyak atau sumber energi konvensional lainnya yang tidak ramah lingkungan dalam mengatasi kekurangan listrik. Akibatnya, penduduk desa sering kali terpaksa bergantung pada lampu minyak atau sumber energi konvensional lainnya yang tidak ramah lingkungan dalam mengatasi kekurangan listrik. Salah satu alternatif menarik adalah mengonversi energi panas buangan dari tungku api selama proses memasak dengan menggunakan semikonduktor atau *generator*. Namun, proses mengonversi panas ini sangat bergantung pada pendingin termoelektrik.

Oleh karena itu, pada penelitian ini energi panas buangan dari tungku ini akan dimanfaatkan dengan cara mengonversi panas tersebut menjadi energi listrik dengan menggunakan termoelektrik generator, di mana sisi panas termoelektrik generator ini dipasangkan pada tungku rocket stove sebagai sumber panas dan pada sisi dingin dipasang alat pendingin, yaitu heatsink, di mana celah-celah pada heatsink ini akan dipasang pipa tembaga yang dialiri fluida pendingin, yaitu air.

Thermoelectric generator (TEG) adalah sebuah alat yang dapat mengonversi panas menjadi energi listrik. Perbedaan suhu antara dua bagian komponen bismuth dan telluride menyebabkan elektron bermigrasi dari kutub negatif ke kutub positif. Semakin besar perbedaan suhu, semakin cepat perpindahan elektron tersebut, yang berarti arus yang dihasilkan juga menjadi semakin besar. Prinsip operasi dari generator termoelektrik didasarkan pada efek Seebeck, yang menyatakan bahwa "Jika dua material semikonduktor yang berbeda dihubungkan pada satu ujung dan diberi perbedaan suhu, maka akan timbul perbedaan potensial listrik antara ujung yang satu dengan ujung yang lain" [2]. Oleh karena itu, untuk mencegah overheating suhu panas dan dingin, perlu dijaga dengan menambahkan alat pendingin, baik secara konveksi bebas maupun konveksi paksa. Secara umum, modul ini biasanya didinginkan menggunakan pendingin udara tipe kipas, namun efisiensi pendinginan ini terbatas dalam menyalurkan panas yang cukup besar dari modul karena memerlukan energi lain untuk mengoperasikan kipas tersebut [3].

Heatsink adalah alat pengendali panas pasif yang efektif dengan menyerap panas dari komponen elektronik dan mentransferkannya ke fluida di sekitarnya, seperti udara atau cairan [4]. Dalam meningkatkan efisien pendinginan, penggunaan fluida air terbukti lebih efektif daripada udara. Pada sistem thermosiphon, fluida dingin mengalir secara bebas melalui pipa tembaga pada celah sirip heatsink tanpa memerlukan bantuan pompa. Proses ini terjadi karena perubahan massa jenis zat cair yang memuai dan menjadi lebih ringan daripada air dingin, yang mendorong aliran air panas ke atas secara alami. Performa termosifon dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk perbedaan suhu, desain sistem, jenis fluida pendingin yang digunakan, tekanan, ukuran pipa, dan ketinggian jatuh [5].

Tinggi jatuh aliran fluida merupakan faktor penting dalam menentukan kinerja termosifon. Tinggi jatuh aliran fluida mengacu pada perbedaan ketinggian antara *inlet* dan *outlet* dari *heatsink*. Semakin besar perbedaan ketinggian, semakin besar tekanan yang dihasilkan, yang pada gilirannya mempengaruhi laju aliran fluida. Dalam sistem termosifon, peningkatan tinggi jatuh aliran fluida dapat dicapai dengan merancang sistem yang memiliki perbedaan ketinggian yang signifikan antara titik masuk dan keluarnya fluida, atau dengan memanfaatkan kemiringan yang efektif pada pipa-pipa termosifon. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa fluida dapat mengalir secara alami dari titik masuk ke titik keluar tanpa memerlukan pompa tambahan [6].

