

POTENSI PERFORMA PENDINGINAN MODUL TERMoeLEKTRIK TEC1-12710 DAN TEC1-12715 SR DENGAN METODA OPTIMASI PENDINGINAN SISI PANAS MENGGUNAKAN BEBERAPA JENIS PENUKAR KALOR

COOLING PERFORMANCE POTENTIAL OF TEC1-12710 AND TEC1-12715 SR THERMOELECTRIC MODULES WITH HOT SIDE COOLING OPTIMIZATION METHODS USING SEVERAL TYPES OF HEAT EXCHANGERS

Annisa Syafitri Kurniasetiawati^{1)*}, Bowo Yuli Prasetyo¹⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kab. Bandung 40559, Indonesia
email corresponding: annisa.syafitrik@polban.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Diperbaiki:
Revised
13/10/2024

Diterima:
Accepted
08/11/2024

Publikasi Online:
Online-Published
30/11/2024

ABSTRAK

Dibandingkan teknologi pendingin yang saat ini umum digunakan (teknologi kompresor dengan sistem kompresi uap), modul termoelektrik memiliki banyak kelebihan. Namun, dari segi performa pendinginan seperti COP (Coefficient of Performance) dan q_c (kapasitas penyerapan kalor atau pendinginan), khususnya untuk aplikasi pada skala pendinginan besar (>100Watt), kinerja modul termoelektrik masih tertinggal. Salah satu metoda yang dapat digunakan untuk meningkatkan performa pendinginan modul termoelektrik, yaitu pendinginan sisi panas modul dengan menggunakan penukar kalor. Studi ini bertujuan untuk melihat pengaruh metode pendinginan sisi panas dengan beberapa tipe penukar kalor terhadap kinerja sistem termoelektrik pada kapasitas rating arus 10A dan 15A. Percobaan dilakukan terhadap modul TEC1-12710 dan TEC1-12715 SR dikombinasikan bergantian dengan lima tipe penukar kalor pada sisi panas modul yang dikombinasikan oleh pasta termal antar permukaannya. Tipe penukar kalor yang digunakan, yaitu Square HE, Round HE, Two-Pipe HE, Four-Pipe HE, dan Liquid-Cooler HE. Percobaan dilakukan dengan variasi pengoperasian tegangan 12V, 9V, dan 6V untuk setiap modul termoelektrik. Hasil analisis data menghasilkan temuan, yaitu nilai COP terbaik didapatkan oleh modul termoelektrik tipe TEC1-12715 SR dengan penukar kalor tipe Round HE sebesar 0,767 pada tegangan 6V. Pada modul termoelektrik tipe TEC1-12710 nilai COP terbesar juga didapatkan saat modul dipasangkan dengan penukar kalor tipe Round HE pada tegangan 6V, yaitu sebesar 0,620. Adapun nilai penyerapan kalor terbesar pada kedua modul termoelektrik didapatkan pada tegangan 12V dengan menggunakan penukar kalor tipe Round HE, masing-masing sebesar 19,61Watt (TEC1-12710) dan 26,98 Watt (TEC1-12715 SR).

Kata Kunci: Termoelektrik, Penukar Kalor, COP, Optimasi, Pendinginan Sisi Panas

ABSTRACT

Compared to the commonly used cooling technology (compressor technology with a vapor compression system), thermoelectric modules offer many advantages. However, in terms of cooling performance such as COP (Coefficient of Performance) and q_c (heat absorption or cooling capacity), especially for large-scale cooling applications (>100 Watts), the performance of thermoelectric modules still lags. One method that can be used to improve the cooling performance of thermoelectric modules is cooling the hot side of the module using a heat exchanger. This study aims to examine the effect of hot-side cooling methods using several types of heat exchangers on the performance of thermoelectric systems at current ratings of 10A and 15A.

Experiments were conducted on TEC1-12710 and TEC1-12715 SR modules, alternately combined with five types of heat exchangers on the hot side of the module, with thermal paste applied between the surfaces. The types of heat exchangers used are Square HE, Round HE, Two-Pipe HE, Four-Pipe HE, and Liquid-Cooler HE. The experiments are carried out with operating voltage variations of 12V, 9V and 6V for each thermoelectric module. The data analysis results found that the best COP value was obtained by the TEC1-12715 SR thermoelectric module with the Round HE of 0,767 at a voltage of 6V. For the TEC1-12710 thermoelectric module, the highest COP value was also obtained when the module was paired with a Round HE at a voltage of 6V, with a value of 0,620. Additionally, the highest heat absorption value for both thermoelectric modules was obtained at a voltage of 12V using the Round HE, namely 19,61 Watts (TEC1-12710) and 26,98 Watts (TEC1-12715 SR), respectively.

©2024 The Authors. Published by
AUSTENIT (Indexed in SINTA)

doi:

[10.53893/austenit.v16i2.9470](https://doi.org/10.53893/austenit.v16i2.9470)

Keywords: Thermoelectric, Heat Exchanger, COP, Optimization, Hot-Side Cooling

1 PENDAHULUAN

Salah satu jenis aplikasi sistem pendinginan yang paling banyak digunakan adalah sistem refrigerasi uap terkompresi dengan memanfaatkan sifat refrigeran yang memiliki titik didih yang rendah. Namun, refrigeran yang digunakan pada umumnya merupakan senyawa yang memiliki dampak terhadap pemanasan global, dan biasa dinyatakan dalam *Global Warming Potential* (GWP). Setiap gas mempunyai potensi pemanasan global (GWP) tertentu yang memungkinkan perbandingan jumlah energi yang akan diserap oleh 1 ton gas dalam jangka waktu tertentu, biasanya dalam waktu rata-rata 100 tahun, dibandingkan dengan emisi sebesar 1 ton gas CO₂ (Mainil et al., 2018; Prasetyo et al., 2024).

Selain dari efek rumah kaca, sistem pendingin tradisional yang mengandalkan kompresor memiliki beberapa kelemahan lain seperti konsumsi energi yang intens, biaya pemeliharaan (Mainil et al., 2018), bising, dan membutuhkan volume ruang yang kurang fleksibel untuk penempatannya. Oleh karena itu, pengembangan berbagai sistem pendinginan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan efisien perlu terus dilakukan. Pendingin termoelektrik telah banyak digunakan dalam pendinginan skala kecil (lemari es termoelektrik kecil dengan kapasitas pendinginan <100W) dan pendinginan *hot-spot* (pendinginan laser/LED lebih kecil dari 10W). Namun, sistem ini masih termasuk sulit diterapkan pada sistem pendingin skala besar karena efisiensinya yang rendah (Tang et al., 2023), khususnya ditinjau dari segi performa pendinginan atau jumlah panas yang dapat diserap oleh sisi dingin modul (q_c) dan perbandingan antara jumlah panas diserap sisi dingin terhadap konsumsi daya modul dimana dalam sistem pendingin dikenal sebagai COP (*Coefficient of Performance*).

