

# STUDI KONVERSI PANAS SISA GAS BUANG HRSG PLTGU KERAMASAN KE ENERGI LISTRIK DENGAN TEKNOLOGI TERMoeLEKTRIK GENERATOR

## STUDY OF EXHAUST GAS RESIDUAL HEAT CONVERSION HRSG PLTGU KERAMASAN TO ELECTRICAL ENERGY WITH GENERATOR THERMOELECTRIC TECHNOLOGY

Hari Firmansah<sup>1)</sup>, Irwin Bizzy<sup>2)\*</sup>, Agung Mataram<sup>2)</sup>, Riman Sipahutar<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya

<sup>2)</sup> Dosen Program Studi Magister Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya

\*e-mail corresponding: [irwin@unsri.ac.id](mailto:irwin@unsri.ac.id)

### INFORMASI ARTIKEL

Diperbaiki:  
Revised  
01/06/2023

Diterima:  
Accepted  
07/07/2023

Publikasi Online:  
Online-Published  
31/10/2023

### ABSTRAK

*Heat Recovery Steam Generator (HRSG) merupakan gabungan dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), pembangkit ini memanfaatkan gas buang dari PLTG untuk menghasilkan uap sebagai fluida kerja di dalam PLTU. Panas sisa dari proses pemanasan di HRSG disalurkan ke cerobong asap, dan sisa panas dari gas buang dapat diubah menjadi energi listrik dengan modul Thermoelectric Generator (TEG). Penelitian ini dilakukan dengan memasang modul TEG secara seri pada permukaan dinding cerobong HRSG, dengan menggunakan pengukuran skala laboratorium. Sumber panas menggunakan heater dengan total daya 2.000 W. Hasil penelitian menunjukkan bahwa modul TEG dapat mengubah energi panas sisa gas buang dari cerobong HRSG menjadi energi listrik. Empat modul TEG yang dipasang di permukaan cerobong dapat menghasilkan tegangan 0,83 V dan daya maksimum 2,79 mW. Hasil ini menunjukkan bahwa modul TEG merupakan peluang untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik untuk pengembangan lebih lanjut.*

**Kata Kunci :** Energi panas, energi listrik, cerobong, HRSG, TEG.

### ABSTRACT

*The Heat Recovery Steam Generator (HRSG) is a combination of a Gas Power Plant (PLTG) and a Steam Power Plant (PLTU), this plant utilizes exhaust gas from the PLTG to produce steam as the working fluid in the PLTU. The residual heat from the heating process at the HRSG is channeled into the chimney, and the remaining heat from the exhaust gas can be converted into electrical energy with the Thermoelectric Generator (TEG) module. This research was carried out by installing the TEG module in series on the surface of the HRSG chimney wall, using laboratory scale measurements. The heat source uses a heater with a total power of 2,000 W. The research results show that the TEG module can convert the residual heat energy of the exhaust gas from the HRSG chimney into electrical energy. Four TEG modules mounted on the chimney surface can generate a voltage of 0.83 V and a maximum power of 2.79 mW. These results indicate that the TEG module is an opportunity to convert heat energy into electrical energy for further development.*

**Keywords :** Heat energy, electric energi, chimney, HRSG, TEG.

©2023 The Authors. Published by  
AUSTENIT (Indexed in SINTA)

doi:  
[doi.org/10.5281/zenodo.10060060](https://doi.org/10.5281/zenodo.10060060)

## 1 PENDAHULUAN

Sumber energi fosil saat ini masih menjadi salah satu penyedia energi yang paling besar khususnya di wilayah negara Indonesia

(Azharuddin, Dalam, 2013). Pemakaian konsumsi bahan bakar fosil secara ekstensif menyebabkan permasalahan pada atmosfer dan berdampak kerusakan bagi lingkungan sekitar, seperti pemanasan global serta perubahan iklim (He et al.,