Dalam penelitian sebelumnya, peneliti menggunakan heatsink dan juga menggunakan fluida pendingin air biasa dan coolant. Dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan fluida pendingin terhadap daya keluaran. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan heatsink yang dipadukan dengan fluida pendingin air biasa dapat meningkatkan efisiensi sistem pendinginan generator termoelektrik dengan nilai daya yang dihasilkan sebesar 6,4 watt [7].

Sebagai langkah tambahan, peneliti melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh tinggi jatuh fluida pendingin terhadap performa generator termoelektrik. Penelitian ini menggunakan *heatsink* yang dialiri fluida pendingin air dengan prinsip *thermosiphon*. Dengan menggunakan prinsip konveksi alami, heatsink yang dialiri fluida pendingin air dengan prinsip termosifon dapat berfungsi

tanpa menggunakan kipas eksternal, mengurangi konsumsi energi dan biaya perawatan. Dengan demikian penulis akan melakukan penelitian dengan judul “Analisis Performa *Thermoelectric Generator* (TEG) Menggunakan Sistem Pendingin *Heatsink* Dengan Prinsip *Thermosiphon*”

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, dengan *heatsink* digunakan sebagai pendingin pada termoelektrik generator dengan sirkulasi air menggunakan prinsip *thermosiphon*.

Variabel merupakan segala hal yang akan dijadikan objek pengamatan didalam sebuah penelitian. Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Variabel Bebas (Independent Variable).

Variabel bebas yang dipakai adalah pengaruh energi potensial air, yang sering dikaitkan dengan tinggi jatuh air, terhadap prinsip *thermosiphon* pada *heatsink*.

Variabel Terikat (Dependent Variable).

Variabel terikat dalam hal ini adalah daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik.

2.1 Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa tahapan yang dilakukan antara lain:

Mempersiapkan dan memasang alat ukur berupa termokopel untuk mengukur temperatur, multimeter untuk mengukur arus dan tegangan, serta gelas ukur untuk mengukur volume air keluar

Tempatkan alat penelitian pada tempat yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, posisi bak penampung fluida pendingin (air) ditempatkan pada 3 posisi tinggi jatuh yang berbeda-beda.

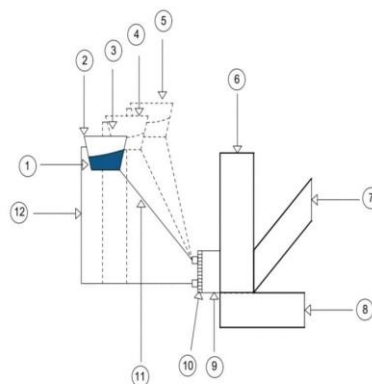
Masukan kayu bakar sebanyak 2 kg.

Masukkan fluida pendingin air ke bak penampung secara bergantian sesuai dengan tinggi jatuh aliran yang berbeda-beda dan lakukan pengambilan data.

Pengambilan data dilakukan pada saat lidah api sudah mencapai ujung tungku. Data yang diambil berupa temperatur tungku, temperatur termoelektrik sisi panas, temperatur termoelektrik sisi dingin, temperatur water block, temperatur air keluar, temperatur air masuk, temperatur lingkungan, tegangan, arus dan volume air keluar.

Pengambilan data temperatur menggunakan sensor Arduino yang disambungkan ke laptop, kemudian data arus dan tegangan menggunakan multimeter digital yang sudah disambungkan ke generator termoelektrik.

Pengambilan data dilakukan selama satu minggu, Data diambil setiap 2 menit selama 1 jam.



