

EFEK LAJU PEMANASAN (*HEATING RATE*) TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN KINERJA MODUL *THERMOELECTRIC GENERATOR SP1848 SA*

Nugroho Tri Atmoko ¹⁾, Haikal ¹⁾, Bagus Radiant Utomo ¹⁾, Fatimah Nur Hidayah ²⁾ ✉, Emanuel Budi Raharjo ¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin
Sekolah Tinggi Teknologi Warga
Surakarta
nugroho.ta@sttw.ac.id
haikal@sttw.ac.id
fatimahnur.h@sttw.ac.id
emaunelbr@sttw.ac.id

²⁾ Jurusan Teknik Mesin
Universitas Muhammadiyah
Surabaya
bagusradiant@ft.um-surabaya.ac.id

Abstract

Thermoelectric Generator (TEG) is an energy conversion technology that converts heat energy into electrical. There are several factors that affect the performance of TEG, one of which is the heat source. This research will investigate the use of waste heat by varying the heating rate on the performance of TEG in generating electricity and the temperature distribution profile through experimental studies on a laboratory scale. The heating plate is used to heat the hot surface of the TEG. There are three variations of the heating rate used, namely: Low (0.355 °C/min), Middle (0.933 °C/min) and High (1.558 °C/min). Temperature measurements were carried out on the hot surface (T_h), the cold surface (T_c) of the TEG module, and the ambient temperature (T_a) using Arduino temperature data logger. Meanwhile, to measure the electrical output in the form of voltage (V) generated by the TEG module, using the Arduino voltage data logger. The results show when the heating rate used is high (high heating rate) then the average electrical output of the TEG module produces a voltage of 5.34V. The heating rate on the hot surface of the TEG module will affect the difference in surface temperature and the performance of the TEG module in generating electricity.

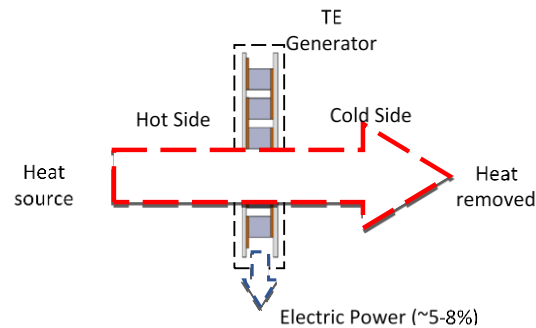
Keywords: Plat Heater, Thermoelectric Generator, Heating Rate, Temperature Distribution Profile, Output Voltage.

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia, hampir semua proses produksi yang membutuhkan proses pembakaran dalam (*internal combustion*) akan menghasilkan energi panas yang terbuang (*waste heat*) ^[1,2], sehingga perlu adanya pemanfaatan panas buang tersebut menjadi energi yang lebih bermanfaat ^[3]. Salah satu alternatif pemanfaatan panas terbuang yakni dengan menggunakan modul *thermoelectric generator* (TEG), dimana teknologi tersebut mampu merubah energi panas menjadi energi listrik secara langsung berdasarkan efek “*Seebeck*” ^[4]. Teknologi konversi tersebut memiliki kelebihan yakni tidak ada komponen yang bergerak (*no moving part*), bebas perawatan dan durabilitas yang baik ^[5,6]. Pengembangan kembali termoelektrik sebenarnya sudah dimulai sejak dua dekade terakhir, contohnya saja Daniel ^[7] serta Bedecarats dkk ^[8] yang mengeksplorasi lebih mendalam tentang termoelektrik. Prinsip dasar termoelektrik generator dapat dilihat pada Gambar 1 Namun, kinerja berupa luaran listrik serta efisiensi yang dihasilkan oleh TEG masih rendah (-5-8%) ^[9,10]. Walaupun dinilai

Corresponding Author:
✉ **Fatimah Nur Hidayah**
Received on: 2022-08-08
Revised on: 2022-10-20
Accepted on: 2022-10-26

kecil akan tetapi perlu diketahui bahwa sumber energi panas yang didapat merupakan panas buang yang sudah tidak bermanfaat.



