



Research Article

## Investigasi Kinerja Luaran Listrik Modul Thermoelectric Menggunakan Pemanas Heater dan Pendingin Air

*Bagus Radiant Utomo*<sup>1,\*</sup>, *Hadi Kusnanto*<sup>1</sup>, *Nugroho Tri Atmoko*<sup>2</sup>, *Desi Gustiani*<sup>3</sup>, *Hendy Lilih Wjayanto*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya, **Indonesia**

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Warga Surakarta, **Indonesia**

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau, **Indonesia**

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Perawatan Mesin, Politeknik Industri Logam Morowali, **Indonesia**

**Corresponding author:** [bagusradiant@ft-umsurabaya.ac.id](mailto:bagusradiant@ft-umsurabaya.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received : 5 July 2022

Revised : 4 August 2022

Accepted : 9 August 2022

Available online : 9 August 2022

**Keywords:** *Performance, Thermoelectric, Coefficient seebeck*

### ABSTRACT

*The thermoelectric module is an energy conversion device that converts the temperature difference into electricity through the principle of the seebeck effect. Thermoelectric has the advantage of converting electricity directly, and it is utilized in a variety of engineering applications, and currently, many countries are now manufacturing, developing, and selling thermoelectric module products commercially. This study investigates the external performance of open voltage, coefficient seebeck, voltage, current, and power using the heater and water cooling at thermoelectric module type TEC 12706, TEC 12715, and TEG SP 1848 27145, which to selling commercially in Indonesia. The research was conducted by affixing a thermoelectric module to a screw clamp with a 1 Mpa pressure. Then, it was conducted heating twice, with the first heating experiment conducted without an external load and the second with a 4.8 VDC 0.5 A lamp as the external load. The heating system employs a heater plate with a maximum temperature of 150-151 °C, and the cooling system employs a water block with a constant flow rate of 150 l/hour. The results indicated that the thermoelectric module type TEG SP 1848 27145 produced the highest electrical output, followed by TEC 12715 and TEC 12706. The coefficient seebeck value influences the output performance of the thermoelectric module; the higher the coefficient seebeck value, the greater the electrical output.*

### ABSTRAK

Modul thermoelectric merupakan alat konversi energi yang mengubah perbedaan selisih suhu menjadi listrik secara

**Kata Kunci:** Performa, Thermoelectric, Koefisien seebeck



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

langsung, melalui prinsip efek seebeck. Thermoelectric memiliki keuntungan mengubah listrik secara langsung dan thermoelectric banyak digunakan di beberapa aplikasi teknik, dan saat ini banyak negara yang mulai memproduksi, mengembangkan dan menjual produk modul thermoelectric secara komersial. Tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi kinerja luaran tegangan terbuka, koefisien seebeck, tegangan tertutup, arus, dan daya dengan menggunakan pemanas heater dan pendingin air pada tipe modul thermoelectric tipe TEC 12706, TEC 12715, dan TEG SP 1848 27145 yang dijual secara komersial di Indonesia. Penelitian dilakukan dengan menempatkan modul thermoelectric pada penjepit screw dengan tekanan 1 Mpa. Penelitian dilakukan dalam 2 kali pemanasan, percobaan pertama pemanasan dilakukan tanpa menggunakan beban luaran, dan percobaan kedua pemanasan dilakukan menggunakan beban luaran lampu 4,8 VDC 0,5 A. Sistem pemanasan menggunakan plat heater dengan suhu maksimal 150-151 °C dan sistem pendingin menggunakan water block dengan laju aliran air 150 l/jam secara konstan. Hasil penelitian menunjukkan keluaran listrik tertinggi diperoleh pada modul thermoelectric tipe TEG SP 1848 27145, di ikuti TEC 12715, dan TEC 12706. Kinerja keluaran modul thermoelectric tersebut dipengaruhi oleh nilai koefisien seebeck, dimana semakin tinggi nilai koefisien seebeck maka akan menghasilkan keluaran listrik yang semakin tinggi.

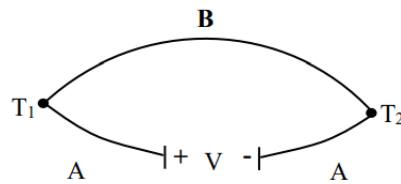
## 1. PENDAHULUAN

*Thermoelectric* merupakan alat konversi energi yang terdiri dari semikonduktor positif dan negatif, yang merubah selisih suhu menjadi energi listrik melalui efek *seebeck* [1] [2]. Fenomena *thermoelectric* pertama kali ditemukan oleh Thomas Johan Seebeck pada tahun 1821, dan aplikasi *thermoelectric* telah berjalan selama bertahun-tahun sebagai teknologi konversi energi panas menjadi listrik secara langsung [3][4]. *Thermoelectric* juga merupakan teknologi konversi yang unggul, dimana *thermoelectric* pada proses penggunaannya tidak ada bagian yang bergerak, tidak cairan yang bekerja, tidak ada suara, dan memiliki perawatan yang relatif mudah [5][6][7]. Dengan keunggulan yang dimiliki *thermoelectric*, hingga saat ini *thermoelectric* banyak digunakan di beberapa bidang pemanfaatan panas buang.