Gambar 1. Skema alat penelitian

Keterangan:

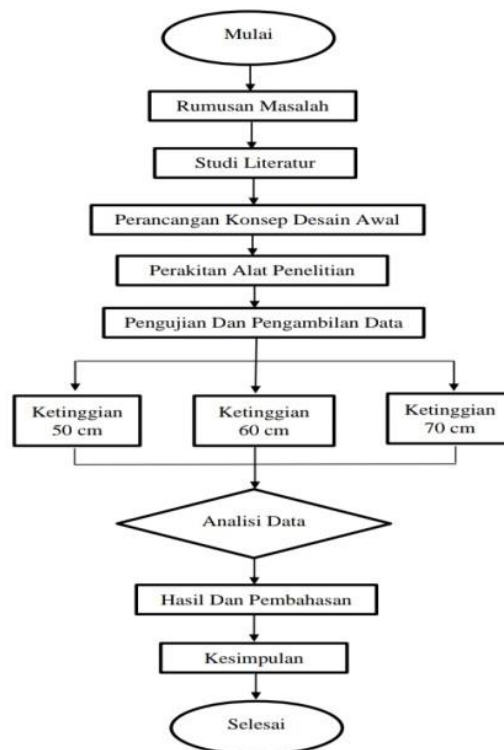
1. Fluida pendingin (air)

2. Wadah penampung air
3. Posisi ketinggian 50
4. Posisi ketinggian 60
5. Posisi ketinggian 70
6. Tungku (sumber panas)
7. Saluran bahan bakar (kayu)
8. Saluran udara
9. *Thermoelectric generator* (TEG)
10. *Heatsink*
11. Besi kotak (tempat wadah air)
12. Pipa Tembaga (saluran air masuk)

2.2 Analisis Data

Setelah seluruh data hasil penelitian terkumpul, dilakukan analisis data untuk mengetahui performa dari Thermoelectric Generator (TEG). Data yang dihitung meliputi temperatur, tegangan, arus, dan volume air yang keluar dari sistem. Berdasarkan data ini, dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai daya yang dihasilkan oleh TEG dan efisiensinya. Perhitungan daya dan efisiensi ini bertujuan untuk mengetahui performa TEG dalam mengonversi panas menjadi listrik. Dalam menganalisis data, terdapat persamaan yang digunakan yang sudah dijelaskan pada Bab 2 di atas.

Adapun alur penelitian untuk mengetahui performa dari termoelektrik ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini



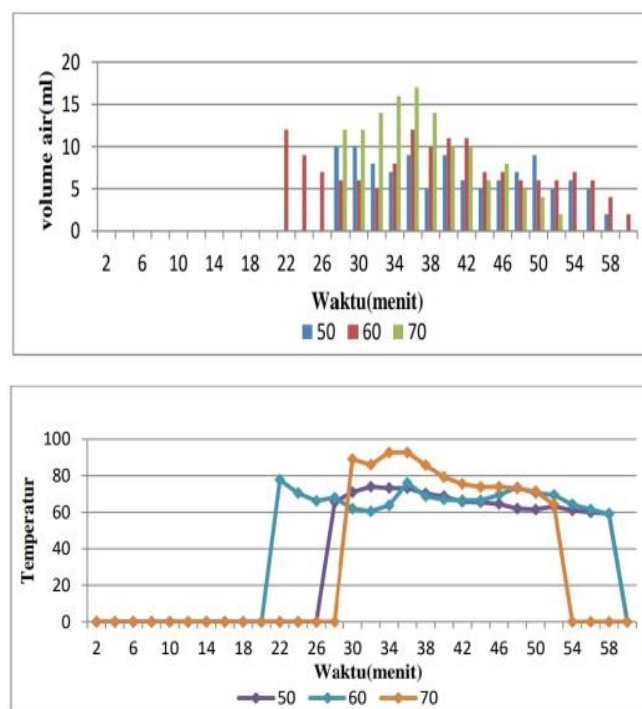
Gambar 2. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari pengujian yang telah dilaksanakan, diperoleh data dari hasil penelitian dengan memanfaatkan efek Seebeck dari generator termoelektrik dengan menggunakan pendingin heatsink yang dialiri air dengan sistem thermosyphon, dengan variasi ketinggian jatuh air 50 cm, 60 cm, dan 70 cm terhadap sebuah generator termoelektrik.

