

## INVESTIGASI EKSPERIMENTAL PERFORMA SISTEM PENDINGIN MULTI-TERMOELEKTRIK DENGAN KONFIGURASI TERMAL SERI DAN PARALEL

Bowo Yuli Prasetyo<sup>1</sup>, Apip Badarudin<sup>1</sup>, A.P. Edi Sukamto<sup>1</sup>, Rizki Muliawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung

Email: <sup>1</sup>bowo\_yuli@polban.ac.id

### Abstrak

*Abstrak*—Termoelektrik mampu mengkonversi energi listrik menjadi energi termal. Energi termal yang dihasilkan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi yang berkaitan dengan pendinginan (TEC). Peningkatan performa TEC dipengaruhi oleh metode pelepasan kalor sisi panas, fluida kerja, serta penggunaan multi-termoelektrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh konfigurasi multi-termoelektrik terhadap karakteristik pendinginan yang dihasilkan. Pengujian dilakukan terhadap perangkat dengan dua modul TEC yang disusun secara seri dan paralel yang divariasikan tegangan input, laju aliran massa, dan temperatur fluida kerjanya. Hasil eksperimen menunjukkan perbedaan karakteristik pendinginan kedua perangkat. TEC yang disusun paralel menghasilkan kapasitas pendinginan tertinggi dengan nilai 66.62 W, yakni 100% lebih besar daripada TEC dengan konfigurasi seri. Sedangkan TEC dengan konfigurasi seri menghasilkan beda temperatur tertinggi yakni 11.03 K, selisih 2% dibandingkan konfigurasi paralel. Performa pendinginan tertinggi dihasilkan oleh konfigurasi paralel dengan nilai 2.57, 147% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi seri.

**Kata Kunci:** multi-termoelektrik, TEC, performa, seri, paralel

### Abstract

*Thermoelectrics can convert electrical energy to thermal energy. The generated thermal energy can be used in various cooling systems (TEC) applications. Improvement of TEC performance influenced by hot-side heat dissipation method, working fluid, and multi-thermoelectric. This study aims to investigate the relation between multi-thermoelectric configuration and the cooling behaviors. The experiment was conducted on the devices equipped with two modules of TEC arranged in series and parallel with variations of input voltage, working fluid mass flow, and temperature. The result reveals variations in cooling behaviors between the two configurations. Parallel configuration TEC gives the highest cooling capacity with a value of 66.62 W, 100% bigger than the series configuration. Meanwhile, the series configuration provides a delta temperature of 11.03 K, 2% higher than the parallel one. The parallel modules cooling performance is the biggest among the two arrangement, with a value of 2.57, which is 147% higher than series one.*

**Keywords:** multi-thermoelectric, TEC, performance, series, parallel

## I. PENDAHULUAN

Termoelektrik adalah sebuah komponen elektronika yang mampu mengonversi energi listrik menjadi energi termal dan sebaliknya. Dengan kemampuannya tersebut, komponen ini dikenal dengan dua nama berbeda, *thermoelectric generator* (TEG) dan *thermoelectric cooling* (TEC). Pada TEC berlaku efek *peltier* yang dapat mengubah beda potensial dari sumber tegangan menjadi beda

temperatur di antara kedua sisi termoelektrik (Lee, 2017; Pourkiaei, et al., 2019). Beda temperatur yang terjadi memungkinkan kalor dipindahkan dari satu sisi ke sisi lainnya. Sementara TEG mampu menghasilkan energi listrik melalui perbedaan temperatur yang terjadi di kedua sisi termoelektrik, yang dikenal dengan efek *seebeck* (Lee, 2017; Pourkiaei, et al., 2019).