Penelitian tentang aplikasi panas buang pada kendaraan dilaporkan oleh Fabian Frobenius dkk [8]. Penelitian dilakukan menggunakan 7 modul *thermoelectric* yang di pasang secara paralel, dan diaplikasikan pada saluran gas buang kendaraan. Hasil penelitian menghasilkan daya terbesar sebesar 416 watt pada kondisi gas buang 1000 kg/jam dan suhu 300 °C. Selanjutnya dilaporkan oleh Marit Takla Borset dkk [9], tentang pemanfaatan panas buang pada bidang industri pengecoran silicon. Hasil penelitian menunjukkan daya puncak pada selisih suhu 100 K memiliki keluaran listrik sebesar 160 watt, dan diperkirakan daya keluaran dapat mencapai 900 watt. Selain itu Hendy dkk [10], dalam penelitiannya tentang pemanfaatan panas buang hasil dari pembakaran tungku kayu menjadi energi listrik menggunakan modul TEG menghasilkan luaran listrik berkisar antara 21,13 volt sampai 24,8 volt pada rangkaian terbuka.

Penelitian kinerja *thermoelectric* sebagai pembangkit listrik juga telah diamati oleh banyak peneliti. Dilaporkan oleh Amer Hakim dkk [11], tentang analisa kinerja modul *thermoelectric* tipe TEC1-12703 dan TEC1-12706 dengan sumber panas *heater* dan pendingin udara. Hasil menunjukkan pada selisih suhu 67 °C modul *thermoelectric* tipe TEC1-12703 menghasilkan daya sebesar 1,428 watt, dan pada modul *thermoelectric* tipe TEC1-12706 menghasilkan daya sebesar 0,775 watt. Dengan perkembangannya penelitian dan aplikasi *thermoelectric* tersebut, hingga saat ini tercatat beberapa perusahaan yang mengembangkan dan menjual *thermoelectric* secara komersial, seperti HiZ dari USA [12], Komatsu dari Japan [13], dan Thermonamic dari China [14].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi keluaran listrik modul *thermoelectric* TEC 12706, TEC 12715, dan TEG SP 1848 27145 yang dijual secara komersial di Indonesia. Penelitian difokuskan untuk mengetahui kinerja luaran listrik melalui efek *seebeck*. Efek *seebeck* menjelaskan pembentukan celah potensial ( $\Delta V$ ) melalui semikonduktor karena difusi pembawa beban diatas perbedaan suhu ( $\Delta T$ ), yang ditemui pada modul jika salah satunya dipanaskan atau didinginkan. Pengalihan muatan dari tepi panas ke tepi dingin, berkontribusi pada variasi jumlah pembawa muatan pada efek yang diimbangi oleh medan listrik internal yang dihasilkan. Bentuk pembawa muatan mayor akan menentukan tanda beda potensial yang di diidentifikasi dengan potensial sisi dingin dalam hubungannya dengan sisi panas [15]. Prinsip kerja dari efek *seebeck* dapat dilihat pada gambar 1.



**Gambar 1.** Prinsip efek *seebeck* [16]

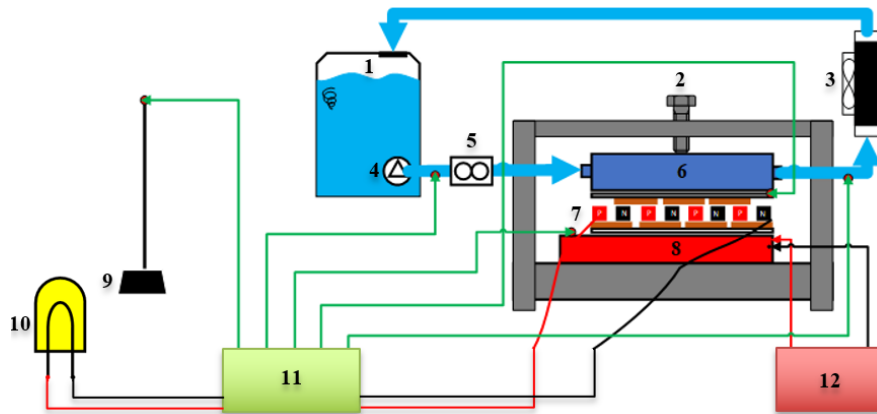
Efek *seebeck* memiliki pengaruh besar pada proses konversi energi pada *thermoelectric*, efek *seebeck* memungkinkan arus untuk bergerak ketika ada perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin sisi [17]. Hubungan antara perbedaan potensial yang dihasilkan dan gradien suhu diberikan dalam Persamaan 1.

$$\alpha = \frac{V_{oc}}{\Delta T}, \quad (1)$$

Dimana  $\alpha$  merupakan koefisien *seebeck*,  $V_{oc}$  merupakan keluaran tegangan terbuka, dan  $\Delta T$  merupakan selisih suhu sisi panas dan sisi dingin modul *thermoelectric* [18].