3.1 Pengaruh Ketinggian Terhadap Proses Pendinginan Pada Termoelektrik Generator

Pada penelitian ini, yakni untuk mengetahui proses pendinginan pada generator termoelektrik, dapat dilihat pada volume air yang keluar (mL). Pengukuran dilakukan tiap 2 menit selama 1 jam dengan variasi ketinggian, yaitu 50 cm, 60 cm, dan 70 cm. Hasil grafik pengujian ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 3. Grafik temperatur dan volume air keluar terhadap waktu dengan ketinggian 50 cm, 60 cm, dan 70 cm

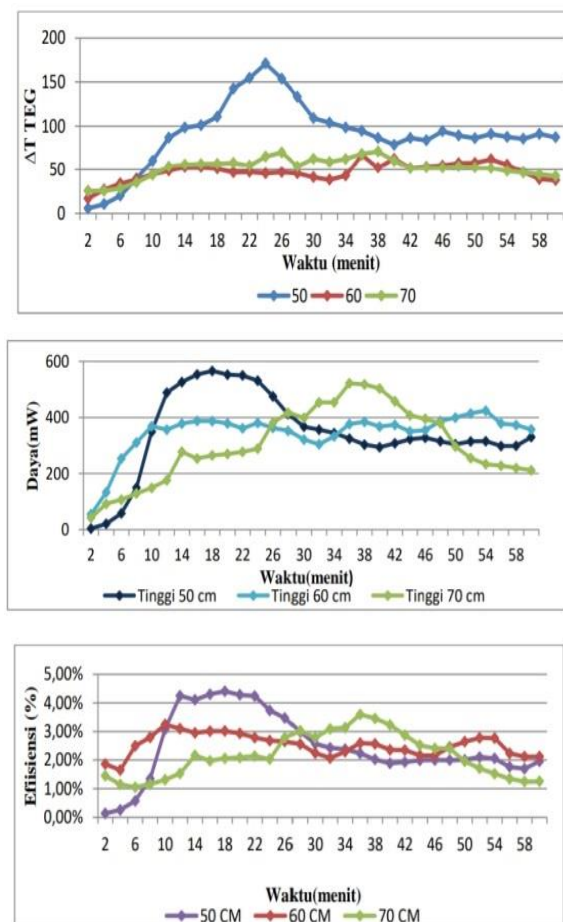
Dari kedua grafik di atas dapat dilihat bahwa perbedaan ketinggian memengaruhi proses pendinginan generator termoelektrik. Pada 20 menit pertama pengujian, tidak ada air yang keluar dari ketiga ketinggian karena air masih menyerap panas, di mana temperatur air masuk relatif konstan pada 28°C–30°C sampai akhir pengujian. Ketinggian 60 cm menjadi yang pertama mengeluarkan air pada menit ke-22, sebanyak 12 ml dengan suhu 77,75°C, menandakan awal proses pendinginan termosifon. Pada menit ke-28, ketinggian 50 cm mulai mengeluarkan air dengan volume 10 ml dan suhu 65,5°C, sementara ketinggian 70 cm juga mengeluarkan air dengan volume 12 ml, namun dengan suhu lebih tinggi, yaitu 85°C.

Keluarnya air ini menunjukkan bahwa air telah menyerap panas untuk menjaga kinerja termoelektrik dalam menghasilkan listrik [8]. Volume air terus meningkat, dan pada ketinggian 60 cm, volume air mencapai puncaknya pada menit ke-22, namun kemudian mengalami fluktuasi antara 8 ml dan 11 ml dengan suhu stabil antara 60°C dan 70°C hingga menit ke-56. Di sisi lain, ketinggian 50 cm menunjukkan peningkatan yang lebih stabil, dengan volume air berkisar antara 6 ml dan 10 ml

dan suhu antara 70°C dan 76°C, menjadikannya paling efisien dalam menjaga kestabilan sistem. Meskipun ketinggian 70 cm mencapai volume air tertinggi (17 ml pada suhu 92,75°C pada menit ke-36), proses pendinginan di ketinggian ini lebih lambat. Suhu pada semua ketinggian mulai menurun dari menit ke-52 hingga mencapai nol pada menit ke-60, menandakan penurunan penyerapan panas.