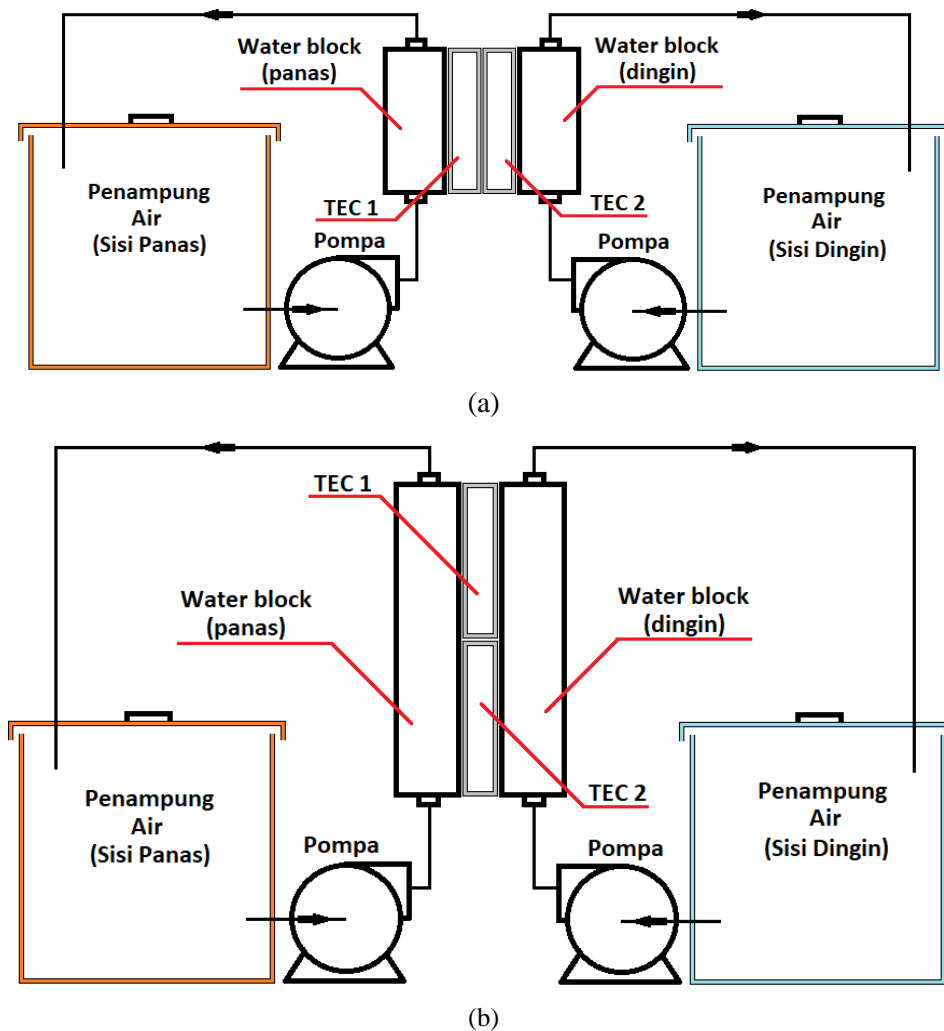
TEC memiliki banyak kelebihan sebagai sebuah sistem pendingin, antara lain: ukuran dan bentuk yang ringkas; operasi yang senyap; tidak membutuhkan perawatan karena tidak ada bagian yang bergerak; ramah lingkungan karena tidak menggunakan refrigeran; dapat dengan mudah berganti fungsi antara pompa kalor dan pendingin; serta kemudahan pengintegrasian dengan energi terbarukan seperti panel surya (Liu & Su, 2018; Garayo, Martinez, Aranguren, & Astrain, 2021; Shen, et al., 2020; Calm, 2002).

Pemanfaatan TEC sebagai sistem pendingin telah dikemukakan oleh peneliti sebagai pengkondisi udara untuk kenyamanan penghuni (Irshad, et al., 2019). Selain itu TEC juga dapat diintegrasikan dengan *heat recovery ventilation* dengan tujuan meningkatkan performa (COP) pendinginan maupun pemanasan secara keseluruhan (Garayo, Martinez, Aranguren, & Astrain, 2021). Peneliti lain juga melaporkan pemanfaatan energi termal yang dihasilkan TEC sebagai kulkas penyimpan bahan makanan dengan temperatur penyimpanan  $-0.1^{\circ}\text{C}$

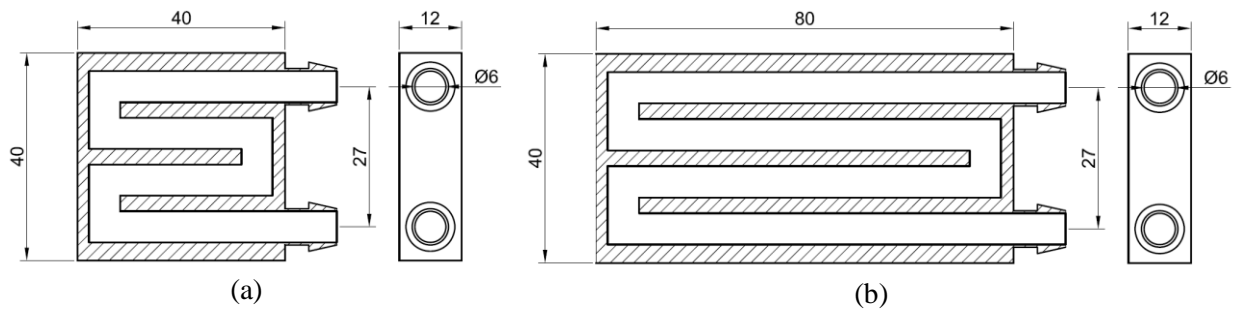
(Gokcek & Sahin, 2017). Memanfaatkan ukurannya yang ringkas, TEC juga dapat digunakan sebagai pendingin prosesor pada CPU (Hu, Ge, Dai, & Wang, 2016). Melalui aplikasi tersebut didapatkan performa pendinginan yang jauh lebih unggul dibandingkan pendingin CPU konvensional.

Mengetahui kelebihan-kelebihan yang dimiliki, TEC berpotensi besar dikomersialkan sebagai sebuah sistem pendingin. Namun dibalik semua kelebihannya, TEC masih terbentur dengan performa yang rendah dibandingkan sistem kompresi uap (Liu & Su, 2018) (Garayo, Martinez, Aranguren, & Astrain, 2021) (Pourkiaei, et al., 2019). Oleh karena itu dibutuhkan upaya untuk meningkatkan performa TEC.