Modul termoelektrik memiliki karakteristik yang dikenal sebagai efek *seebeck* dan efek *peltier*.

Efek *seebeck* merupakan kemampuan modul termoelektrik untuk menghasilkan listrik dari perbedaan temperatur antara sisi dingin dan panas modul, sedangkan efek *peltier* merupakan kemampuan modul untuk mentransferkan panas dari sisi dingin modul (menyerap kalor) ke sisi panas modul (melepas panas). Selain telah terbukti dapat diaplikasikan dalam sistem pendinginan, kemampuan modul termoelektrik dalam mentransferkan panas masih perlu dikaji karena efisiensi pendinginannya masih lebih rendah dibandingkan sistem refrigerasi kompresi uap dan belum ekonomis dari segi kebutuhan material terutama untuk pemanfaatan pada skala industri komersil.

Modul termoelektrik didesain dalam dua fungsi utama, yaitu fungsi sebagai penghasil listrik dikenal sebagai modul TEG (*Thermoelectric Generator*), dan fungsi sebagai pendingin dikenal sebagai modul TEC (*Thermoelectric Cooler*) (Firmansah et al., 2023; Rahmawaty et al., 2024). Fungsi dari kedua modul ini berbeda khususnya disebabkan dari perbedaan karakteristik rentang temperatur. Modul TEC bekerja lebih efektif pada suhu ruangan, sedangkan modul TEG pada suhu yang lebih tinggi. Pengamatan efek *peltier* untuk pengaplikasian pada sistem pendinginan menggunakan modul TEC telah diamati melalui beberapa studi, salah satunya dilakukan Pratama & Saraswati (2023) dengan modul TEC-12706 didapatkan temperatur sisi dingin sebesar 12,3°C (dengan arus konstan 1A) dan 10,5°C (dengan arus konstan 2A). Pada studi yang dilakukan Prasetyo, et al (2024) pada modul *peltier* TEC-12706 dengan mengombinasikan lima jenis alat penukar kalor pada sisi panas modul dan variasi suplai tegangan (12V, 9V, 6V) didapatkan temperatur sisi dingin yang dapat mencapai -9,56°C pada tegangan 12V.

Investigasi terkait peningkatan kinerja termoelektrik telah dilakukan pada beberapa penelitian sebelumnya. Pemanfaatan media air sebagai pendingin sisi panas dapat menghasilkan

COP tertinggi sebesar 0,41 pada aplikasi refrigerasi dengan temperatur kabin terendah mencapai $-0,1^{\circ}\text{C}$ (Prasetyo et al., 2024). Salah satu penelitian lainnya menyebutkan variasi konfigurasi pada sistem dengan multi-termoelektrik berpengaruh terhadap perilaku termal yang dihasilkan oleh termoelektrik. Termoelektrik yang disusun secara paralel cenderung menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih tinggi dibanding seri, namun dengan beda temperatur yang lebih rendah. Dengan demikian konfigurasi termoelektrik dapat disesuaikan dengan kebutuhan pendinginan (Prasetyo et al., 2022). Studi lain terkait penukar kalor jenis pipa panas menyebutkan fluida kerja yang berbeda memberikan dampak yang signifikan terhadap transfer kalor yang dihasilkan. Sementara studi lainnya menyebutkan pemanfaatan *heat pipe* yang dilengkapi dengan kipas meningkatkan laju alir untuk udara dan berdampak pada perpindahan panas (Shabgard et al., 2015; Srimuang & Amatachaya, 2012).

Beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja sistem pendingin termoelektrik diantaranya: konfigurasi perangkat bahan termoelektrik dan metode pendinginan sisi panas (Pratama & Saraswati, 2023; Tang et al., 2023). Metode pendinginan sisi panas berfokus pada penghilangan kalor dari sisi panas perangkat termoelektrik, yang meningkatkan perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin. Cara ini dapat meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi kemampuan kalor untuk menyebar kembali ke sisi dingin (Kuang et al., 2021; Faraz Ahmad et al., 2022; Demeke et al., 2024).

Secara umum, metode pendinginan sisi panas termoelektrik mengadopsi sistem pendingin, seperti pendingin udara dan cairan untuk perangkat elektronik (Bamroongkhan et al., 2021). Perangkat penukar panas (*Heat Exchanger / HE*) yang umum digunakan meliputi *heatsink*, *heat pipe*, dan *water block* (Putra et al., 2011; Prasetyo et al., 2022). Pada studi eksperimental yang dilakukan Yuli Prasetyo et al., (2024) menggunakan TEC1-12706 (rating arus 6A) dengan lima jenis penukar kalor yang digunakan untuk mendinginkan sisi panas modul termoelektrik (unit penukar kalor tipe *Square HE*, *Round HE*, *Two-Pipe HE*, *Four-Pipe HE*, dan *Liquid-Cooler HE*) didapatkan bahwa jenis penukar kalor dapat mempengaruhi kinerja sistem pendinginan (COP).

Sehubungan dengan studi Yuli Prasetyo et al., (2024) studi ini bertujuan untuk melihat lebih lanjut pengaruh metode pendinginan sisi panas dengan penukar kalor sejenis terhadap kinerja sistem termoelektrik pada kapasitas rating arus 10A dan 15A dengan tiga variasi tegangan terhadap tingkat efektifitas dari segi T_c , COP dan q_c . Pencapaian tujuan ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi pendinginan yang ramah lingkungan serta efisien

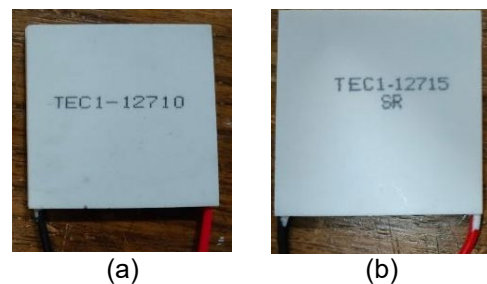
(COP yang mendekati sistem refrigerasi uap terkompresi). Adapun, secara khusus, hasil studi ini dapat memberikan gambaran karakter dan batasan kinerja modul termoelektrik setelah menggunakan beberapa tipe penukar kalor untuk dapat dijadikan sebagai referensi dalam desain pendingin termoelektrik yang semakin efisien.