2015). Pengembangan pemanfaatan panas sisa yang berbasis bebas emisi dan ramah lingkungan diperlukan dilakukan saat ini secara terus menerus agar kebutuhan energi bersih bagi makhluk hidup terpenuhi. PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) memiliki komponen utama yaitu HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), di mana gas panas yang terbuang dari turbin gas diteruskan menuju HRSG sebagai media pemanas untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin uap (SAM, 2021). Panas sisa dari proses memanaskan air pada HRSG disalurkan ke cerobong (*stack*) dan panas ini dapat diubah menjadi energi listrik dengan modul TEG (*Thermoelectric Generator*). Pemanfaatan modul TEG secara langsung dapat menghasilkan tenaga listrik dari perbedaan temperatur di antara permukaan sumber benda kerjanya. Selain itu, modul TEG sangat andal dan tahan terhadap fluks termal yang tinggi (Lashin et al., 2020). Kelebihan penggunaan modul TEG antara lain: bebas emisi sehingga tidak menimbulkan polusi udara, tidak terjadi reaksi kimia, tidak ada bagian yang bergerak, minim kerusakan dan perawatan serta memiliki *life time* jangka panjang (Balkrishan et al., 2016).

Penelitian pemanfaatan sisa energi panas yang dimanfaatkan dengan menggunakan modul TEG antara lain, adanya potensi pembangkit tenaga listrik menggunakan modul TEG dengan memanfaatkan sumber panas buangan dari pemanas air rumah tangga (Ding et al., 2017) dengan menggunakan modul TEG 60 unit. Penelitian ini dilakukan dengan variasi temperatur air panas 50°C – 100°C sehingga menghasilkan daya listrik minimum 3.9 W, maksimum 42.4 W dan efisiensi termal dari sistem ini adalah sekitar 0,37% hingga 1,03%. Lashin dkk telah melakukan penelitian mengenai kinerja termoelektrik generator dengan pemanfaatan cahaya radiasi matahari pada *solar cell* (Lashin et al., 2020), hasil penelitiannya menunjukkan bahwa tiga modul TEG yang dipasang dengan sumber panas dari dua intensitas cahaya terkonsentrasi menghasilkan daya 0,67 W dan 0,51 W.

Quan dkk. telah melakukan pengujian eksperimental TEG dengan memanfaatkan sumber panas limbah industri pada *hexagonal heat exchanger* (Quan et al., 2020), penelitian ini menggunakan 30 modul TEG tipe TEHP1-1264-0.8 yang disusun pada 6 permukaan sisi penukar panas *hexagonal heat exchanger* dengan temperatur sisi panas maksimum adalah 269,2°C menghasilkan daya keluaran maksimum TEG sekitar 11,5 W dan nilai efisiensi sistem 0,96% atau mendekati 1,0%. Mehmet A. Kunt dan Haluk Gunes telah melakukan eksperimental perbandingan kinerja modul TEG yang berbeda dengan TEG12-8 dan TEG1-199 pada sistem pembuangan mesin diesel (Kunt & Gunes, 2020). Putaran mesin diesel meningkat maka massa fluida yang terbuang dalam satuan periode juga meningkat sehingga menyebabkan

kenaikan temperatur permukaan modul TEG serta meningkatkan tegangan dan arus listrik. Modul TEG TEG12-8 menghasilkan tegangan tertinggi 2,78 V dan arus listrik 0,287 A, sedangkan TEG1-199 menghasilkan 3,01 V dan arus 0,305 A.

Penelitian kinerja TEG pada sistem uap panas sisa pengecoran perunggu yang dilakukan oleh Liu dkk (Liu et al., 2022) menunjukkan bahwa daya modul TEG meningkat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kecepatan gas buang dan temperatur yang masuk. Secara keseluruhan, total TEG yang dipasang adalah 576 modul dengan kecepatan 4 m/s dan temperatur *input* 600°C, menghasilkan *output* daya neto mencapai 9,37 kW serta efisiensi 2,2%. Mirmanto dkk juga melakukan pengujian mengenai pemanfaatan gas buang dari knalpot kendaraan bermotor untuk menjadi energi listrik melalui modul TEG (Mirmanto et al., 2020), penelitian ini menggunakan 3 (tiga) modul TEG yang memiliki tipe TE-MOD-5W5V-35S dan pemanas dengan temperatur maksimum 165°C. Peningkatan perbedaan temperatur akan meningkatkan daya listrik, rangkaian secara paralel menghasilkan daya yang tinggi tetapi tegangan listrik menjadi lebih rendah. Tegangan listrik tertinggi pada penelitian ini adalah 3,30 V yang diperoleh dari rangkaian seri serta daya tertinggi 0,13 W dicapai dengan rangkaian paralel.