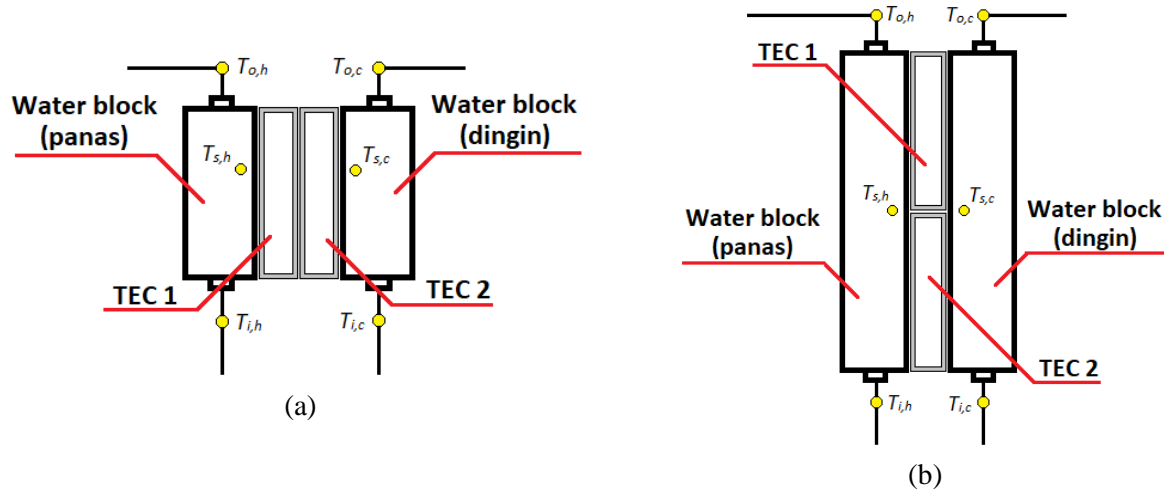
Upaya peningkatan performa TEC secara ekstensif telah dikemukakan oleh para peneliti, salah satunya yakni dengan memperlancar pelepasan kalor pada sisi panas TEC (Liu & Su, 2018). Pelepasan kalor yang baik pada sisi panas TEC terbukti mampu memberikan dampak yang signifikan terhadap performa pendinginan. Selain



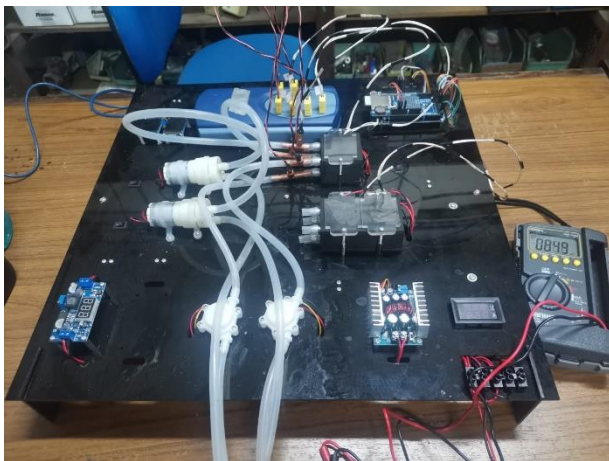
Gambar 1. Ilustrasi perangkat pengujian (a) konfigurasi seri (b) konfigurasi paralel



Gambar 2. Spesifikasi *water block* (a) perangkat 1 (b) perangkat 2



Gambar 3. Penempatan titik ukur temperatur (a) perangkat 1 (b) perangkat 2



Gambar 4. Perangkat pengujian

itu, jenis fluida kerja yang digunakan juga memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap performa TEC (Wiriyasart, Suksuron, Hommalee, Siricharoenpanich, & Naphon, 2021; Prasetyo, Ayu, & Wang, 2022). Beberapa peneliti juga mengemukakan pemanfaatan multi-termoelektrik terbukti mampu meningkatkan performa dan beda temperatur yang mampu dihasilkan oleh TEC dibandingkan dengan termoelektrik tunggal (Shen, et al., 2020; Dizaji, Jafarmadar, & Khalilarya, 2019).

Berdasarkan tinjauan literatur diatas, TEC telah digunakan pada berbagai macam aplikasi yang

berkaitan dengan pendinginan. Sebagian besar peneliti berfokus pada pemanfaatan yang lebih luas serta peningkatan performa pendinginan. Sejauh ini telah diketahui peningkatan performa TEC bergantung pada metode pelepasan kalor sisi panas, fluida kerja, serta penggunaan multi-termoelektrik. Namun belum ada studi yang melaporkan pengaruh perbedaan konfigurasi termal pada sistem multi-termoelektrik. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikaji pengaruh konfigurasi termal seri dan paralel terhadap karakteristik pendinginan yang dihasilkan oleh multi-termoelektrik.