Gambar 1. Prinsip dasar thermoelectric generator

Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan studi eksperimen pemanfaatan panas terbuang dari pembakaran kompor gas LPG dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan modul *thermoelectric generator* (TEG). Sedangkan untuk mendinginkan permukaan dingin TEG terdapat 3 sistem pendingin yaitu: *heatsink*, *heatsink-fan* dan *waterblock*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem pendingin *waterblock* lebih direkomendasikan karena luaran listrik dari TEG serta energi panas yang diserap oleh sistem pendingin lebih besar. Akan tetapi jika sistem pendingin menggunakan *waterblock*, air yang digunakan bersirkulasi serta digunakan pada jangka waktu yang lama tidak lagi efektif^[11].

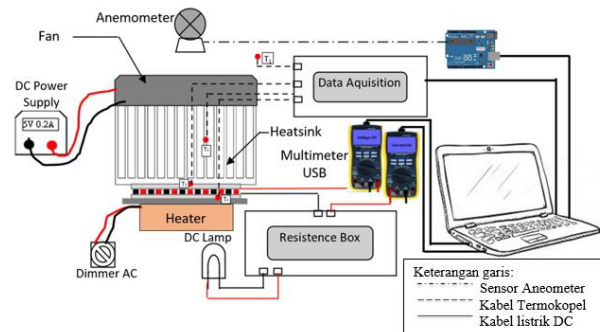
Dalam sistem pembangkit listrik menggunakan modul TEG terdapat tiga komponen utama yang menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan sistem pembangkit ini, yaitu: penukar panas (*Heatexchanger*), modul termoelektrik generator dan sistem pendingin. Untuk memaksimalkan kinerja keseluruhan, maka tiga komponen tersebut harus di perhatikan dan dioptimalkan^[12]. Selanjutnya selain sistem pendingin yang memegang peran penting dalam teknologi konversi energi ini, *hot-side heatexchanger*/penukar panas juga menyumbang andil yang cukup besar terhadap kinerja TEG dalam menghasilkan luaran listrik, seperti penelitian yang dilakukan oleh X.liu dkk^[13], pada penelitian tersebut panas limbah didapat dari hasil pembakaran *internal combustion engine* (ICE) dalam bentuk gas luaran pada knalpot motor serta penelitian ini juga berfokus terhadap kinerja thermal dari penukar panas yang berbeda, kinerja thermal yang dimaksud adalah karakteristik penukar panas dengan struktur dalam (*internal exhaust*) dan ketebalan yang berbeda. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa untuk mendapatkan daya keluar dan performa maksimal dari *system* TEG ada beberapa faktor yang mempengaruhi diantaranya: lebar *channel*, ketebalan *channel* dan bentuk sirip penukar panas.

Sudah banyak penelitian yang berfokus pada sistem pendingin dan modifikasi *hot-side heatexchanger* yang diaplikasikan pada modul TEG untuk meningkatkan kinerjanya. Namun masih jarang dilakukan penelitian khususnya pada pengaruh dari laju pemanasan (*heating rate*) terhadap profil temperatur permukaan modul serta luaran yang dihasilkan oleh TEG melalui studi eksperimen. Sehingga pada penelitian kali ini akan diinvestigasi mengenai dari efek laju pemanasan pada modul TEG terhadap distribusi temperatur permukaan dan kinerja yang dihasilkan modul TEG.