Goma dkk melakukan penelitian eksperimental pemanfaatan panas buangan dari pabrik semen untuk membangkitkan energi listrik melalui modul TEG, penelitian ini menggunakan dua sistem pendingin yaitu udara paksa dan air (Gomaa et al., 2022). Metode sistem pendingin udara paksa rata-rata menghasilkan temperatur sisi panas maksimum adalah 284°C dan temperatur sisi *heatsink* pendingin 29°C menghasilkan tegangan listrik maksimum 7,4 V, kuat arus 1,6 A, daya listrik 11,84 W dan efisiensi 4,47%. Metode pendingin kedua dengan sistem air rata-rata menghasilkan temperatur sisi panas maksimum adalah 288°C dan temperatur sisi *heatsink* pendingin 31°C menghasilkan tegangan listrik maksimum 7,5 V, arus 1,65 A, daya listrik 12,3 W serta efisiensi 4,71%. Dari berbagai aplikasi pemanfaatan teknologi modul TEG untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik antara lain: penggunaan panas buang kendaraan bermotor, mesin diesel, pabrik semen dan sebagainya seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya serta berdasarkan potensi energi panas sisa yang terbuang dengan temperatur berkisar  $\pm 75$  s.d 100°C dari cerobong HRSG PLTGU Keramasan, dengan demikian dalam penelitian ini dilakukan pengembangan studi penelitian optimalisasi pemanfaatan panas sisa gas buang HRSG PLTGU menjadi energi listrik dengan teknologi modul TEG dengan metode eksperimental skala laboratorium. Kemudian, penelitian ini juga melakukan analisa tingkat efektivitas posisi pemasangan modul TEG (sisi atas, tengah dan bawah cerobong HRSG)

terhadap tegangan, kuat arus dan daya listrik yang dihasilkan modul TEG.

## 2. BAHAN DAN METODE

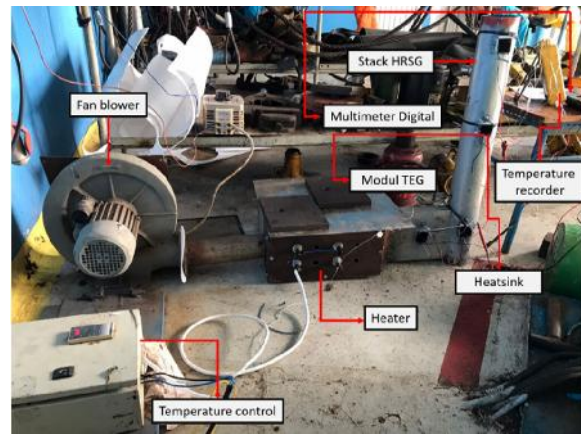
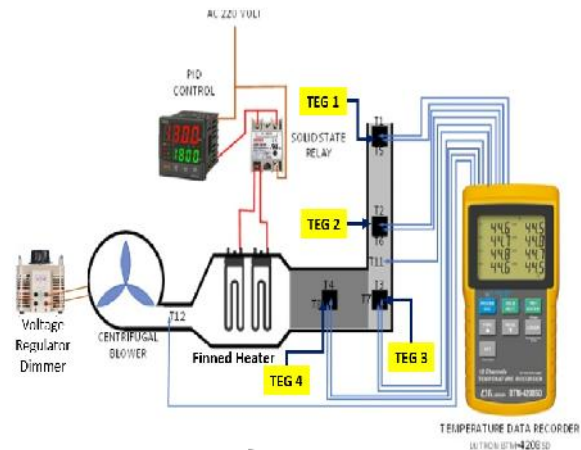
Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental dan survei lapangan di PLTGU Keramasan. Sebelumnya, melakukan perhitungan dengan analisis non dimensional agar didapat dimensi skala laboratorium. Berdasarkan survei diketahui data cerobong HRSG aktual dan berdasarkan perhitungan analisis non-dimensional skala laboratorium ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Perbandingan ukuran aktual dan skala laboratorium