## 2. METODE PENELITIAN

Pengujian dilakukan dengan mencekam modul *thermoelectric* dengan tekanan *screw* sebesar 1 Mpa dan memanaskan plat *heater* yang diberi daya sebesar 362,52 watt, dan menggunakan sistem pendinginan *water block* dengan kecepatan aliran air 150 l/jam secara konstan dan volume air sebesar 100 liter. Penelitian dilakukan dalam 2 kali pemanasan dengan suhu



**Gambar 2.** Skematik instalasi pengujian modul *thermoelectric*

Keterangan:

- |                       |                                       |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 1 <i>Water tank</i>   | 7 Modul <i>thermoelectric</i>         |
| 2 <i>Screw</i>        | 8 Plat <i>heater</i>                  |
| 3 <i>Radiator fan</i> | 9 Tiang suhu lingkungan               |
| 4 Pompa DC            | 10 Lampu DC                           |
| 5 <i>Flowmeter</i>    | 11 Data logger berbasis Arduino       |
| 6 <i>Water block</i>  | 12 Sumber listrik AC dengan termostat |

- Point pengukuran suhu
- Kabel positif
- Kabel negatif

maksimal antara 150-152 °C, dan suhu diatur menggunakan termostat Autonics TK4S. Percobaan pertama dilakukan tanpa menggunakan beban luaran, dan percobaan kedua dilakukan menggunakan beban eksternal lampu 4,8 VDC 0,5 A. Penelitian dilakukan dengan variasi tipe modul *thermoelectric*; TEG SP 1848 27145 SA, TEC 12706, dan TEC 12715. Adapun skematik instalasi pengujian modul *thermoelectric* dapat dilihat pada gambar 2, dan alat pengujian modul *thermoelectric* dapat dilihat pada gambar 3.



**Gambar 3.** Alat uji pengujian modul *thermoelectric*

Hasil keluaran modul *thermoelectric* berupa suhu, tegangan, arus dan daya. Suhu yang diukur berupa suhu sisi panas suhu dan sisi dingin modul *thermoelectric*, suhu air yang masuk dan keluar *waterblock* serta suhu lingkungan sekitar. Suhu diukur dengan kabel termokopel tipe K

yang dihubungkan dengan sensor Max 6675 berbasis arduino. Tegangan, arus, dan daya diukur dengan menghubungkan data luaran modul *thermoelectric* dengan sensor DC voltage and current berbasis Arduino.

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Profil suhu maksimum pada pengujian modul *thermoelectric*

Hasil pengujian dan pengukuran suhu sisi panas, suhu sisi dingin, serta perhitungan selisih suhu sisi panas dan sisi dingin untuk semua tipe modul *thermoelectric* ditunjukkan pada tabel 1. Nilai suhu pada tabel 1 merupakan suhu maksimal yang dihasilkan *heater* yang telah diatur oleh termostat. Pada hasil pengukuran suhu sisi panas untuk semua tipe modul *thermoelectric* menunjukkan pada sisi panas berkisar antara 150-152 °C. Kemudian pada sisi dingin untuk semua tipe modul *thermoelectric* menunjukkan suhu berkisar antara 89-91 °C, dan hasil perhitungan selisih suhu sisi panas dan sisi dingin berkisar 61-62 °C. Gambar 4 menunjukkan diagram hasil pengukuran suhu sisi panas, suhu sisi dingin serta hasil perhitungan selisih suhu sisi panas dan sisi dingin untuk semua tipe modul *thermoelectric*. Hasil menunjukkan suhu yang diukur saat pengujian memiliki nilai suhu yang hampir sama.

**Tabel 1.** Hasil pengukuran suhu pengujian modul *thermoelectric*

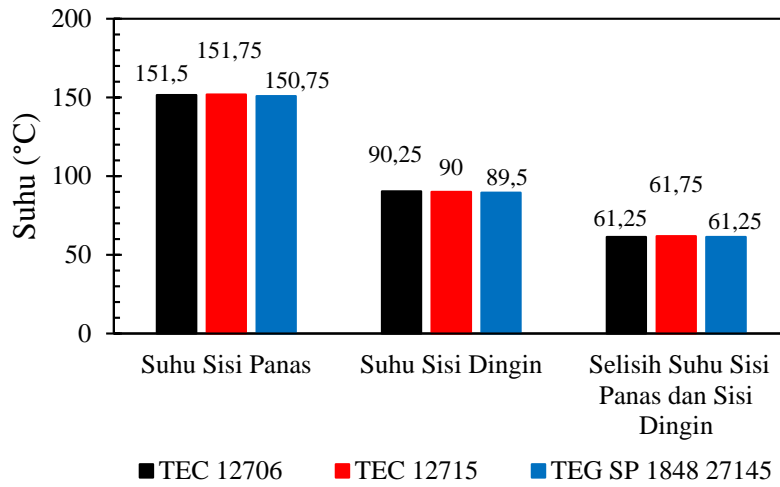
No	Tipe Modul <i>Thermoelectric</i>	Suhu Sisi Panas (°C)	Suhu Sisi Dingin (°C)	Selisih Suhu Sisi Panas dan Sisi Dingin (°C)
1	TEC 12706	151,5	90,25	61,25
2	TEC 12715	151,75	90	61,75
3	TEG SP 1848 27145	150,75	89,5	61,25