2. BAHAN DAN METODA

Modul termoelektrik yang digunakan adalah modul yang generik dengan rating arus 10A (TEC-1270) dan rating arus 15A (TEC-12715). Spesifikasi dari kedua modul dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi Modul Termoelektrik (Alldatasheet, 2024)

Model	TEC-12710	TEC1-12715 SR
Dimensi (mm)	40x40x3,2	40x40x3,3
Internal Resistance (Ω)	1,24	0,7 – 0,9
ΔT_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	75	75
V_{\max} (Volt)	17,4	15,4
I_{\max} (Ampere)	10,5	15,0



Gambar 1. Modul Thermoelektrik (a) modul TEC1-12710 (b) TEC1-12715 SR

Pada sisi dingin modul termoelektrik dipasang sebuah penular kalor jenis *heatsink* berbahan aluminium dengan dimensi 58x40x17mm, sedangkan pada sisi panas modul termoelektrik dipasang dengan lima tipe alat penukar kalor *heat exchanger* (HE) dengan spesifikasi sebagai berikut:

1) Penukar Kalor *Square HE*

Tipe : *Air Cooler Heatsink* dengan *fan*
 Dimensi *Heatsink* : 98x100x24 mm³
 Dimensi Fan : 90x90x25 mm³
 Material : Aluminium
 Rated Voltage : 12V



(a)

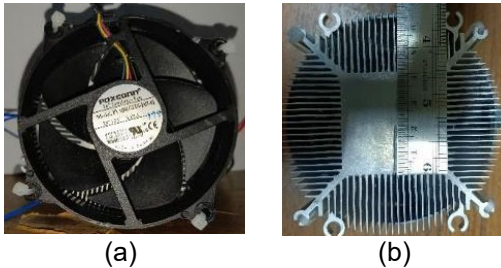


(b)

Gambar 3. Penampang (a) *Fan* dan *Heatsink*, (b) Sisi Dingin *Square HE*

2) Penukar Kalor *Round HE*

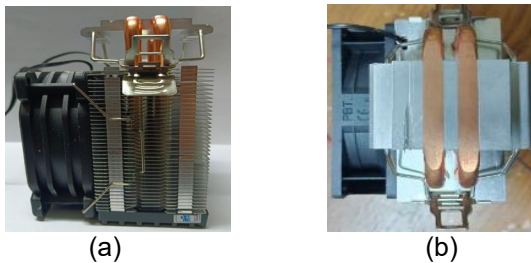
Tipe : *Air Cooler Heatsink* dengan *fan*
 Dimensi *Heatsink* : Ø87x20 mm³
 Dimensi *Fan* : Ø94x25 mm³
 Material : Aluminium
Rated Voltage : 12V



Gambar 4. Penampang (a) *Fan*, (b) *Heatsink* dan Sisi Dingin *Round HE*

3) Penukar Kalor *Two-Pipe HE*

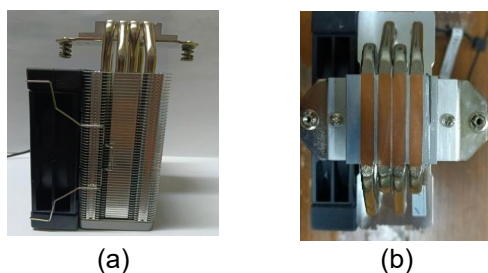
Tipe : *Air Cooler Heat Pipe* dengan *fan*
 Diameter *Heat Pipe* : @2 x Ø6 mm
 Dimensi *Fan* : 93x92x25 mm³
 Material *Heatsink* : Aluminium
 Material *Pipa* : Tembaga
Rated Voltage : 12V



Gambar 5. Penampang (a) Sisi *Heatsink*, (b) Sisi Dingin *Two-Pipe HE*

4) Penukar Kalor *Four-Pipe HE*

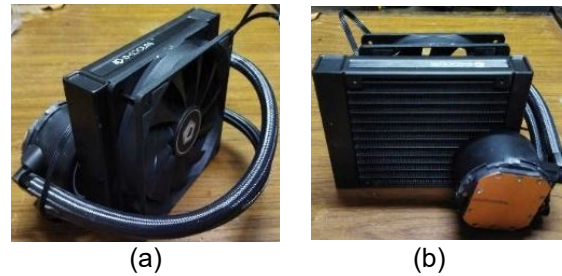
Tipe : *Air Cooler Heat Pipe* dengan *fan*
 Diameter *Heat Pipe* : @4 x Ø6 mm
 Dimensi *Fan* : 120x120x25 mm³
 Material *Heatsink* : Aluminium
 Material *Pipa* : Tembaga
Rated Voltage : 12V



Gambar 6. Penampang (a) Sisi *Heatsink*, (b) Sisi Dingin *Four-Pipe HE*

5) Penukar Kalor *Liquid-Cooler HE*

Tipe : *Air Cooler Heat Pipe* dengan *fan*
 Diameter *Tubing* : @2 x Ø6 mm
 Dimensi : 93x92x25 mm³
 Material *Fan* : Aluminium
 Material *Radiator* : Tembaga
Cold Plate
Rated Voltage : 12V



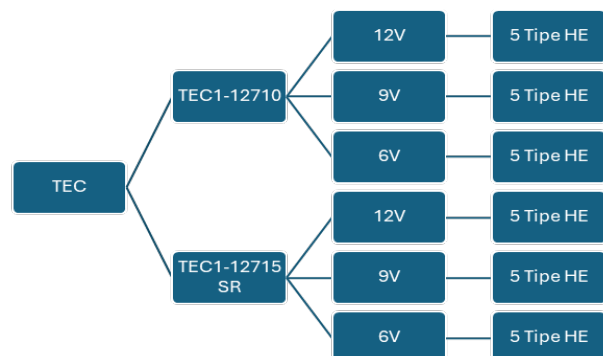
Gambar 7. Penampang (a) *Fan*, (b) *Cold Plate* *Liquid-Cooler HE*

Adapun, spesifikasi alat ukur yang digunakan dalam studi ini dapat dilihat Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Spesifikasi Alat Ukur

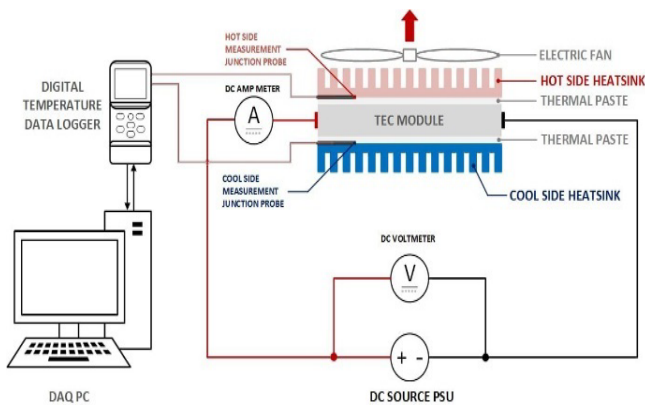
Alat Ukur	<i>Temperatur Data Logger – 4 Channel</i>	Tang Meter Digital
Model	TA612C	UNI-T UT204+
Rentang Operasi	-40°C to 250 °C	40A DC 40 V DC
Resolusi	0,1	0,01 0,01
Akurasi	±0,4%	±2% ±0,8%