2. METODE DAN BAHAN

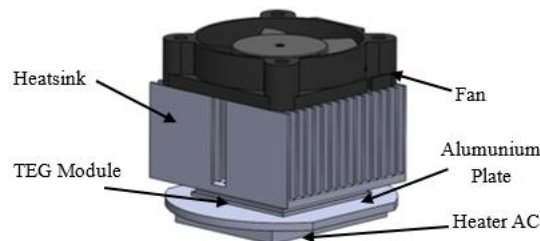
Skema penelitian konversi energi dari panas terbuang (*waste heat*) menjadi listrik menggunakan modul *termoelektrik generator* (TEG) dengan sistem pendingin udara paksa

dapat dilihat pada Gambar 2. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh laju pemanasan (*heating rate*) terhadap selisih temperatur antara permukaan panas dan permukaan dingin modul serta kinerja berupa luaran listrik yang dihasilkan modul TEG. Penelitian ini memanfaatkan plat pemanas (*heater AC*) sebagai sumber energi panas yang nantinya akan dikonversi menjadi energi listrik oleh modul TEG, 3 variasi laju pemanasan digunakan dalam eksperimen ini yaitu *Low* ($1.558\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$), *Middle* ($0.933\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) dan *High* ($1.558\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Untuk mengatur laju pemanasan yang berbeda maka alat dimmer AC dimanfaatkan. Dalam penelitian ini permukaan panas modul TEG ditempelkan pada plat pemanas (*heater*), sedangkan untuk membuang panas pada permukaan dingin TEG ke lingkungan digunakan sistem pendingin udara secara paksa (*force air cooling system*) memanfaatkan kombinasi antara plat aluminium bersirip dengan kipas DC (*heatsink-fan*). Pengukuran temperatur pada sistem ini menggunakan termokopel tipe K yang dikombinasikan dengan sensor *max 6675* dan arduino *mikrokontroller*, rangkaian tersebut bertujuan agar pengukuran temperatur pada sistem dapat di akuisisi secara langsung (*realtime*). Termokopel tipe K tersebut ditempatkan pada permukaan temperatur panas (T.h), permukaan temperatur dingin modul TEG (T.c) dan disekitar sistem TEG untuk mengukur temperatur lingkungan (*ambient temperature*) (T.a). Digital temperature dan *humidity* meter digunakan untuk mengukur kelembapan dan kondisi temperatur lingkungan agar selalu terpantau.



Gambar 2. Skema pengujian konversi energi dari energi panas menjadi listrik menggunakan modul TEG

Skema sistem konversi energi pada eksperimen ini yang meliputi penempatan plat pemanas (*heater*), modul TEG, *heatsink* dan kipas (*fan*) dapat diamati melalui model CAD pada Gambar 3.



Gambar 3. Model CAD sistem konversi energi menggunakan modul TEG

Modul TEG dalam penelitian ini difungsikan sebagai alat konversi energi panas dari plat pemanas menjadi energi listrik secara langsung (*direct*), spesifikasi dari modul TEG tipe SP 1848SA yang digunakan dalam eksperimen ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Spesifikasi modul TEG tipe SP1848 SA ^[11,14]

No	PARAMETER	SPESIFIKASI
1	Dimensi: a. Panjang b. Lebar c. Tebal d. Berat	40 mm 40 mm 3.8 mm 25 gram
2	Material: a. Permukaan panas dan dingin TEG b. Positif <i>semiconductor</i> (p-leg) c. Negatif <i>semiconductor</i> (n-leg)	Keramik Bi ₂ Te ₃ Bi ₂ Te ₃
3	Physical parameters: a. Koefisien <i>Seebeck</i> b. Konduktivitas termal c. Konduktivitas listrik d. <i>Net semiconductors</i> material e. Temperatur maksimal	0.023 V/K 0.6 W/m.K 12 300 °C
4	Diproduksi oleh	Shenzhen Ruised Technology Co., Ltd

Tabel 2. Spesifikasi alat ukur.