#### 3.2 Profil keluaran tegangan terbuka

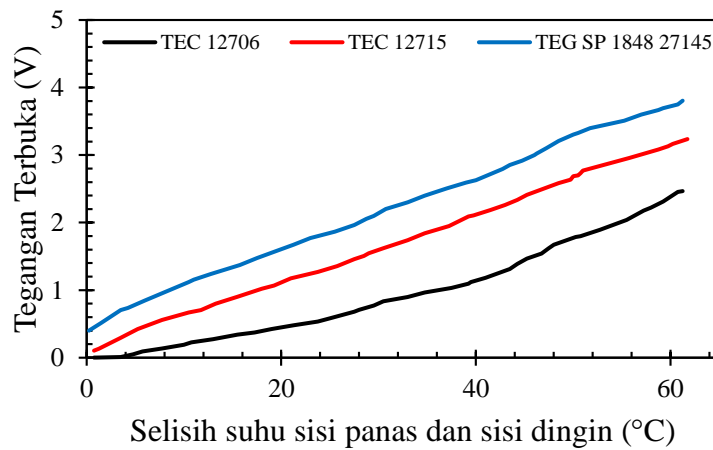
Hasil tegangan terbuka pada selisih suhu antara 0-62 °C dapat dilihat pada gambar 5. Hasil menunjukkan semakin tinggi selisih suhu pada modul *thermoelectric* maka akan menghasilkan tegangan terbuka yang semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena selisih suhu sisi panas dan sisi dingin mempengaruhi keluaran tegangan terbuka modul *thermoelectric*, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Yaoguang Shi dkk [19], dan Saim Memon dkk [20], dimana semakin tinggi selisih suhu sisi panas dan sisi dingin maka akan menghasilkan tegangan terbuka yang semakin tinggi. Pada modul *thermoelectric* pada selisih suhu 0-62 °C modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 memiliki profil tegangan terbuka tertinggi di ikuti oleh tipe TEC 12715 dan TEC 12706.

#### 3.4 Profil keluaran koefisien seebeck

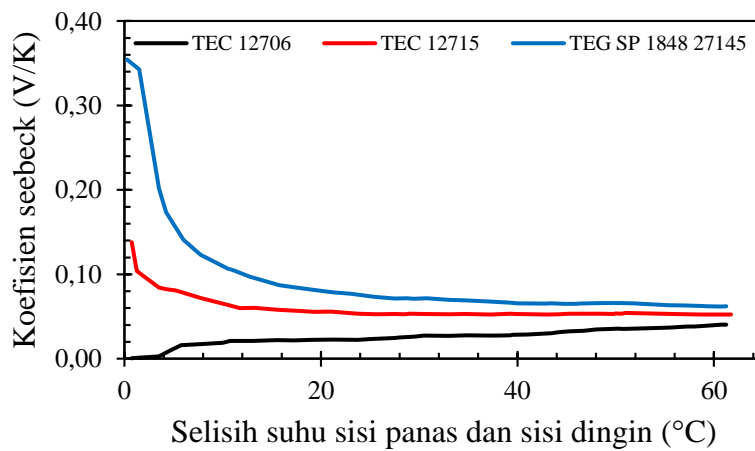
Gambar 6 merupakan hasil keluaran koefisien *seebeck* dari semua tipe modul *thermoelectric* pada selisih suhu 0-62 °C. Nilai koefisien *seebeck* dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Hasil menunjukkan pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 dan TEC 12715 menghasilkan koefisien tinggi diawal percobaan, namun mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya selisih suhu. Penurunan koefisien *seebeck* dengan bertambahnya selisih suhu sisi panas dan suhu sisi dingin dikarenakan bahan semikonduktor menghasilkan nilai koefisien *seebeck* yang rendah dengan bertambahnya suhu [21]. Pada modul *thermoelectric* tipe TEC 12706 nilai koefisien *seebeck* cenderung naik dengan bertambahnya selisih suhu. Hasil perhitungan koefisien *seebeck* pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 memiliki koefisien *seebeck* tertinggi diikuti modul *thermoelectric* tipe TEC 12715, dan TEC 12706.



Gambar 4. Diagram suhu maksimum hasil pengujian pada pengujian modul *thermoelectric*