Variasi percobaan yang dilakukan pada studi ini digambarkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Variasi Percobaan Modul Termoelektrik TEC1-12710 dan TEC1-12715 SR

Skema konfigurasi pemasangan alat dan bahan pada percobaan dapat dilihat pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Skema Konfigurasi Pemasangan Alat dan Bahan Percobaan

Pada percobaan ini penukar kalor berupa *heatsink* dihubungkan dengan sisi dingin modul termoelektrik, sedangkan lima jenis penukar kalor lainnya dihubungkan pada sisi panas secara bergantian. Perkontakan baik antara permukaan sisi dingin, maupun sisi panas dengan penukar kalor dikonstruksikan menggunakan *thermal paste* (konduktivitas termal 10,5 W/mK). Selanjutnya kabel probe dari *data logger* temperatur diapitkan pada kedua sisi modul termoelektrik, baik diantara modul dengan *heatsink*, maupun modul dengan penukar kalor. *Data logger* temperatur selanjutnya dihubungkan pada PC untuk menerima hasil pembacaan tiga buah temperatur, yaitu temperatur sisi dingin modul termoelektrik, temperatur sisi panas modul termoelektrik, dan temperatur ruangan. Modul termoelektrik dan alat penukar kalor dihubungkan pada sumber arus DC yang sama dengan nominal tegangan yang telah diatur sesuai variasi percobaan. Pada saat pembacaan temperatur awal kedua sisi modul sama atau berdekatan dan telah stabil, percobaan mulai dilakukan dengan menyalakan sumber arus yang akan mengalirkan arus dan tegangan secara bersamaan ke modul termoelektrik dan juga penukar kalor. Pembacaan data temperatur dan arus serta tegangan dilakukan bersamaan dan dicatat dengan interval 30 detik.

Untuk menganalisis performa sistem pendinginan, perlu dilakukan perhitungan *heat rate* kalor yang diserap pada sisi dingin q_c (watt) dan juga kalor yang dilepaskan pada sisi panas q_h (watt) dan selanjutnya dilakukan perhitungan *COP*. Persamaan yang digunakan diantaranya sebagai berikut (Prasetyo et al., 2024; Baldry et al., 2019).

$$q_c = \alpha IT_c - \frac{I^2 R}{2} - (K_t \times \Delta T) \tag{1}$$

$$q_h = \alpha IT_h + \frac{I^2 R}{2} - (K_t \times \Delta T) \tag{2}$$

$$COP = \frac{q_c}{q_h - q_c} \tag{3}$$

Dimana α adalah koefisien *seebeck* (volt/°C), I adalah besar arus terukur (ampere), R adalah hambatan (ohm), K_t adalah koefisien konduktansi (W/K), dan ΔT adalah selisih antara temperatur sisi panas modul yang dihubungkan dengan penukar kalor T_h (K) dan temperatur sisi dingin modul yang dihubungkan dengan *heatsink* T_c (K). Fungsi persamaan untuk mendapat nilai dari variabel di atas adalah sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{V_{max}}{T_h} \tag{4}$$

$$R = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) \times V_{max}}{T_h \times I_{max}} \tag{5}$$

$$K_t = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) \times V_{max} \times I_{max}}{2 \times T_h \times \Delta T_{max}} \tag{6}$$

$$\Delta T = T_h - T_c \tag{7}$$

Adapun nilai V_{max} dan I_{max} yang digunakan dalam persamaan diatas merupakan nilai parameter yang terdapat dalam *datasheet* modul termoelektrik yang digunakan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil data eksperimen beserta analisisnya, baik menggunakan modul TEC1-12710 maupun modul TEC1-12715 SR adalah sebagai berikut.

3.1 Percobaan pada Modul TEC1-12710

Dari percobaan menggunakan modul termoelektrik tipe TEC1-12710 didapatkan hasil pengukuran yang menunjukkan *trend* rata-rata selisih temperatur (ΔT) untuk setiap tegangan diujikan, yaitu tegangan 12V selalu menghasilkan T_h tertinggi dan T_c terendah (menghasilkan nilai ΔT terbesar) dan nilai ΔT semakin rendah seiring penurunan tegangan. Adapun, dari data didapatkan bahwa penukar kalor tipe *Round HE* menghasilkan nilai rata-rata ΔT terkecil diantara tipe penukar kalor lainnya.

Hasil pengolahan data pengukuran temperatur sisi panas dan sisi dingin dari modul termoelektrik TEC1-12710 dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Rata-rata Selisih Temperatur Kedua Sisi Modul Termoelektrik TEC1-12710.

Tipe Penukar Kalor	ΔT (°C)		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	58,07	49,17	35,69
<i>Round HE</i>	43,60	41,87	32,54
<i>Two-Pipe HE</i>	52,82	46,20	34,34

Tipe Penukar Kalor	ΔT (°C)		
	12V	9V	6V
<i>Four-Pipe HE</i>	53,07	47,06	34,41
<i>Liquid-Cooler HE</i>	53,04	45,73	34,70

Dari segi performa, baik nilai COP maupun nilai q_c tertinggi juga didapatkan oleh penukar kalor tipe *Round HE* untuk setiap tegangan yang diujikan. Nilai COP tertinggi (0,620) dihasilkan pada tegangan 6V, sedangkan q_c tertinggi (19,606 Watt) dihasilkan pada tegangan 12V. Namun, nilai q_h menunjukkan hasil berbeda dimana nilai q_h tertinggi untuk setiap tegangan diperoleh dari tipe penukar kalor berbeda, yaitu tipe *Square HE* (12V), tipe *Four-Pipe HE* (9V), dan tipe *Square HE* (6V). Secara umum, nilai COP semakin berkurang seiring dengan kenaikan tegangan, hal ini berkebalikan dengan nilai q_c dan q_h yang semakin besar seiring dengan kenaikan tegangan. Detail hasil perhitungan COP, q_c , dan q_h rata-rata dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Rata-rata Perhitungan Performa Modul Termoelektrik TEC1-12710.