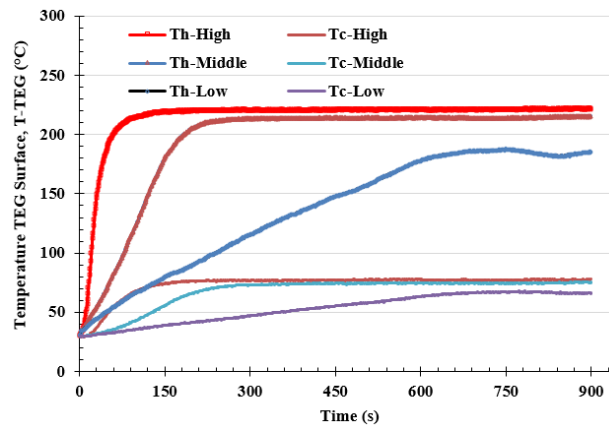
No	Objek	Alat ukur	Tipe	Jangkauan
1	Temperatur (°C)	- <i>Arduino</i> - <i>Temperature Sensor</i> - <i>Thermocouple</i>	- Mega2560 - Max6675 - Tipe K	-200 to 1260°C
2	Arus (I)	- <i>Arduino</i> - Sensor arus	- Uno R3 - ACS712	60mV-600mV-6-60V-600V (<i>accuracy</i> ±0.5%)
3	Tegangan (V)	- <i>Arduino</i> - Sensor tegangan	- Uno R3 - DC voltage	60mV-600mV-6-60V-600V (<i>accuracy</i> ±0.5%)

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Profil Temperatur Permukaan TEG

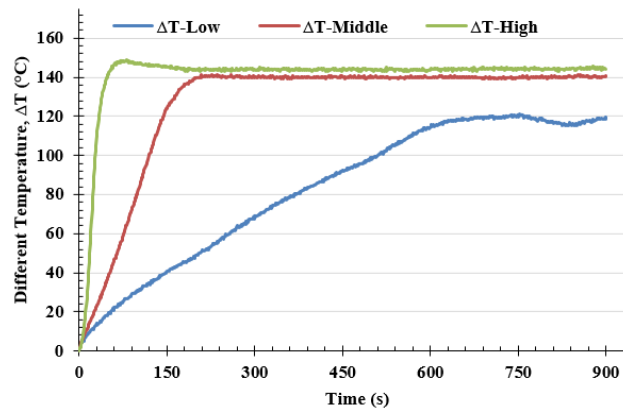
Untuk menginvestigasi pengaruh laju pemanas terhadap temperatur permukaan dan luaran listrik yang dihasilkan modul *thermoelectric generator* (TEG) tipe SP 1848 SA, modul dipanaskan selama 900 detik (15 menit) menggunakan plat pemanas dan semua data berupa temperatur serta tegangan diakuisisi secara terus menerus menggunakan alat ukur digital yang terhubung dengan komputer. Plat pemanas yang dapat diatur daya inputnya dimanfaatkan untuk memanaskan permukaan panas modul TEG. Plat pemanas tersebut juga diasumsikan sebagai sumber panas terbuang hasil dari pembakaran dalam mesin industri (*internal combustion engine*, ICE). Pada penelitian ini, tiga variasi laju pemanas digunakan yakni *Low* (1.558 °C/min), *Middle* (0.933 °C/min) and *High* (1.558 °C/min). Gambar 4 menunjukkan profil temperatur pada permukaan panas (Th) dan permukaan dingin (Tc)

modul TEG ketika dipanaskan selama 900 detik menggunakan laju pemanas yang berbeda, dapat dilihat juga bahwa pengukuran pada temperatur permukaan panas TEG untuk semua variasi laju pemanas akan meningkat terus menerus hingga temperatur mencapai kondisi stabil, namun temperatur maksimal dan lamanya temperatur sampai kondisi stabil untuk masing-masing variasi laju pemanas yang terukur akan berbeda. Hal tersebut dapat dipahami karena semakin tinggi daya listrik yang diberikan ke plat *heater*, maka semakin besar selisih temperatur antara permukaan panas dan dingin modul TEG serta semakin cepat waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan temperatur yang stabil (*steady state condition*)^[15].