No	Parameter	Aktual	Skala Laboratorium
1	Tinggi (m)	36,5	0,765
2	Diameter (m)	26	0,1143
3	Tebal	0,05	0,002
4	Luas inlet (m <sup>2</sup> )	23,750	0,008
5	Luas outlet (m <sup>2</sup> )	2,042	0,090
6	Konduktivitas termal (W/m.K)	46	31,7
7	Kecepatan inlet (m/s)	2,86	1,2
8	Temperatur cerobong (°C)	118	100
10	Temperatur ambien (°C)	27	29

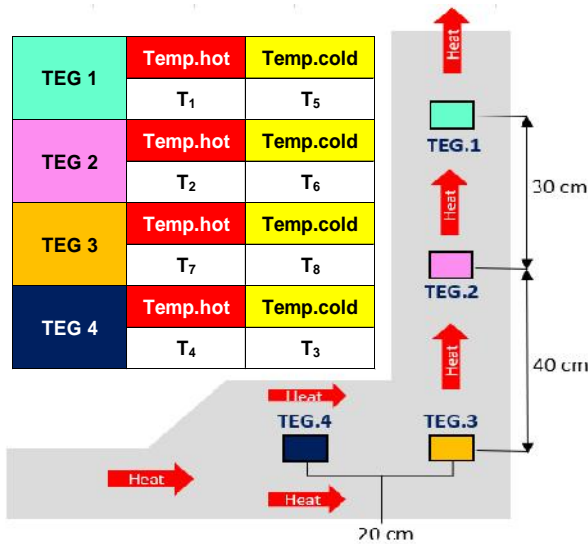
Sebagai sumber penyedia aliran panas gas buang cerobong HRSG skala laboratorium di *supplay* dari *exhaust fan centrifugal blower* yang dihubungkan pemanas *finned heater* tipe model U dengan daya 2 x 1.000 W, panjang 50 cm yang diatur variasi temperatur kerjanya dengan *control temperature SR94-8Y-N-90-1000*. Kemudian, pengujian ini menggunakan 4 unit modul TEG SP 1848-27145 SA dan 4 buah *heatsink* aluminium dengan dimensi ukuran 40 mm x 40 mm x 4 mm. Pengukuran parameter-parameter uji menggunakan kabel *probe thermocopel* tipe K sebagai sensor alat ukur temperatur yang dihubungkan *temperature digital recorder* 12 channels BTM-4208SD berfungsi untuk menyimpan data temperatur sisi panas dan sisi dingin secara otomatis. Selain itu, untuk mendeteksi distribusi temperatur di area cerobong HRSG digunakan alat *thermograph* tipe IRSYS 4010 dan menggunakan digital multimeter tipe *Fluke 88V* yang berfungsi sebagai alat ukur data untuk mengetahui tegangan serta kuat arus yang dihasilkan oleh sistem modul TEG.

Adapun skematik pemodelan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Skematik Uji Panas Sisa Gas Buang HRSG ke energi listrik dengan modul TEG

Skema kerja pengujian ini dilakukan dengan tiga variasi temperatur pemanas yaitu 75°C, 85°C dan 100°C. Pada permukaan cerobong HRSG dipasang komponen empat buah modul TEG dan *heatsink* aluminium yang juga dipasang secara langsung pada modul TEG sebagai media pendingin memanfaatkan udara natural dari lingkungan sekitar. Pemasangan modul TEG pada cerobong HRSG dilakukan dengan variasi posisi jarak pasang yang berbeda yaitu diletakkan pada bagian atas, tengah, bawah dan sisi samping cerobong HRSG yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh titik posisi penempatan modul TEG terhadap daya yang dihasilkan. Gambar 2 menunjukkan posisi penempatan modul TEG dan distribusi *thermocouple* yang dipasang pada setiap modul TEG serta *heatsink*. Tabel 2 menunjukkan parameter proses eksperimen yang digunakan dan Tabel 3 memperlihatkan rencana variasi percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini.