Tipe Penukar Kalor	COP		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	0,019	0,139	0,299
<i>Round HE</i>	0,407	0,452	0,620
<i>Two-Pipe HE</i>	0,193	0,261	0,489
<i>Four-Pipe HE</i>	0,212	0,266	0,512
<i>Liquid-Cooler HE</i>	0,202	0,289	0,386
Tipe Penukar Kalor	q_c (Watt)		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	1,742	5,366	7,368
<i>Round HE</i>	19,606	15,359	11,113
<i>Two-Pipe HE</i>	11,324	9,929	8,813
<i>Four-Pipe HE</i>	13,939	11,006	9,548
<i>Liquid-Cooler HE</i>	12,734	11,233	7,360
Tipe Penukar Kalor	q_h (Watt)		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	94,719	42,445	31,397
<i>Round HE</i>	67,758	49,009	28,829
<i>Two-Pipe HE</i>	69,313	47,399	26,573
<i>Four-Pipe HE</i>	79,345	51,932	27,971
<i>Liquid-Cooler HE</i>	74,864	49,603	26,009

3.2 Percobaan pada Modul TEC1-12715 SR

Adapun dari percobaan dengan modul termoelektrik tipe TEC1-12715 SR didapatkan trend hasil yang mirip dengan pada modul TEC1-12710, yaitu dihasilkan rata-rata selisih temperatur (ΔT) terbesar pada tegangan 12V dan semakin rendah seiring penurunan tegangan. Selain itu, penukar

kalor tipe *Round HE* juga kembali menghasilkan nilai rata-rata ΔT terkecil diantara tipe penukar kalor lainnya. Hasil pengolahan data pengukuran temperatur sisi panas dan sisi dingin dari termoelektrik, serta hasil performa yang ditunjukkan modul termoelektrik TEC1-12715 SR dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil Rata-rata Selisih Pengukuran Temperatur Modul Termoelektrik TEC1-12715 SR.

Tipe Penukar Kalor	ΔT (°C)		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	53,04	48,00	33,10
<i>Round HE</i>	40,40	35,98	29,31
<i>Two-Pipe HE</i>	52,09	43,60	33,69
<i>Four-Pipe HE</i>	47,75	43,15	33,45
<i>Liquid-Cooler HE</i>	46,31	43,18	33,72

Dari segi performa, nilai COP dan nilai q_c tertinggi juga kembali didapatkan oleh penukar kalor tipe *Round HE* untuk setiap tegangan yang diujikan dengan Nilai COP tertinggi dihasilkan pada tegangan 6V, yaitu sebesar 0,767. Namun, nilai q_h tertinggi di setiap tegangan didapatkan oleh penukar kalor tipe *Liquid-Cooler HE* (12V), tipe *Four-Pipe HE* (9V), dan tipe *Round HE* (6V). Detail hasil perhitungan COP, q_c , dan q_h rata-rata dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Rata-rata Performa Modul Termoelektrik TEC1-12715 SR.

Tipe Penukar Kalor	COP		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	0,253	0,168	0,525
<i>Round HE</i>	0,444	0,564	0,767
<i>Two-Pipe HE</i>	0,196	0,332	0,508
<i>Four-Pipe HE</i>	0,291	0,360	0,539
<i>Liquid-Cooler HE</i>	0,315	0,354	0,516
Tipe Penukar Kalor	q_c (Watt)		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	10,585	8,435	12,648
<i>Round HE</i>	26,977	25,076	17,472
<i>Two-Pipe HE</i>	15,865	17,622	12,866
<i>Four-Pipe HE</i>	24,462	20,572	14,070
<i>Liquid-Cooler HE</i>	26,401	19,852	13,490
Tipe Penukar Kalor	q_h (Watt)		
	12V	9V	6V
<i>Square HE</i>	51,889	57,734	36,471
<i>Round HE</i>	87,089	69,277	40,266

Tipe Penukar Kalor	COP		
	12V	9V	6V
<i>Two-Pipe HE</i>	96,356	70,286	37,911
<i>Four-Pipe HE</i>	108,322	77,439	40,009
<i>Liquid-Cooler HE</i>	109,532	75,440	39,341

Berdasarkan data percobaan, didapatkan bahwa temperatur pada sisi panas (T_h) modul TEC1-12715 SR lebih tinggi dibandingkan modul TEC1-12710. Rata-rata kenaikan T_h pada tegangan 12V, 9V, dan 6V dengan pemasangan setiap jenis penukar kalor berturut-turut sebesar 5,04°C, 4,79°C, dan 2,24°C. Hal ini juga terjadi pada sisi dingin (T_c), dimana pada tegangan 12V, 9V, dan 6V berturut-turut terjadi rata-rata kenaikan sebesar 9,33°C, 8,10°C, dan 3,94°C. Namun, pada modul TEC1-12715 SR dengan terjadinya kenaikan T_h dan T_c mengakibatkan nilai ΔT yang lebih kecil dengan rata-rata beda ΔT pada tegangan 12V, 9V, dan 6V masing-masing sebesar 4,20 °C, 3,22 °C, dan 1,68 °C lebih rendah dibandingkan modul TEC1-12710.

Perbedaan nilai ΔT ini akan berpengaruh terhadap perhitungan COP dimana hal ini dapat dilihat dari hubungan nilai ΔT terhadap q_c dan q_h pada persamaan (1) dan (2). Semakin kecil nilai ΔT , maka nilai q_c dan q_h akan semakin besar dan sebaliknya. Lebih lanjut, sebagaimana persamaan (3) meningkatnya nilai q_c akan mengakibatkan peningkatan nilai COP, dan sebaliknya untuk nilai q_h . Salah satu indikator dari efisiensi sistem dapat ditinjau dari nilai COPnya dimana semakin besar nilai COP mengindikasikan sistem yang semakin efisien. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai COP yang tinggi suatu sistem pendingin termoelektrik harus mampu menghasilkan nilai q_c tinggi dan nilai q_h yang mendekatinya.

3.3 Profil Hubungan antara ΔT dengan q_c

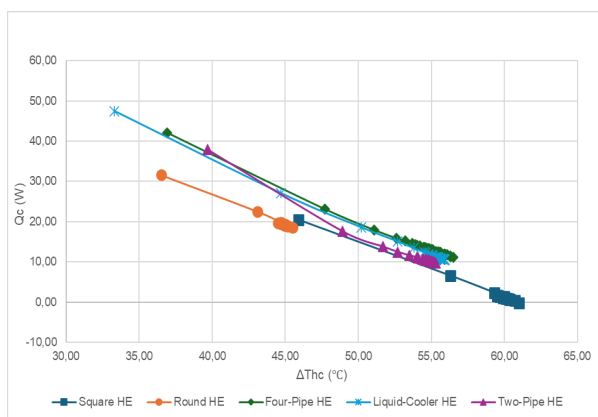
Pada Gambar 10 hingga Gambar 12 dapat dilihat keseluruhan data percobaan yang digambarkan sebagai profil hubungan antara selisih temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik (ΔT) pada saat diberikan variasi tegangan 12V, 9V, dan 6V terhadap jumlah kalor yang diserap oleh sisi dingin (q_c) baik pada termoelektrik TEC1-12710 maupun TEC1-12715 SR.