Gambar 4. Temperatur permukaan modul TEG

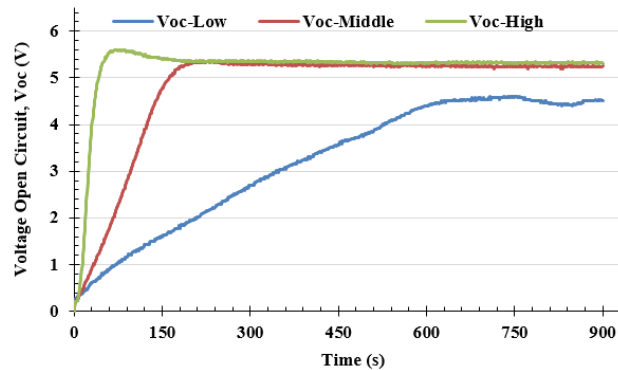
Profil perbedaan temperatur antara permukaan sisi panas dan permukaan sisi dingin TEG ketika dipanaskan menggunakan plat pemanas selama 900 detik dengan memvariasikan 3 laju pemanas yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 5. Pengukuran selisih temperatur tersebut dengan mengurangi nilai temperatur yang terukur antar permukaan panas dan permukaan dingin, terlihat bahwa penggunaan laju pemanas pada plat pemanas yang berbeda akan menghasilkan kurva selisih temperatur yang berbeda. Dimana laju pemanas dengan variasi high akan menghasilkan selisih temperatur yang paling besar jika dibandingkan dengan variasi laju pemanas yang lainnya, selain itu penggunaan laju pemanas high akan menyebabkan kurva selisih temperatur yang terbentuk cenderung lebih cepat mengalami kondisi stabil (*steady state*). Akan tetapi ketika laju pemanas yang digunakan adalah low heating rate selisih temperatur antara permukaan sisi panas dan permukaan sisi dingin TEG terukur paling rendah. Hal demikian nantinya yang akan mempengaruhi kinerja TEG dalam menghasilkan energi listrik.



Gambar 5. Selisih temperatur permukaan panas dan dingin modul TEG

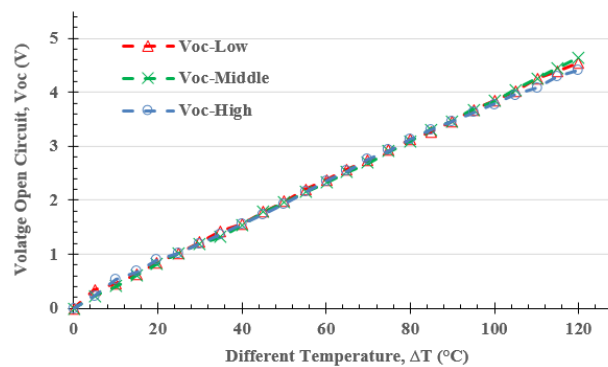
3.2. Analisis Kinerja TEG

Hasil pengambilan data berupa luaran listrik tegangan (*voltage*) yang dihasilkan modul TEG pada percobaan rangkaian terbuka (*Voltage output Circuit, Voc*) dengan memvariasikan laju pemanas ditunjukkan pada Gambar 6. Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh berbagai laju pemanas terhadap kinerja modul TEG yang dipanaskan dengan plat heater. Profil kurva yang terbentuk pada Gambar 6 cenderung sama dengan profil kurva selisih temperatur permukaan TEG pada gambar 5. Semakin besar selisih temperatur yang terukur maka luaran listrik berupa tegangan yang dihasilkan modul TEG juga semakin besar.