Berdasarkan hasil ini, ketinggian 50 cm terbukti paling efisien karena mampu menjaga keseimbangan antara waktu respons dan stabilitas volume serta suhu, sehingga memberikan kinerja pendinginan yang lebih baik. Untuk itu, untuk mengetahui performa dari termoelektrik menggunakan sistem pendingin heatsink dengan prinsip termosifon dapat dilihat pada grafik rata-rata daya yang dihasilkan oleh termoelektrik generator yang mencapai 369,1 mW.

3.2 Pengaruh Ketinggian Dan Proses Konduksi Terhadap Efisiensi Dan Daya Yang Dihasilkan Termoelektrik Generator



Gambar 4. Grafik perbedaan suhu (ΔT) antara TEGh dan TEGc , daya serta efisiensi dengan ketinggian 50 cm, 60 cm, dan 70 cm

Pada saat pengujian, terlihat bahwa daya dan efisiensi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh perbedaan ketinggian dan proses konduksi panas. Pada ketinggian 50 cm, perbedaan suhu antara sisi

panas dan sisi dingin generator termoelektrik (ΔT_{TEG}) dimulai dari $5,75^{\circ}\text{C}$ dengan daya awal 52,724 mW dan mencapai puncaknya pada menit ke-22 dengan nilai ΔT_{TEG} 171°C dan daya sebesar 550,123 mW. Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 4,41% pada menit ke-18, sebelum daya menurun secara bertahap hingga rata-rata daya yang dihasilkan sebesar 369,1 mW pada menit ke-60. Proses termosifon di ketinggian 50 cm berlangsung lebih cepat karena tekanan air yang lebih rendah, sehingga penyerapan panas lebih banyak.

Pada ketinggian 60 cm, ΔT_{TEG} menunjukkan peningkatan yang lebih stabil dengan daya awal 54,392 mW pada ΔT_{TEG} 17°C , mencapai puncaknya pada menit ke-34 dengan ΔT_{TEG} $67,25^{\circ}\text{C}$ dan daya sebesar 332,592 mW. Efisiensi tertinggi yang tercatat adalah 3,24% pada menit ke-14. Meskipun volume air yang keluar rata-rata 6-10 ml, daya dan efisiensi tetap lebih rendah dibandingkan dengan 50 cm karena proses konduksi panas lebih lambat. Hal ini disebabkan oleh nilai panas dari hasil pembakaran kayu yang tidak stabil, yang disebabkan oleh udara lingkungan yang tidak terkontrol. Sedangkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tarigan dkk. (2018) menunjukkan bahwa penggunaan hetaer menghasilkan panas yang lebih stabil dengan rata-rata panas yang dihasilkan $144,6^{\circ}\text{C}$ dibandingkan dengan panas dari hasil pembakaran kayu.

Sementara itu, pada ketinggian 70 cm, ΔT_{TEG} dimulai dari $25,5^{\circ}\text{C}$ dengan daya awal 23,142 mW, dan perlahan meningkat hingga mencapai puncaknya pada menit ke-38 dengan ΔT_{TEG} 71°C dan daya sebesar 437,082 mW. Efisiensi tertinggi dicapai pada menit ke-26 dengan nilai 3,60%, tetapi secara keseluruhan, efisiensi lebih rendah karena distribusi panas yang lebih lambat dan membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai sirkulasi termosifon, di mana air dingin bergerak menggantikan air panas dengan memanfaatkan perbedaan densitas akibat perubahan suhu pada air.