## II. METODE

### Perangkat Pengujian

Ilustrasi perangkat pengujian dapat dilihat pada Gambar 1. Eksperimen dilakukan terhadap dua perangkat yang masing-masing ditenagai dua buah modul termoelektrik. Pada kedua perangkat diberikan konfigurasi modul termoelektrik yang berbeda. Modul termoelektrik disusun secara bertahap (seri) pada perangkat 1 (Gambar 1a), sehingga kalor yang diserap di sisi dingin akan melewati 2 modul hingga sampai di sisi panas. Sedangkan pada perangkat 2, modul termoelektrik

Tabel 1. Spesifikasi termoelektrik

| Deskripsi                    | Keterangan |
|------------------------------|------------|
| Model                        | TEC 12706  |
| Arus maksimal (A)            | 6          |
| Tegangan kerja maksimal (V)  | 15.2       |
| $Q_c$ maksimal (W)           | 57         |
| $\Delta T_{hc}$ maksimal (K) | 75         |

Tabel 2. Variabel uji

| Deskripsi                 | Nilai |     |     |
|---------------------------|-------|-----|-----|
| Tegangan TEC (V)          | 6     | 8   | 10  |
| Debit air (l/m)           | 0.3   | 0.5 | 0.7 |
| Temperatur air masuk (°C) | 25    | 30  | 35  |

Tabel 3. Spesifikasi alat ukur

| Nama                  | Tipe    | Resolusi             | Akurasi              |
|-----------------------|---------|----------------------|----------------------|
| 8-channel Data-Logger | TC-08   | 0.01°C               | ±0.5°C               |
| Multimeter            | CD732   | 0.01 dcV<br>0.01 dcA | ±0.9% dcV<br>±2% dcA |
| Flowmeter             | YF-S401 | 0.01 l/m             | ±5%                  |

disusun bersebelahan (paralel) seperti yang tampak pada Gambar 1b.

Secara kelistrikan, modul termoelektrik pada kedua perangkat disusun secara paralel untuk memastikan setiap modul dapat bekerja secara maksimal tanpa saling mempengaruhi. Catu daya dengan jenis non-linier digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik ke seluruh sistem. Sementara variasi kapasitas termoelektrik dilakukan dengan mengubah besar tegangan masukan.

Termoelektrik yang digunakan dalam pengujian memiliki dimensi panjang dan lebar sebesar 4cm x 4cm dengan spesifikasi lengkap tertera pada Tabel 1. Kedua sisi modul termoelektrik dipasangkan dengan *water block* sebagai sarana pertukaran kalor yang memanfaatkan air sebagai fluida kerja. Ukuran *water block* disesuaikan dengan konfigurasi modul termoelektrik, dengan demikian perangkat 1 memiliki dimensi *water block* yang lebih kecil dibandingkan dengan perangkat 2, namun kedua *water block* memiliki bentuk saluran yang sama seperti yang tampak pada Gambar 2. Air sebagai fluida kerja disirkulasikan dengan stabil dari dan menuju *water block* menggunakan pompa dc.

### Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengkondisikan variabel tak bebas yakni debit dan temperatur air

terhadap variasi kapasitas termoelektrik. Besar variabel yang diatur secara lengkap tertera pada Tabel 2. Variasi debit air dilakukan dengan mengatur tegangan kerja pompa dc. Perubahan debit air diukur dengan *flowmeter* dan disesuaikan dengan variabel uji yang telah ditetapkan. Sementara pada pengaturan temperatur air masuk digunakan elemen pemanas elektrik.

Enam titik ukur ditempatkan pada masing-masing perangkat untuk melihat perubahan temperatur yang terjadi selama pengujian. Gambar 3 memperlihatkan lokasi seluruh titik ukur temperatur. Pengukuran dilakukan setiap detik hingga tidak terjadi perubahan atau stabil. Data temperatur dan arus yang diperoleh kemudian dijadikan tolak ukur untuk mengetahui besar karakteristik pendinginan yang dihasilkan kedua perangkat. Karakteristik yang dibandingkan meliputi unjuk kerja (COP), kapasitas pendinginan ( $Q_c$ ), dan selisih temperatur pada kedua sisi termoelektrik ( $\Delta T_{hc}$ ). Spesifikasi alat ukur yang digunakan dalam pengujian tertera pada Tabel 3. Gambar 4 menampilkan perangkat pengujian yang telah dirakit lengkap dengan instrumen pengukurannya.

### Metode Perhitungan

$Q_c$  diperoleh melalui persamaan (1) dan (2):

$$Q_c = \dot{m} \times c_p \times (T_{i,c} - T_{o,c}) \quad (1)$$

$$\dot{m} = \dot{v} \times \rho \quad (2)$$

$\Delta T_{hc}$  merupakan temperatur selisih kedua sisi termoelektrik (3):