**Gambar 2.** Posisi Penempatan Lokasi Modul TEG dan Titik Termokopel

**Tabel 2.** Parameter Eksperimen

No	Parameter	Satuan
1	Temperatur sisi panas TEG	°C
2	Temperatur sisi dingin TEG	°C
3	Perbedaan temperatur ( T )	°C
4	Temperatur heater	°C
5	Kecepatan udara	m/s
6	Tegangan listrik	V
7	Kuat arus	A
8	Daya listrik	W

**Tabel 3.** Rencana Variasi Pengujian

Uji ke-	Temp. Heater (°C)	Modul TEG
1	75	1
	75	2
	75	3
	75	4
2	85	1
	85	2
	85	3
	85	4
3	100	1
	100	2
	100	3
	100	4

Data penelitian hasil pengukuran diolah menggunakan persamaan berikut:

a. Koefisien Seebeck

Nilai koefisien Seebeck tergantung pada perbedaan temperatur dan perbedaan tegangan yang dihasilkan. Koefisien Seebeck dapat

dinyatakan dari persamaan 1 berikut ini (Tohidi et al., 2022) :

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \tag{1}$$

$\alpha$  : Koefisien seebeck (Volt/°C)

V : Tegangan (V)

T : Perbedaan Temperatur (°C)

b. Perpindahan Panas

Energi panas merupakan energi yang diterima oleh suatu benda atau material yang menyebabkan temperatur benda tersebut berubah (Beni Kurniawan Saputra, M Ginting, 2016). Perhitungan penyerapan kalor yang masuk ke sisi panas modul TEG ( $Q_H$ ) dan aliran kalor ke luar dari sisi dingin modul TEG ( $Q_C$ ) dapat ditentukan dengan persamaan 2 (Bensaada, 2019) :

$$Q_H = I\alpha.T_H + K(T_H - T_C) - I^2 \cdot \frac{R}{2} \tag{2}$$

$$Q_C = I\alpha.T_C + K(T_H - T_C) - I^2 \cdot \frac{R}{2} \tag{3}$$

$Q_H$  : Kalor yang diserap pada sisi panas TEG (W)

$Q_C$  : Kalor yang diserap pada sisi dingin TEG (W)

$T_H$  : Temperatur pada sisi panas TEG (°C)

$T_C$  : Temperatur pada sisi dingin TEG (°C)

K : Konduktivitas termal (W/m.°C)

$\alpha$  : Koefisien seebeck (V/°C)

R : Hambatan ( )

I : Kuat arus (A)

c. Daya output Modul TEG

Dalam menganalisis kinerja modul TEG, daya listrik yang dihasilkan oleh modul TEG ( $P_{TEG}$ ) dapat didefinisikan dengan persamaan 4 (Gomaa et al., 2022):

$$P_{TEG} = I^2 \times R_L = I \times V \tag{4}$$

$P_{TEG}$  : Daya listrik (W)

I : Kuat arus (A)

$R_L$  : Resistensi beban ( )

V : Tegangan listrik (V)

Selain itu, dalam menghitung kinerja modul TEG, daya listrik yang dihasilkan oleh modul TEG ( $P_{TEG}$ ) dapat didefinisikan juga dengan persamaan 5 dan 6 (Bensaada, 2019):

$$P_{TEG} = (Q_H - Q_C) \tag{5}$$

$$P_{TEG} = I \cdot (T_H - T_C) - I^2 R \tag{6}$$

d. Efisiensi termal Modul TEG

Perhitungan efisiensi termal TEG ( $\eta_{th,TEG}$ ) secara sederhana didefinisikan sebagai rasio daya output terhadap energi panas yang masuk dan diserap oleh TEG dihitung dengan persamaan 7 (Gomaa & Rezk, 2020):

$$\eta_{th,TEG} = \frac{P_{TEG}}{Q_{TEG}} \quad (7)$$

Selain itu, efisiensi termal TEG dapat dihitung juga dengan persamaan 8 (Bensaada, 2019):

$$\eta_{th,TEG} = \frac{P_{TEG}}{Q_H} \quad (8)$$

$\eta_{th,TEG}$  : Efisiensi termal modul TEG (%)

$P_{TEG}$  : Daya listrik (W)

$Q_{TEG}$  : Energi panas yang diserap TEG (W)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan *output* data berupa tegangan listrik, kuat arus, daya listrik, temperatur sisi panas modul TEG, temperatur sisi dingin modul TEG dan temperatur area cerobong HRSG. Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi temperatur *input* HRSG dari *heater* antara lain : 75°C, 85°C dan 100°C. Selain itu, pengujian ini dilakukan dengan variasi penempatan pemasangan modul TEG pada cerobong HRSG yang bertujuan untuk mengetahui tingkat efektivitas dan daya mampu listrik yang dihasilkan dari masing-masing titik lokasi penempatan modul TEG tersebut. Pelaksanaan waktu pengambilan data dilakukan secara bertahap dengan *power supply* pemanas yang telah diatur pola operasinya oleh *temperature control* SR94 sesuai dengan variasi temperatur kerjanya. Data rata-rata hasil pengujian modul TEG pada cerobong HRSG dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Data hasil pengujian penyerapan temperatur sisi panas dan dingin modul TEG