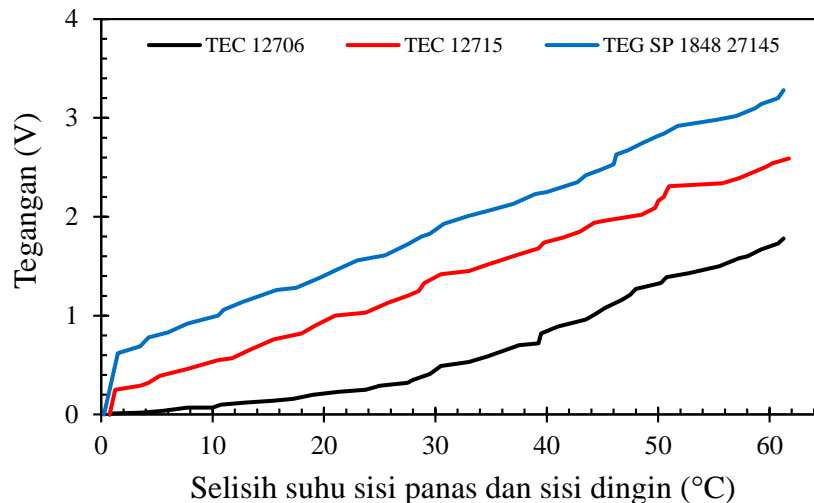
Gambar 5. Grafik keluaran tegangan terbuka terhadap perbedaan suhu sisi panas dan sisi dingin *thermoelectric*



Gambar 6. Grafik keluaran koefisien *seebeck* terhadap perbedaan suhu sisi panas dan sisi dingin *thermoelectric*

### 3.5 Profil keluaran tegangan tertutup

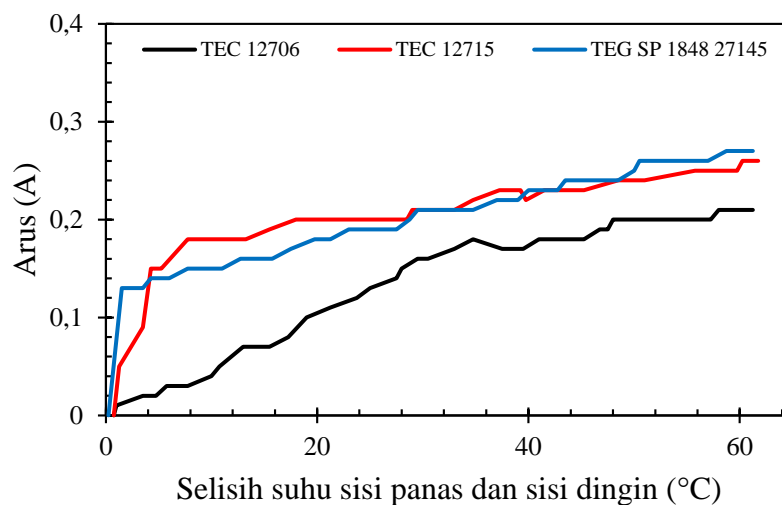
Tegangan tertutup didapatkan dengan menguji modul *thermoelectric* dengan pembebanan luaran lampu 4.8 VDC 0.5 A. Hasil keluaran tegangan pada selisih suhu antara 0-62 °C ditunjukkan pada gambar 7. Hasil menunjukkan untuk semua modul *thermoelectric* semakin tinggi selisih suhu maka akan menghasilkan tegangan yang semakin tinggi. Hasil penelitian menunjukkan modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 memiliki tegangan tertinggi diikuti modul *thermoelectric* tipe TEC 12715, dan TEC 12706.



**Gambar 7.** Grafik keluaran tegangan terhadap perbedaan suhu sisi panas dan sisi dingin *thermoelectric*

### 3.6 Profil keluaran arus

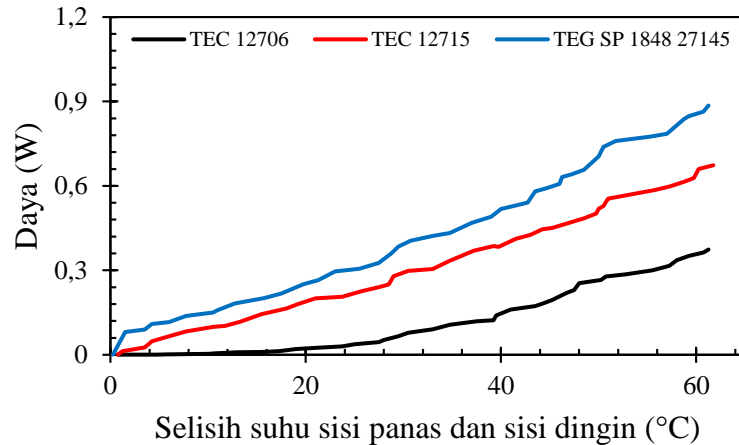
Gambar 8 menunjukkan hasil keluaran arus modul *thermoelectric* pada selisih suhu 0-62 °C. Hasil menunjukkan untuk semua tipe modul *thermoelectric* mengalami kenaikan selaras dengan kenaikan selisih suhu. Pada hasil penelitian arus tertinggi didapatkan pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 diikuti tipe TEC 12715, dan TEC 12706.