Pada percobaan dengan tegangan 12V, kemampuan penyerapan kalor tertinggi dari modul TEC1-12710 adalah sebesar 47,45 Watt dihasilkan oleh penukar kalor tipe *Liquid-Cooler HE*. Sedangkan, percobaan dengan modul TEC1-12715 SR menunjukkan hasil berbeda, yaitu penyerapan kalor tertinggi dilakukan oleh penukar kalor jenis *Round HE* sebesar 75,21 Watt.

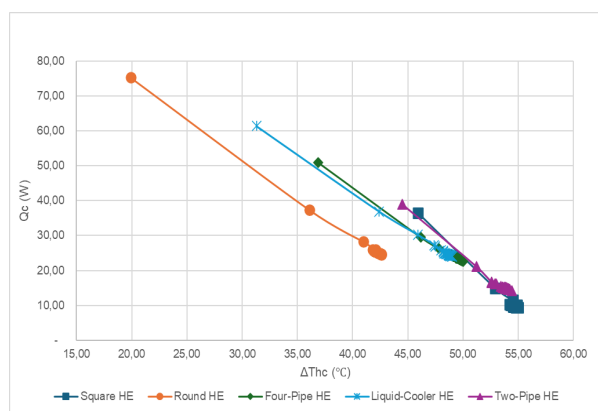
Percobaan pada tegangan 9V menunjukkan hasil yang serupa, yaitu modul TEC1-12710 mengalami penyerapan kalor terbanyak sebesar 43,29 Watt pada saat dihubungkan dengan penukar kalor tipe *Liquid-Cooler HE*. Adapun modul TEC1-12715 SR mengalami penyerapan kalor terbaik sebesar 51,62 Watt pada saat dihubungkan dengan penukar kalor tipe *Round HE*.

Dari ketiga variasi tegangan, percobaan pada tegangan 6V menunjukkan hasil yang berbeda. Baik modul TEC1-12710, maupun modul TEC1-12715 SR berturut-turut menghasilkan penyerapan kalor terbesar saat dihubungkan dengan penukar kalor tipe *Liquid-Cooler HE* dengan kalor sebanyak 31,65 Watt dan 38,95 Watt.

Seluruh nilai penyerapan kalor terbanyak ini didapatkan pada kondisi percobaan diawal 30 detik pertama, dimana pada kondisi ini juga nilai ΔT dari kedua sisi modul berada pada nilai terendah.

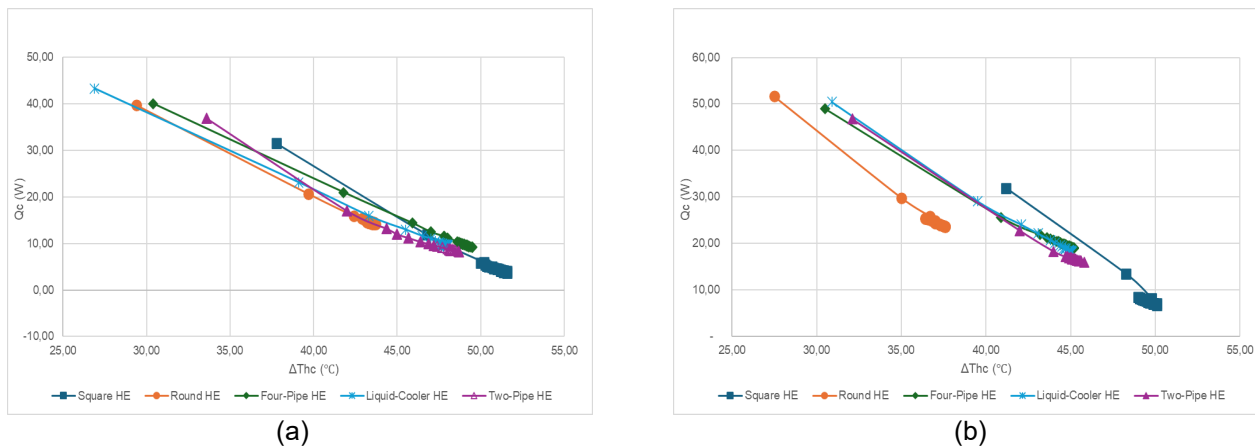


(a)

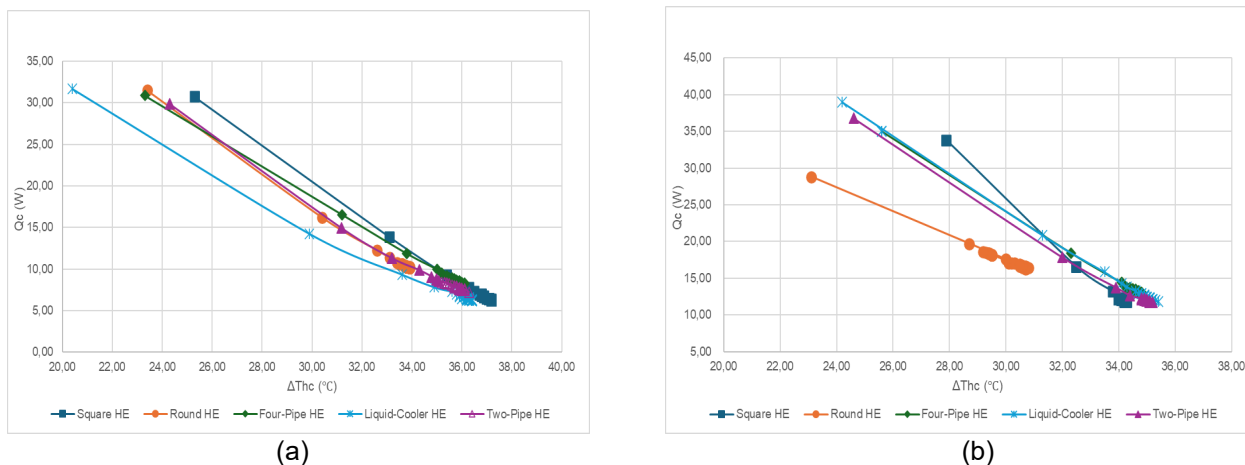


(b)