$$\Delta T_{hc} = T_{s,h} - T_{s,c} \quad (3)$$

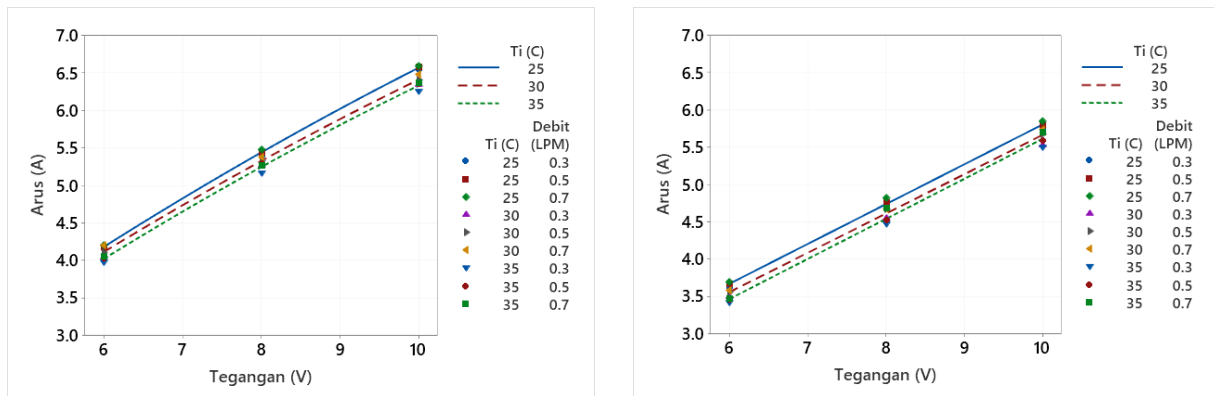
COP diperoleh melalui persamaan (4) dan (5):

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (4)$$

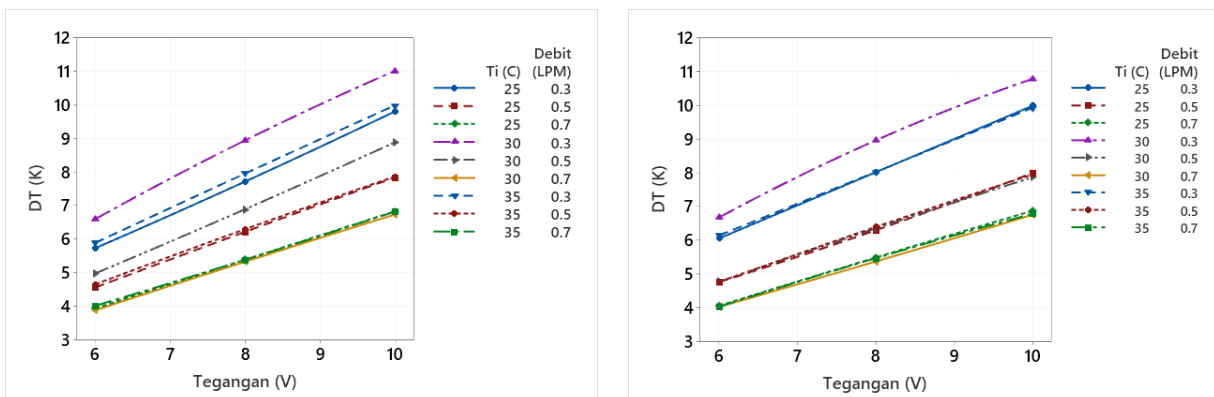
$$P = V \times I \quad (5)$$

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian telah dilakukan terhadap kedua perangkat dan diperoleh total 54 set data. Gambar 5 memperlihatkan kurva arus terhadap tegangan pada setiap variabel uji. Variasi tegangan menghasilkan perbedaan nilai arus yang signifikan. Tentunya semakin besar tegangan yang diberikan ke modul TEC maka semakin tinggi pula nilainya.



Gambar 5. Kurva arus terhadap tegangan (a) perangkat 1 (b) perangkat 2



Gambar 6. Kurva  $\Delta T_{hc}$  terhadap tegangan (a) perangkat 1 (b) perangkat 2

Karena TEC merupakan komponen elektronika yang bekerja pada arus searah dan pada rangkaian arus searah berlaku hukum ohm. Yakni ketika besar resistansi komponen tetap, apabila tegangan dinaikkan maka arus juga akan mengalami kenaikan dan sebaliknya.

Namun tidak berhenti disitu saja, karena ternyata temperatur air masuk ( $T_i$ ) juga memberikan pengaruh terhadap variasi nilai arus yang terukur. Pernambahan nilai arus berbanding terbalik terhadap nilai temperatur ( $T_i$ ). Pada kondisi  $T_i$  35°C, arus yang mengalir ke TEC relatif lebih rendah dibandingkan ketika  $T_i$  berada pada nilai 25°C. Rata-rata penurunan nilai arus yang diperoleh sebesar 1.9% dan 2.3% untuk masing-masing konfigurasi seri dan paralel pada setiap kenaikan 5°C  $T_i$ . Perbedaan konfigurasi modul TEC juga memberikan dampak pada besar arus yang terukur. Konfigurasi seri menghasilkan nilai arus yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan paralel. Nilai arus yang tinggi pada kondisi tegangan yang sama mengindikasikan konsumsi energi ( $P$ ) yang lebih besar. Rata-rata perbedaan nilai arus pada kedua perangkat pengujian mencapai 12.7%.

Gambar 6 menampilkan kurva  $\Delta T_{hc}$  terhadap tegangan pada kondisi pengujian yang berbeda-beda.  $\Delta T_{hc}$  dapat diartikan sebagai kemampuan modul TEC menghasilkan beda temperatur di kedua sisinya. Ketika kondisi temperatur sisi panas diatur pada nilai yang konstan, nilai  $\Delta T_{hc}$  akan mendefinisikan besar temperatur pada sisi dingin ( $T_{s,c}$ ). Pada akhirnya nilai ini akan menentukan besar target temperatur pendinginan yang dapat dicapai oleh TEC.