Secara keseluruhan, ketinggian 50 cm menunjukkan efisiensi dan daya yang paling tinggi, disebabkan oleh proses penyerapan panas yang lebih cepat pada tekanan air yang lebih rendah, seperti dijelaskan oleh prinsip termosifon yang bekerja dengan memanfaatkan perbedaan densitas akibat perubahan suhu pada air. Air yang lebih panas cenderung naik, sementara air yang lebih dingin bergerak menggantikan posisi yang lebih panas, menciptakan sirkulasi alami tanpa memerlukan pompa tambahan. Penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa efisiensi TEG sangat bergantung pada perbedaan suhu, sifat material, dan resistansi termal sistem[9].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan terhadap tiga posisi ketinggian jatuh aliran fluida, dapat diambil kesimpulan:

Tinggi jatuh fluida 50 cm menghasilkan daya paling optimal dengan daya puncak 550,123 mW. Meskipun pada ketinggian 60 cm dan 70 cm volume air yang keluar lebih besar, daya menurun (daya puncak masing-masing 332,592 mW dan 437,082 mW), Hal ini disebabkan oleh konduksi panas yang lebih cepat pada ketinggian ini, yang memungkinkan sirkulasi air dengan prinsip termosifon terjadi lebih cepat. Efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik tertinggi dicapai pada ketinggian 50 cm mencapai 4,41%. Meskipun pada ketinggian 60 cm dan 70 cm volume air yang keluar lebih banyak, tetapi nilai efisiensinya menurun (puncak efisiensi masing-masing 3,24% dan 3,60%), hal ini terjadi karena perbedaan suhu pada proses konduksi lebih lambat, sehingga proses pendinginan kurang efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. R. Ramli R and S. Setiawan D. R, "Sistem Kelistrikan Belum Tersebar Merata, Menteri ESDM Dorong Teknologi Ini," Kompas.com.
- [2]. S. A. Sasmita, M. T. Ramadhan, M. I. Kamal, and Y. Dewanto, "Alternatif Pembangkit Energi Listrik Menggunakan Prinsip Termoelektrik Generator," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 21, no. 1, p. 57, 2019, doi: 10.24912/tesla.v21i1.3249.
- [3]. S. Nasional, S. Dan, T. Fst, A. Performa, T. Generator, and T. E. G. Dengan, "FLUIDA PENDINGIN PADA RESERVOIR," pp. 231–236, 2019.

- [4]. H. Riyadi, "Pengertian Heatsink dan Fungsi Heatsink Beserta Cara Kerjanya pada Komputer / Laptop," Nesabamedia.
- [5]. A. R. Fachrudin, "Unjuk Kerja Thermosyphon Dengan Variasi Fluida Kerja," *J. INTEKNA*, vol. 18, no. 2, pp. 67–131, 2018, [Online]. Available: <http://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/intekna/issue/archive>
- [6]. I. H. Faisal and Ch.Rangkuti, "Pengaruh Besar Laju Aliran Air Terhadap Suhu Yang Dihasilkan Pada Pemanas Air Tenaga Surya Dengan Pipa," *Semin. Nas. Cendekiawan*, vol. 1, pp. 125–132, 2017.
- [7]. B. V. Tarigan, A. Sanusi, and M. Liu, "Analisis Jenis Fluida dengan Sistem Pendingin Thermosyphon Terhadap dengan Daya Output Generator Termoelektrik," pp. 60–63, 2018.
- [8]. M. Araiz, Á. Casi, L. Catalán, and P. Aranguren, "Generator Termoelektrik dengan Thermosyphon Biphasic Pasif Penukar Panas untuk Pemulihan Panas Limbah : Desain dan Eksperimen," 2021.
- [9]. E. Dimaggio, F. Rossella, and G. Pennelli, "Management of the output electrical power in thermoelectric generators," *Electron.*, vol. 8, no. 12, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3390/electronics8121514.
- [10]. J.P.Holman, *Perpindahan Panas*, 6th ed. ERLANGGA, 1988.
- [11]. G. Yoganingwang, A. Qurthobi, and T. A. Ajiwiguna, "Evaluasi Performansi Modul Termoelektrik Sebagai Generator Listrik," vol. 6, 2019.
- [12]. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 1996.