**Gambar 8.** Grafik keluaran arus terhadap perbedaan suhu sisi panas dan sisi dingin *thermoelectric*

### 3.7 Profil keluaran daya

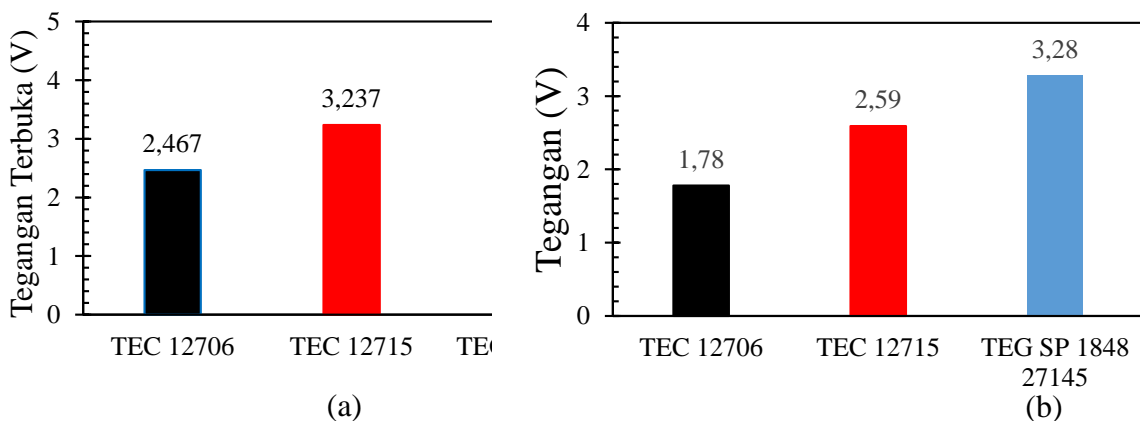
Gambar 9 menunjukkan hasil dari daya keluaran pada selisih suhu 0-62 °C untuk semua tipe modul *thermoelectric*. Hasil menunjukkan semakin tinggi selisih suhu maka semakin tinggi daya yang dihasilkan modul *thermoelectric*. Hasil daya tertinggi didapatkan pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 diikuti tipe TEC 12715, dan TEC 12706.



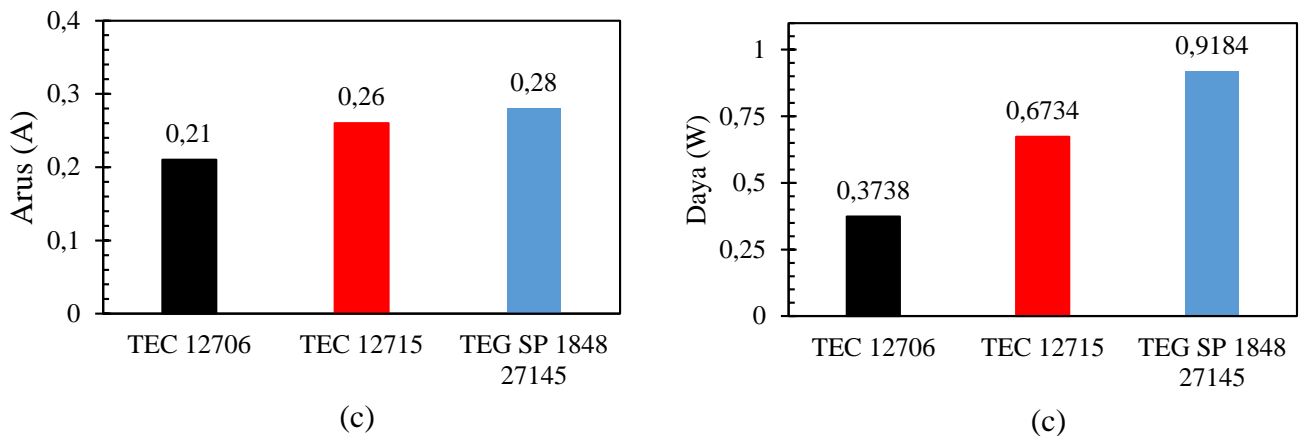
**Gambar 9.** Grafik keluaran daya terhadap perbedaan suhu sisi panas dan sisi dingin *thermoelectric*

### 3.8 Profil keluaran listrik dan koefisien *seebeck* pada pengujian modul *thermoelectric* pada selisih suhu maksimum

Hasil keluaran listrik modul *thermoelectric* pada selisih suhu maksimum berkisar 61-62 °C ditunjukkan pada gambar 10. Pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 memiliki luaran listrik paling tinggi dengan tegangan terbuka sebesar 3,806 V, tegangan tertutup 3,28 V, arus 0,28 A, dan daya 0,918 W, diikuti oleh modul *thermoelectric* tipe TEC 12715 dengan tegangan terbuka 3,237 V, tegangan tertutup 2,59 V, arus 0,26 A, dan daya 0,673 W. Kemudian pada modul *thermoelectric* tipe TEC 12706 menghasilkan tegangan terbuka 2,467 V, tegangan tertutup 1,78 V, arus 0,21 A, dan daya 0,374 W.