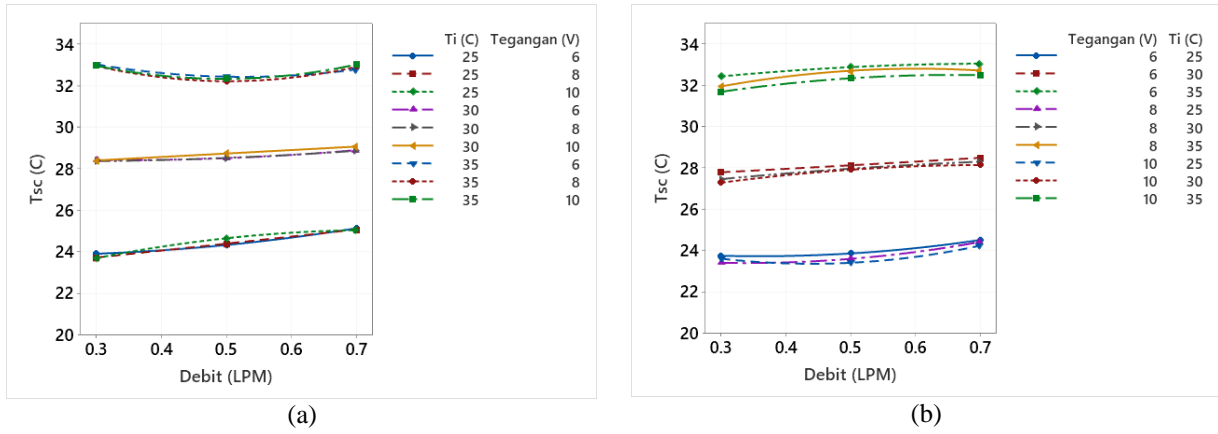
Dari kurva tersebut, tampak tidak ada perbedaan nilai  $\Delta T_{hc}$  yang signifikan diantara kedua perangkat pengujian. Nilai  $\Delta T_{hc}$  tertinggi tercatat sebesar 11.08 K yang dicapai oleh perangkat 1. Sementara perangkat 2 menghasilkan nilai  $\Delta T_{hc}$  sebesar 10.8, terpaut 2% dari konfigurasi seri pada kondisi yang sama.

Gambar 7 menunjukkan kurva  $T_{s,c}$  terhadap perubahan debit air pada setiap kasus pengujian. Debit air yang semakin besar memberikan pengaruh terhadap kenaikan nilai  $T_{s,c}$ , namun perubahan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Rata-rata kenaikan temperatur permukaan yang terjadi hanya sebesar 1.19% pada perangkat 1 dan 1.42% pada perangkat

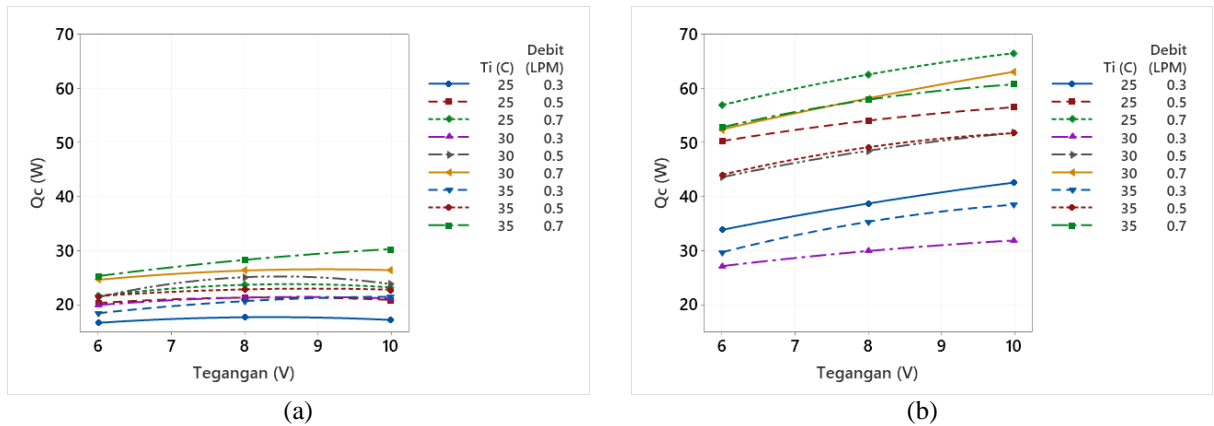
2 untuk setiap peningkatan 0.2 l/m debit air. Variasi tegangan kerja juga memberikan dampak yang tidak signifikan terhadap nilai  $T_{s,c}$ . Namun di lain sisi, variasi  $T_i$  memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai  $T_{s,c}$ . Rata-rata kenaikan temperatur ( $T_i$ ) sebesar  $5^{\circ}\text{C}$  menghasilkan peningkatan  $T_{s,c}$  sebesar 15.8% dan 16.7% untuk perangkat 1 dan perangkat 2.