Gambar 10. Profil Selisih Temperatur (ΔT) terhadap Penyerapan Kalor pada Sisi Dingin (q_c)
 (a) TEC1-12710, (b) TEC1-12715 SR pada Tegangan 12V



Gambar 11. Profil Selisih Temperatur (ΔT) terhadap Penyerapan Kalor pada Sisi Dingin (q_c) (a) TEC1-12710, (b) TEC1-12715 SR pada Tegangan 9V



Gambar 12. Profil Selisih Temperatur (ΔT) terhadap Penyerapan Kalor pada Sisi Dingin (q_c) (a) TEC1-12710, (b) TEC1-12715 SR pada Tegangan 6V

3.4 Profil Hubungan antara ΔT dengan COP

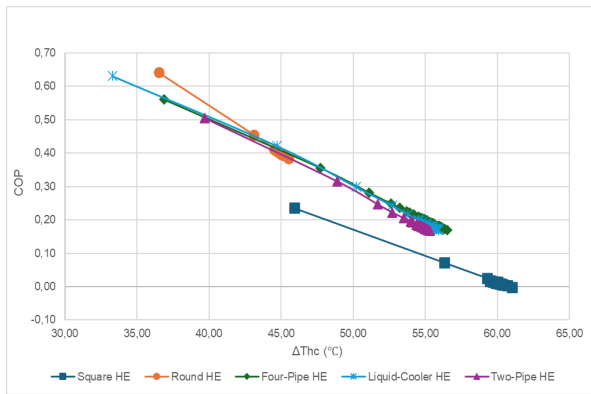
Pada Gambar 13 hingga Gambar 15 dapat dilihat keseluruhan data percobaan yang digambarkan sebagai profil hubungan antara selisih temperatur yang terjadi antara sisi dingin dan panas modul termoelektrik (ΔT) pada saat diberikan variasi tegangan 12V, 9V, dan 6V terhadap COP baik pada termoelektrik TEC1-12710 maupun TEC1-12715 SR.

Percobaan pada tegangan 12V dengan modul TEC1-12710 dan modul TEC1-12715 SR mendapati penukar kalor tipe *Round HE* menghasilkan COP terbaik, masing-masing sebesar 0,64 dan 0,92.

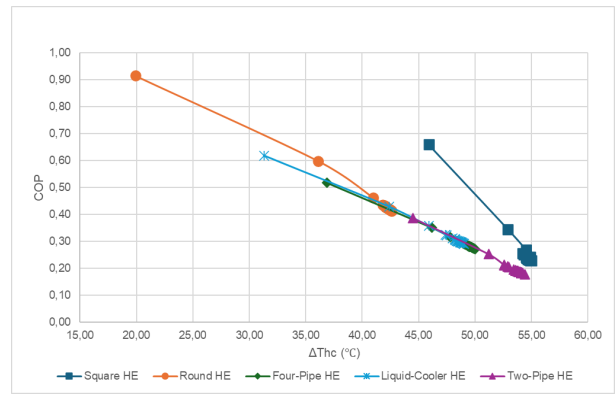
Percobaan pada tegangan 9V dengan modul TEC1-12710 menunjukkan penukar kalor tipe *Liquid-Cooler HE* menghasilkan COP terbaik sebesar 0,95, sedangkan pada modul TEC1-12715 SR didapati penukar kalor tipe *Round HE* kembali menghasilkan COP terbaik sebesar 0,85.

Begitu pun dengan percobaan pada tegangan 6V, pada modul TEC1-12710 kembali didapati penukar kalor tipe *Liquid-Cooler HE* menghasilkan COP terbaik sebesar 1,33 (terbaik dari seluruh percobaan) sedangkan pada modul TEC1-12715 SR didapati penukar kalor tipe *Round HE* kembali menghasilkan COP terbaik sebesar 1,27.

Seluruh nilai COP terbaik ini didapatkan pada kondisi percobaan diawal 30 detik pertama, dimana pada kondisi ini juga nilai ΔT dari kedua sisi modul berada pada nilai terendah. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, nilai ΔT yang kecil akan menghasilkan nilai q_c dan COP yang besar, sehingga dari kurva tampak jika setiap jenis penukar kalor menghasilkan nilai COP tertinggi di awal percobaan. Hal ini terjadi, karena di saat awal percobaan ketika sumber tegangan baru dinyalakan nilai T_h dan T_c masih berdekatan (hampir sama) atau dengan kata lain nilai ΔT masih rendah.

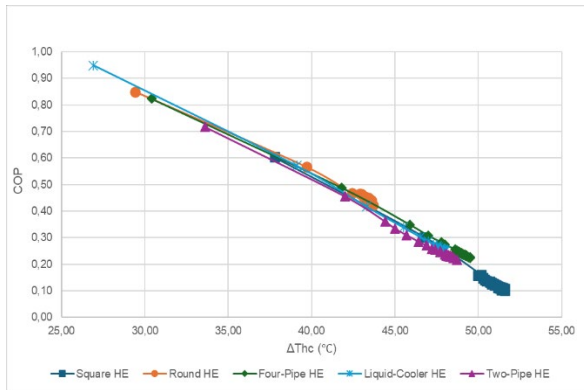


(a)

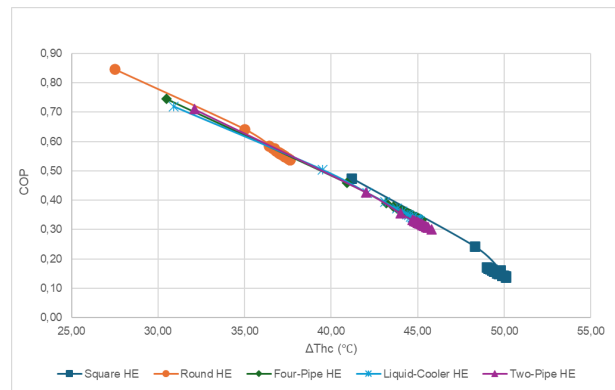


(b)

Gambar 13. Profil ΔT terhadap COP (a) TEC1-12710, (b) TEC1-12715 SR pada Tegangan 12V

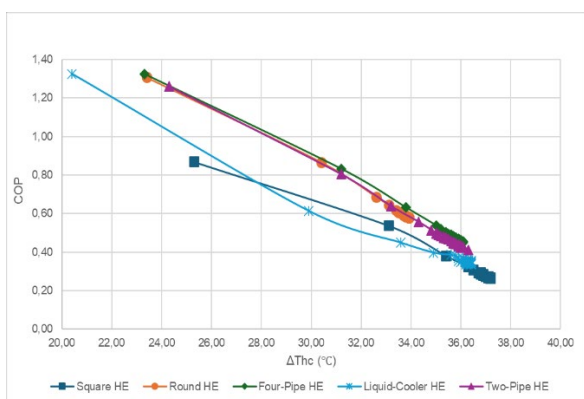


(a)