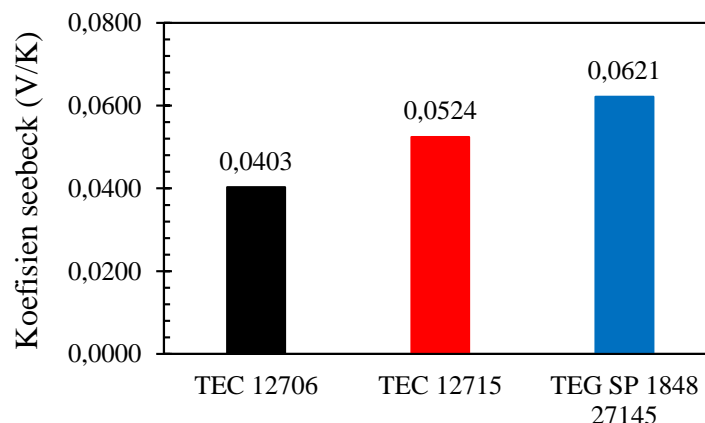




**Gambar 10.** Diagram keluaran listrik maksimum pada pengujian *thermoelectric*: (a) Tegangan Terbuka, (b) Tegangan, (c) Arus, dan (d) daya

Gambar 11 menunjukkan hasil perhitungan nilai koefisien *seebeck* pada hasil pengujian semua tipe modul *thermoelectric*. Hasil menunjukkan nilai koefisien *seebeck* tertinggi diperoleh pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 dengan nilai koefisien *seebeck* sebesar 0,0621 V/K. Di ikuti modul *thermoelectric* tipe TEC 12715 dengan nilai koefisien *seebeck* sebesar 0,0524 V/K. Pada modul *thermoelectric* tipe TEC 12706 memiliki nilai koefisien *seebeck* sebesar 0,0403 V/K.

Hasil pengujian dan perhitungan modul *thermoelectric* tipe TEC 12706, TEC 12715, dan TEG SP 1848 27145 menghasilkan kinerja luaran yang berbeda disebabkan karena memiliki nilai koefisien *seebeck* yang berbeda. Koefisien *seebeck* memiliki pengaruh besar pada proses konversi energi pada *thermoelectric*, efek *seebeck* memungkinkan arus untuk bergerak ketika ada perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin sisi [17]. Hal ini membuktikan kinerja modul *thermoelectric* dipengaruhi oleh nilai koefisien *seebeck*, yang dimana semakin tinggi koefisien *seebeck* maka akan menghasilkan keluaran listrik yang semakin tinggi. Tabel 2 menunjukkan hasil komparasi pengujian modul *thermoelectric* tipe TEC 12706, TEC 12715, dan TEG SP 1848 27145 dengan penelitian sebelumnya.



**Gambar 11.** Diagram hasil perhitungan koefisien *seebeck* pada selisih suhu

**Tabel 2.** Komparasi hasil penelitian dengan penelitian sebelumnya

Referensi	Tipe Modul <i>Thermoelectric</i>	Model pengujian	Delta (°C)	Tegangan Terbuka (V)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Koefisien <i>seebeck</i> (V/K)
Amer Hakim dkk., 2020 [11]	TEC1-12703	Pemanas <i>hot</i>	67	-	3,689	0,3862	1,4281	-
	TEC1-12706	<i>plate</i> dan pendingin <i>heatsink fan</i>	67	-	2,618	0,2946	0,7715	-
Missyamsu Algusri dkk., 2018 [22]	TEC1-12706	Pemanas <i>hot</i>	110	-	2,54	1,23	2,62	-
	TEC1-12715	<i>plate</i> dan pendingin	110	-	2,34	1,5	3,5	-
	TEG-SP1848	<i>heatsink fan</i>	110	-	3	1,03	3,69	-
	TEC1-12706	Pemanas <i>hot</i>	110	-	2,77	1,06	2,94	-
	TEC1-12715	<i>plate</i> dan pendingin air	110	-	2,5	1,56	3,91	-
Hasil Penelitian	TEC 12706	Pemanas	61,25	2,467	1,78	0,21	0,374	0,0403
	TEC 12715	<i>plat heater</i> dan pendingin	61,75	3,237	2,59	0,26	0,6734	0,0524
	TEG SP1848	air <i>water</i> <i>block</i>	61,25	3,806	3,28	0,28	0,918	0,0621

#### 4. KESIMPULAN

Hasil pengujian modul *thermoelectric* tipe TEC 1206, TEC 12715, dan TEG SP 1848 27145 menggunakan pemanas *heater* dan pendingin air sistem *water block* menghasilkan keluaran listrik yang berbeda di selisih suhu yang hampir sama. Hasil menunjukkan keluaran listrik tertinggi pada selisih suhu 61-62 °C di peroleh modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 dengan daya sebesar 0,918 W, di ikuti oleh modul *thermoelectric* tipe TEC 12715 dengan daya sebesar 0,673 W, dan modul *thermoelectric* tipe TEC 12706 dengan daya sebesar 0,374 W. Hasil perbedaan keluaran listrik yang dihasilkan modul *thermoelectric* ini dapat dikaitkan dengan nilai koefisien *seebeck*, dimana semakin tinggi nilai koefisien *seebeck* maka akan menghasilkan keluaran listrik yang semakin tinggi. Hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien *seebeck* tertinggi di dapatkan pada modul *thermoelectric* tipe SP 1848 27145 sebesar 0,0621 V/K, di ikuti tipe TEC 12715 sebesar 0,0524 V/K, dan TEC 12706 sebesar 0,0403 V/K.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. E. Demir and I. Dincer, "Development of an integrated hybrid solar thermal power system with thermoelectric generator for desalination and power production," *Desalination*, vol. 404, pp. 59–71, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2016.10.016.
- [2] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, and E. Pan, "A novel gradient theory for thermoelectric material structures," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 206, pp. 292–303, 2020, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.09.023.
- [3] C. Bobean and V. Pavel, "The study and modeling of a thermoelectric generator module," *2013 - 8th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2013*, 2013, doi: 10.1109/ATEE.2013.6563498.
- [4] A. Shakouri, "Recent Developments in Semiconductor Thermoelectric Physics and Materials," 2011, doi: 10.1146/annurev-matsci-062910-100445.
- [5] L. Lin, Y. F. Zhang, H. B. Liu, J. H. Meng, W. H. Chen, and X. D. Wang, "A new configuration