Nilai temperatur permukaan ( $T_s$ ) yang dihasilkan oleh TEC merupakan hasil kesetimbangan antara

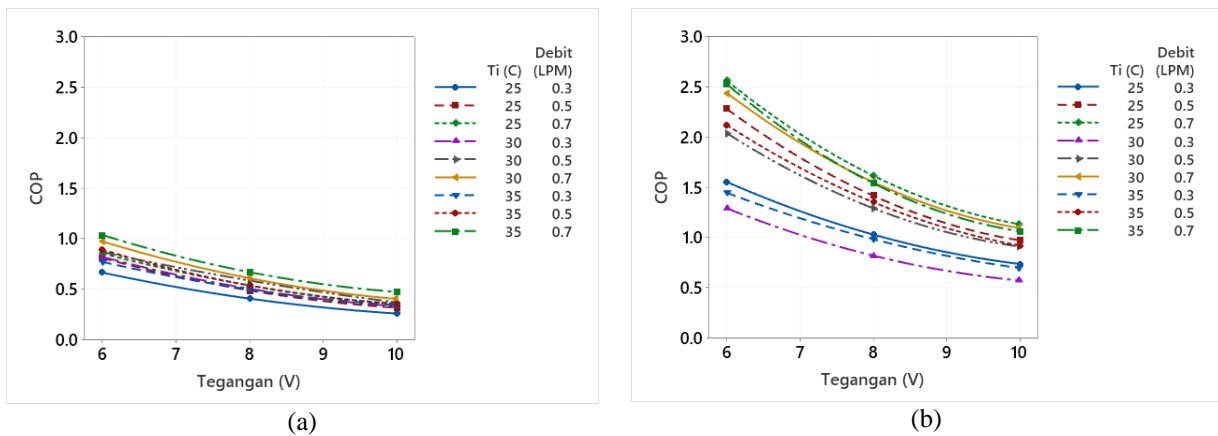
temperatur permukaan TEC sendiri dan temperatur fluida kerja, karena transfer kalor antara beban dan modul TEC terjadi secara sensibel (Prasetyo, Ayu, & Wang, 2022). Dengan demikian pada fluida kerja yang memiliki nilai kalor spesifik yang cukup besar, faktor durasi kerja sistem akan memberikan dampak yang signifikan terhadap besaran  $T_{s,c}$  dan  $\Delta T_{hc}$  yang mampu dicapai oleh TEC.



Gambar 7. Kurva  $T_{sc}$  terhadap debit (a) perangkat 1 (b) perangkat 2



Gambar 8. Kurva  $Q_c$  terhadap tegangan (a) perangkat 1 (b) perangkat 2



Gambar 9. Kurva COP terhadap tegangan (a) perangkat 1 (b) perangkat 2

$Q_c$  adalah besar kalor yang dapat diambil oleh sisi dingin TEC dari fluida kerja, ditinjau dari perubahan temperatur yang terjadi pada fluida kerja. Gambar 8 menunjukkan kurva  $Q_c$  terhadap tegangan kerja yang diperoleh pada setiap kasus pengujian. Penambahan suplai tegangan kerja memberikan dampak positif terhadap kenaikan nilai  $Q_c$ . Pertambahan  $Q_c$  yang diperoleh untuk setiap peningkatan 2V tegangan kerja secara berurutan sebesar 4.65% dan 10.51% untuk masing-masing perangkat 1 dan 2.

Variasi nilai debit juga memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap  $Q_c$ . Sesuai dengan persamaan (1) dan (2), peningkatan nilai  $Q_c$  berbanding lurus terhadap laju aliran fluida kerja. Pada perangkat 1 setiap penambahan 0.2 l/m air menghasilkan rata-rata kenaikan  $Q_c$  sebesar 14.9%. sementara pada perangkat 2 dengan kondisi yang sama diperoleh rata-rata peningkatan sebesar 32.8%.

Sejalan dengan temuan tersebut, hasil pengujian terhadap kedua perangkat menunjukkan karakteristik  $Q_c$  yang berbeda. Perangkat 2 dengan konfigurasi paralel menghasilkan  $Q_c$  yang jauh lebih besar dibandingkan perangkat 1. Hal ini dipengaruhi oleh area penyerapan kalor pada perangkat 2 yang lebih luas daripada perangkat 1. Dibandingkan dengan konfigurasi seri, modul TEC yang disusun secara paralel membutuhkan ukuran *water block* yang lebih besar untuk menutupi seluruh area termoelektrik. Hal ini tentu berdampak pada waktu yang ditempuh air untuk melewati lintasan yang ada di dalam *water block*. Semakin besar ukuran *water block* maka akan semakin lama air bersirkulasi di dalamnya. Dengan demikian pertukaran panas antara TEC dan air dapat terjadi lebih lama, atau dengan kata lain dapat lebih dimaksimalkan. Nilai  $Q_c$  tertinggi yang dapat diperoleh yakni sebesar 66.62 W pada perangkat 2. Sementara pada perangkat 1 dihasilkan  $Q_c$  maksimal sebesar 30.32 W, atau 50% lebih rendah.