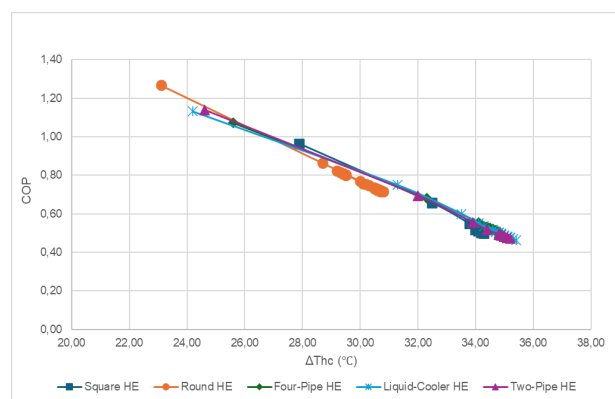


(b)

Gambar 14. Profil ΔT terhadap COP (a) TEC1-12710, (b) TEC1-12715 SR pada Tegangan 9V



(a)



(b)

Gambar 15. Profil ΔT terhadap COP (a) TEC1-12710, (b) TEC1-12715 SR pada Tegangan 6V

4. KESIMPULAN

Pengujian metode pendinginan sisi panas pada termoelektrik dengan dua rating arus berbeda

yang dihubungkan dengan lima tipe penukar kalor ini telah menemukan beberapa karakter termoelektrik pada tiga variasi tegangan sebagai berikut:

1. Dari segi COP, modul TEC1-12710 menunjukkan kinerja lebih baik saat diaplikasikan pada ketiga variasi tegangan, khususnya di awal waktu percobaan. Namun, dari rata-rata data pengamatan, didapatkan modul TEC1-12715 SR mampu menghasilkan rata-rata COP yang lebih baik pada ketiga variasi tegangan.
2. Pada kedua modul termoelektrik, nilai rata-rata COP terbaik didapatkan pada tegangan 6V, yaitu 0,620 (TEC1-12710) dan 0,767 (TEC1-12715 SR). Namun, nilai rata-rata q_c terbaik didapatkan pada tegangan 12V, yaitu 19,61 Watt (TEC1-12710) dan 26,98 Watt (TEC1-12715 SR). Seluruh hasil didapatkan saat sisi panas modul dihubungkan dengan penukar kalor tipe *Round HE*.
3. Kedua modul termoelektrik menghasilkan nilai COP dan q_c tertinggi di awal waktu percobaan ketika modul dihubungkan dengan tipe penukar kalor *Round HE* dan *Liquid-Cooler HE*.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat – Politeknik Negeri Bandung atas hibah dana penelitian dengan nomor: B/6.1/PL1.R7/PG.00.03/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Alldatasheet. (2024). Electronic Components Datasheet Search. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/739991/HB/TEC1-12715.html#:~:text=TEC1-12715%20Download>.
- Baldry, M., Timchenko, V., & Menictas, C. (2019). Optimal design of a natural convection heat sink for small thermoelectric cooling modules. *Applied Thermal Engineering*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114062>
- Bamroongkhan, P., Lertsatitthanakorn, C., Sathapornprasath, K., & Soponronnarit, S. (2021). Experimental performance of a photovoltaic-assisted solar parabolic dish thermoelectric system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101280. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237718297>
- Demeke, W., Ryu, B., & Ryu, S. (2024). Machine learning-based optimization of segmented thermoelectric power generators using temperature-dependent performance properties. *Applied Energy*, 355, 122216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122216>
- Faraz Ahmad, F., Ghenai, C., Al Bardan, M., Bourgon, M., & Shanableh, A. (2022). Performance analysis of atmospheric water generator under hot and humid climate conditions: Drinkable water production and system energy consumption. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100270>
- Firmansah, H., Bizzy, I., Mataram, A., & Sipahutar, R. (2023). Study of Exhaust Gas Residual Heat Conversion Hrgs PLTGU Keramasan To Electrical Energy With Generator Thermoelectric Technology. *Austenit*, 15(2), 69–78. <https://doi.org/10.53893/austenit.v15i2.6745>
- Kuang, C., Hu, Z., Yuan, Z., Wen, K., Qing, J., Kobera, L., Abbrent, S., Brus, J., Yin, C., Wang, H., Xu, W., Wang, J., Bai, S., & Gao, F. (2021). Critical role of additive-induced molecular interaction on the operational stability of perovskite light-emitting diodes. *Joule*, 5(3), 618–630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.01.003>
- Mainil, A. K., Aziz, A., & Akmal, M. (2018). Portable Thermoelectric Cooler Box Performance with Variation of Input Power and Cooling Load. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 7(2), 85–92. <https://doi.org/10.13170/aijst.7.2.8722>
- Prasetyo, B. Y., Badarudin, A., Sukamto, A. P. E., & Muliawan, R. (2022). Investigasi Eksperimental Performa Sistem Pendingin Multi-Termoelektrik dengan Konfigurasi Termal Seri dan Paralel. *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:257970161>
- Prasetyo, B. Y., Rosulindo, P. P., & Wang, F. (2024). Thermal Performance Investigation of Thermoelectric Cooling System with Various Hot-Side Cooling Methods. *Makara Journal of Technology*, 28(1). <https://doi.org/10.7454/mst.v28i1.1621>
- Pratama, F. R., & Saraswati, V. (2023). Design of Thermoelectric Peltier Effect Demonstrator using Modul TEC-12706 and TEG-SP1848. *Physics Education Research Journal*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.21580/perj.2023.5.1.12552>
- Putra, N. S. D., Yanuar, & Iskandar, F. N. (2011). Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 1274–1281. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:122511279>
- Rahmawaty, M., Fauzan, M. H., & Hendriko, H. (2024). Rancang Bangun Sistem Pendingin Dan Pencuci Pada Mesin Pengolah Biodiesel Dengan Bahan Baku Minyak Jelantah. *Austenit*, 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.53893/austenit.v16i1.6774>

- Shabgard, H., Allen, M. J., Sharifi, N., Benn, S. P., Faghri, A., & Bergman, T. L. (2015). Heat pipe heat exchangers and heat sinks: Opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Vol. 89, pp. 138–158).
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.020>
- Srimuang, W., & Amatachaya, P. (2012). A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 6, pp. 4303–4315).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.030>
- Tang, Y., Jin, D., Wang, Z., & Han, F. (2023). The extreme high cooling capacity thermoelectric cooler optimal design for kilowatts scale thermoelectric air-conditioner of high-speed railway carriage. *Energy and Built Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.011>