- design of thermoelectric cooler driven by thermoelectric generator,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 160, no. July, p. 114087, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114087.
- [6] L. E. Bell, “Cooling, Heating, Generating Heat with and Recovering Waste Thermoelectric,” *Science (80-. )*, vol. 321, no. 5895, pp. 1457–1461, 2008.
- [7] S. M. Pourkiaei *et al.*, “Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials,” *Energy*, vol. 186, p. 115849, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.179.
- [8] F. Frobenius, G. Gaiser, U. Rusche, and B. Weller, “Thermoelectric Generators for the Integration into Automotive Exhaust Systems for Passenger Cars and Commercial Vehicles,” *J. Electron. Mater.*, vol. 45, no. 3, pp. 1433–1440, 2016, doi: 10.1007/s11664-015-4059-z.
- [9] M. T. Børset, Ø. Wilhelmsen, S. Kjelstrup, and O. S. Burheim, “Exploring the potential for waste heat recovery during metal casting with thermoelectric generators: On-site experiments and mathematical modeling,” *Energy*, vol. 118, pp. 865–875, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.109.
- [10] H. L. Wijayanto, K. W. Wirakusuma, and N. T. Atmoko, “Pengaruh Variasi Daya Pompa pada System Pendinginan TEG terhadap Tegangan yang Dihasilkan TEG,” vol. 22, no. 1, pp. 477–481, 2022, doi: 10.33087/jjubj.v22i1.2017.
- [11] A. Hakim and J. H. Lim, “The effect of temperature mismatch on interconnected thermoelectric module for power generation,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2233, no. May, 2020, doi: 10.1063/5.0001549.
- [12] “H-IZ Technology.” <https://hi-z.com/> (accessed Jun. 24, 2022).
- [13] “Komatsu.” <https://www.kelk.co.jp/english/> (accessed Jun. 24, 2022).
- [14] “Thermonamic.” <http://www.thermonamic.com/> (accessed Jun. 24, 2022).
- [15] H. Jouhara *et al.*, “Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications,” *Int. J. Thermofluids*, vol. 9, 2021, doi: 10.1016/j.ijft.2021.100063.
- [16] G. Andrapica, R. I. Mainil, and A. Aziz, “Penguujian Thermoelectric Generator Sebagai Pembangkit Listrik Dengan Sisi Dingin Menggunakan Air Bertemperatur 10 °c,” *J. Sains dan Teknol.*, vol. 14, no. 2, pp. 45–50, 2017, [Online]. Available: <https://ejournal.unri.ac.id/index.php/JST/article/view/3983/3867>.
- [17] T. W. B. Riyadi, B. R. Utomo, M. Effendy, A. T. Wijayanta, 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.
- [18] R. Merienne, J. Lynn, E. McSweeney, and S. M. O’Shaughnessy, “Thermal cycling of thermoelectric generators: The effect of heating rate,” *Appl. Energy*, vol. 237, no. November 2018, pp. 671–681, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.041.
- [19] Y. Shi, Y. Wang, D. Mei, B. Feng, and Z. Chen, “Design and Fabrication of Wearable Thermoelectric Generator Device for Heat Harvesting,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 373–378, 2018, doi: 10.1109/LRA.2017.2734241.
- [20] S. Memon and K. N. Tahir, “Experimental and analytical simulation analyses on the electrical performance of thermoelectric generator modules for direct and concentrated quartz-halogen heat harvesting,” *Energies*, vol. 11, no. 12, 2018, doi: 10.3390/en11123315.
- [21] Z. Ma, X. Wang, and A. Yang, “Influence of temperature on characters of thermoelectric generators based on test bed,” *J. Nanomater.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/719576.
- [22] M. Alagusri and D. Redantan, “Analysis of peltier characteristic and cold side treatment for thermoelectric generator module at brick kiln furnace,” *Proc. - 2018 2nd Int. Conf. Electr. Eng. Informatics Towar. Most Effic. W. Mak. Deal. with Futur. Electr. Power Syst. Big Data Anal. ICon EEI 2018*, no. October, pp. 134–139, 2018, doi: 10.1109/ICon-EEI.2018.8784141.