Gambar 6. Tegangan listrik yang dihasilkan modul TEG

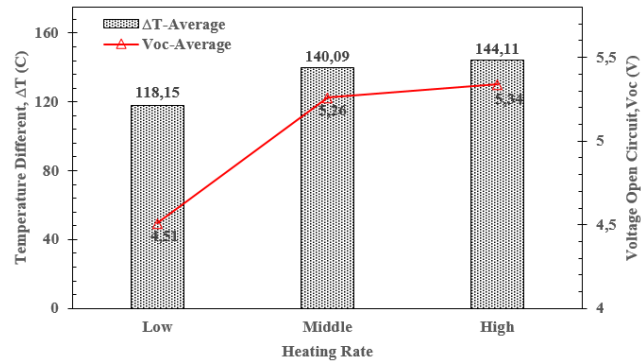
Gambar 7 menunjukkan pengukuran luaran listrik berupa tegangan modul TEG yang dilakukan ketika kondisi selisih temperatur sama antara permukaan panas dan dingin TEG dengan variasi 3 laju pemanas. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa ketika pengukuran luaran listrik dilakukan pada kondisi selisih temperatur permukaan yang sama luaran listrik yang dihasilkan modul TEG cenderung tidak terpengaruh secara berarti, itu artinya bahwa perbedaan laju pemanas yang dibebankan pada sisi panas TEG tidak menyebabkan perbedaan luaran listrik berupa tegangan ketika data yang dibandingkan pada kondisi selisih temperatur yang sama.



Gambar 7. Tegangan listrik yang dihasilkan terhadap selisih temperatur modul TEG

Gambar 8 merupakan hasil perhitungan rata-rata selisih temperatur antara permukaan panas dan dingin modul terhadap rata-rata tegangan listrik yang dihasilkan modul TEG dengan variasi laju pemanas. Perhitungan rata-rata selisih temperatur permukaan modul dan rata-rata tegangan yang dihasilkan TEG dilakukan berdasarkan data yang sebelumnya ditampilkan pada Gambar 5 dan 6 pada saat kondisi stabil. Dari gambar 8. Dapat dilihat bahwa variasi laju pemanas yang diberikan pada permukaan panas modul TEG akan mempengaruhi rata-rata selisih temperatur dimana semakin cepat laju pemanasan maka selisih temperatur yang terukur pada saat kondisi stabil juga semakin meningkat. Ketika

variasi laju pemanas adalah *low (low heating rate)* tegangan yang dihasilkan oleh modul TEG adalah 4.51V, luaran listrik berupa tegangan yang berhasil diukur akan mengalami kenaikan sekitar 16.6% ketika laju pemanas yang digunakan adalah *middle (middle heating rate)* selanjutnya ketika laju pemanas yang digunakan adalah *high (high heating rate)* maka luaran listrik dari modul TEG menghasilkan tegangan 5.34V atau paling tinggi jika dibandingkan dengan variasi laju pemanas yang lainnya. Peningkatan selisih temperatur pada permukaan modul akan konsisten dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh modul TEG serta semakin tinggi variasi laju pemanas yang diberikan. Hasil tersebut sejalan dengan apa yang dikemukakan oleh S.Wiriyasart dalam penelitiannya yang menyatakan bahwa selisih temperatur pada permukaan modul memiliki peran penting dalam luaran listrik yang dihasilkan modul TEG [16].



Gambar 8. Selisih temperatur rata-rata permukaan modul dan tegangan listrik rata-rata yang dihasilkan TEG

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju pemanas (*heating rate*) pada permukaan panas modul TEG akan mempengaruhi selisih temperatur permukaan serta kinerja modul TEG dalam menghasilkan listrik ketika diukur dalam kondisi stabil (*steady state condition*). Ketika variasi laju pemanas adalah *low (low heating rate)* tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh modul TEG adalah 4.51V, luaran listrik berupa tegangan rata-rata yang berhasil diukur akan mengalami kenaikan sekitar 16.6% atau menjadi 5.26V ketika laju pemanas yang digunakan adalah *middle (middle heating rate)* selanjutnya, ketika laju pemanas yang digunakan adalah *high (high heating rate)* maka luaran listrik rata-rata dari modul TEG menghasilkan tegangan 5.34V atau paling tinggi jika dibandingkan dengan variasi laju pemanas yang lainnya. Peningkatan tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh modul TEG konsisten dengan selisih temperatur rata-rata antara permukaan panas dan dingin modul TEG serta semakin tinggi variasi laju pemanas yang diberikan. Hal demikian dapat dipahami karena selisih temperatur pada permukaan modul memiliki peran penting dalam kinerja luaran listrik yang dihasilkan modul TEG.

PERNYATAAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan keuangan yang diberikan. (Nomor kontrak induk: 158/E5/PG.02.00.PT/2022).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Harun and V. R. Yandri, “Sistem Kendali Distribusi Gas Buang pada *Waste Heat Recovery Power Generation* untuk dikonversi menjadi Energi Terbarukan di Indarung V, PT. Semen Padang, Indonesia,” *Elektron J. Ilm.*, vol. 12, no. 1, pp. 24–27, 2020, doi: 10.30630/eji.12.1.152.
- [2] F. Hao *et al.*, “*High efficiency Bi2Te3-based materials and devices for thermoelectric power generation between 100 and 300 °c,*” *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 3120–3127, 2016, doi: 10.1039/c6ee02017h.
- [3] X. Hu *et al.*, “*Investigation on waste heat recovery of a nearly kilowatt class thermoelectric generation system mainly based on radiation heat transfer,*” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1829190.
- [4] Z. Murčinková, M. Kosturák, and J. Ferenc, “*Testing of proposed design of stove-powered thermoelectric generator using natural and forced air cooling,*” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1177/1687814020987761.
- [5] M. Munawir, M. N. Sasongo, and N. Hamidi, “*Kinerja Thermoelectric Pada Kotak Pendingin Berdasarkan Rangkaian Thermoelectric Dan Putaran Fan Wind Tunnel,*” *Rekayasa Mesin*, no. December 2020, pp. 27–40, 2021.
- [6] H. B. Gao, G. H. Huang, H. J. Li, Z. G. Qu, and Y. J. Zhang, *Development of stove-powered thermoelectric generators: A review*, vol. 96. 2016.
- [7] D. Champier, “*Thermoelectric generators: A review of applications,*” *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 167–181, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.02.070.
- [8] D. Champier, J. P. Bédécarrats, T. Kousksou, M. Rivaletto, F. Strub, and P. Pignolet, “*Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove,*” *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1518–1526, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.01.012.
- [9] F. J. Disalvo, “*Thermoelectric Cooling and Power Generation,*” vol. 285, no. JULY, pp. 703–707, 1999.
- [10] G. J. Snyder, M. Soto, R. Alley, D. Koester, and B. Conner, “*Hot Spot Cooling using Embedded Thermoelectric Coolers.*”
- [11] N. T. Atmoko, I. Veza, T. Widodo, and B. Riyadi, “*Study On The Energy Conversion In The Thermoelectric Liquefied Petroleum Gas Cooking Stove With Different Cooling Methods,*” vol. 69, no. 1, pp. 185–193, 2021, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I1P228.
- [12] M. Borcuch, M. Musiał, S. Gumuła, K. Sztekler, and K. Wojciechowski, “*Analysis of the fins geometry of a hot-side heat exchanger on the performance parameters of a thermoelectric generation system,*” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 1355–1363, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.147.
- [13] X. Liu, Y. D. Deng, K. Zhang, M. Xu, Y. Xu, and C. Q. Su, “*Experiments and simulations on heat exchangers in thermoelectric generator for automotive application,*” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 71, no. 1, pp. 364–370, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.022.
- [14] T. Widodo, B. Riyadi, B. Radiant, M. Effendy, A. Tri, and H. H. Al-kayiem, “*Effect of thermal cycling with various heating rates on the performance of thermoelectric modules,*” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 178, no. March, p. 107601, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107601.

- [15] P. Thanthong, P. Chantawong, and J. Khedari, “*Radiation-Based Thermoelectric Power Generation with Finned Heat Absorber*,” vol. 12, no. 1, 2022.
- [16] S. Wiriyasart and P. Naphon, “*Thermal to electrical closed-loop thermoelectric generator with compact heat sink modules*,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 164, p. 120562, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120562.