Performa pendinginan / unjuk kerja yang mampu dihasilkan oleh modul TEC untuk setiap daya input yang diberikan dinotasikan dalam COP. Melalui kurva COP terhadap tegangan yang ditampilkan pada Gambar 9, diperoleh hasil penurunan COP yang cukup signifikan terhadap pertambahan nilai tegangan di kedua perangkat. Hal ini sesuai dengan pembasahan sebelumnya, yakni nilai  $Q_c$  dan arus yang ikut bertambah seiring peningkatan tegangan kerja. Namun peningkatan  $Q_c$  yang mampu dihasilkan oleh modul TEC tidak sebanding dengan peningkatan nilai arus. Rata-rata nilai COP perangkat 1 menurun sebesar 35.4% untuk setiap peningkatan 2V tegangan kerja. sementara pada perangkat 2 terjadi rata-rata

penurunan COP sebesar 33.1% dengan kasus yang sama.

COP tertinggi mampu dihasilkan oleh perangkat 2 dengan nilai 2.57 pada kondisi tegangan kerja 6V. Sedangkan pada perangkat 1 diperoleh nilai COP tertinggi sebesar 1.04 dengan kondisi yang sama. Sementara COP terendah dihasilkan oleh perangkat 1 dan 2 sebesar 0.26 dan 0.58 secara berurutan, pada tegangan kerja 10V.

#### IV. PENUTUP

##### Kesimpulan

Investigasi aplikasi multi-TEC melalui dua konfigurasi yang berbeda telah dilakukan dan diperoleh temuan-temuan yang memberikan gambaran baru. Pemanfaatan konfigurasi paralel memberikan peningkatan efek pendinginan ( $Q_c$ ) 100% dibanding konfigurasi seri. Sedangkan  $\Delta T_{hc}$  tertinggi sebesar 11.03 K dihasilkan oleh konfigurasi seri, hanya selisih 2% dibanding konfigurasi paralel. Unjuk kerja tertinggi mampu dicapai oleh konfigurasi paralel dengan nilai 2.57, 147% lebih tinggi daripada konfigurasi seri.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa pada aplikasi multi-TEC dengan fluida kerja berupa air, modul yang disusun secara paralel memberikan karakteristik pendinginan yang lebih baik daripada susun seri secara keseluruhan.

##### Saran

Penelitian lebih lanjut tentu diperlukan untuk mengevaluasi karakteristik pendinginan yang dapat dihasilkan melalui pemanfaatan multi-TEC dengan sarana penukar kalor maupun jenis fluida kerja yang berbeda.

##### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya atas dukungan finansial dari DIPA Politeknik Negeri Bandung dengan hibah no. B/114.105/PL1.R7/PG.00.03/2022

#### V. DAFTAR PUSTAKA

- Calm, J. M. (2002). Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 293-305.
- Dizaji, H. S., Jafarmadar, S., & Khalilarya, S. (2019). Novel experiments on COP improvement of thermoelectric air coolers. *Energy Conversion and Management*, 187, 328-338.
- Garayo, S. D., Martinez, A., Aranguren, P., & Astrain, D. (2021). Prototype of an air to air thermoelectric heat

- pump integrated with a double flux mechanical ventilation system for passive houses. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116801.
- Gokcek, M., & Sahin, F. (2017). Experimental performance investigation of minichannel water cooled-thermoelectric refrigerator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 54-62.
- Hu, H. M., Ge, T. Y., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2016). Experimental study on water-cooled thermoelectric cooler for CPU under severe environment. *International Journal of Refrigeration*, 62, 30-38.
- Irshad, K., Algarni, S., Ahmad, M. T., Irfan, S. A., Habib, K., Abdelmohimen, M. A., . . . Ahmed, G. M. (2019). Microclimate Thermal Management Using Thermoelectric Air-Cooling Duct System Operated at Five Incremental Powers and its Effect on Sleep Adaptation of the Occupants. *Energies*, 12(19), 3695.
- Lee, H. (2017). *Thermoelectrics: Design and Materials*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd.
- Liu, Y., & Su, Y. (2018). Experimental investigations on COPs of thermoelectric module frosting systems with various hot side cooling methods. *Applied Thermal Engineering*, 144, 747-756.
- Pourkiaei, S. M., Ahmadi, M. H., Sadeghzadeh, M., Moosavi, S., Pourfayaz, F., Chen, L., . . . Kumar, R. (2019). Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy*, 186, 115849.
- Prasetyo, B. Y., Ayu, W. S., & Wang, F. (2022). Performance evaluation of thermoelectric cooling with two different fluid medium. *International Journal of Applied Technology Research*, 11-21.
- Shen, L., Zhang, W., Liu, G., Tu, Z., Lu, Q., & Chen, H. (2020). Performance enhancement investigation of thermoelectric cooler with segmented configuration. *Applied Thermal Engineering*, 168, 114852.
- Wiriyasart, S., Suksuron, P., Hommalee, G., Siricharoenpanich, A., & Naphon, P. (2021). Heat transfer enhancement of thermoelectric cooling module with nanofluid and ferrofluid as base fluids. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 100877.