Uji ke-	Temperatur rata-rata (°C)				Nomor Modul TEG
	Heater	Sisi Panas	Sisi Dingin	T	
1	75	45,47	42,03	3,43	1
	75	52,82	48,49	4,33	2
	75	59,57	53,25	6,32	3
	75	64,38	55,93	8,46	4
2	85	48,58	44,73	3,84	1
	85	57,18	52,41	4,77	2
	85	64,96	58,11	6,85	3
	85	70,24	60,23	10,0	4
3	100	52,59	47,29	5,30	1
	100	63,86	58,28	5,58	2
	100	72,86	63,11	9,76	3
	100	81,32	66,85	14,4	4

Kemudian, hasil pengujian secara rata - rata *output* modul TEG yang disusun dalam rangkaian seri seperti: parameter nilai tegangan listrik dan kuat arus terhadap variasi temperatur kerja *heater*

ditunjukkan pada Tabel 5 sedangkan hasil pengujian *output* modul TEG tunggal atau individual modul TEG berdasarkan letak posisi pemasangannya diperlihatkan pada Tabel 6.

**Tabel 5.** Data hasil rata-rata pengujian *output* modul TEG secara Rangkaian Seri

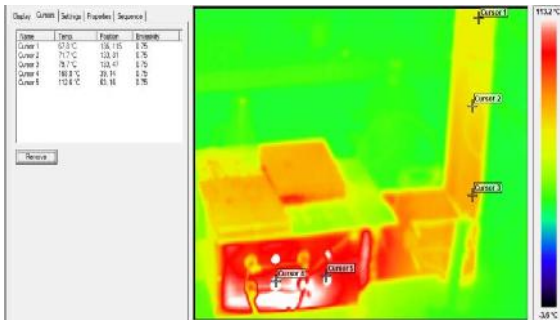
Temp. Heater (°C)	Tegangan (V)	Arus (mA)	Nomor Modul TEG
75	0,523	2,115	1
75			2
75			3
75			4
85	0,592	2,395	1
85			2
85			3
85			4
100	0,820	3,300	1
100			2
100			3
100			4

**Tabel 6.** Data hasil rata-rata pengujian *output* modul TEG secara Individual (tunggal)

Temp. Heater (°C)	Tegangan (V)	Arus (mA)	Nomor Modul TEG
75	0,094	0,380	1
75	0,161	0,650	2
75	0,221	0,895	3
75	0,231	0,934	4
85	0,125	0,503	1
85	0,207	0,835	2
85	0,275	1,112	3
85	0,284	1,147	4
100	0,134	0,543	1
100	0,222	0,894	2
100	0,288	1,165	3
100	0,281	1,133	4

Gambar 3 menunjukkan hasil distribusi energi panas yang diukur menggunakan alat *Thermograph* tipe IRSYS 4010 pada cerobong HRSG dan masing-masing letak posisi modul TEG dengan variasi temperatur kerja *heater* diatur 100°C. Dari gambar tersebut terlihat keterangan nilai temperatur dengan nama *cursor* 1 s.d 3 adalah distribusi termal permukaan cerobong HRSG pada letak posisi pemasangan masing-masing modul TEG nomor 1, 2 dan 3 sedangkan *cursor* 4 dan 5 adalah sumber penyedia panas dari 2 elemen *heater*. Distribusi termal terlihat menyebar ke seluruh permukaan HRSG, dimulai dari sumber panas *heater* dengan nilai temperatur 112.6°C, mengalir menuju bagian bawah cerobong (*cursor* 3) dengan temperatur 79.3°C, kemudian ke bagian

tengah cerobong (*cursor 2*) temperaturnya 71.7°C dan sampai ke bagian akhir cerobong yang paling atas mendekati arah keluarnya panas sisa gas buang HRSG dengan temperatur 67.8°C. Energi panas yang terdapat pada permukaan cerobong HRSG inilah yang digunakan untuk dikonversi menjadi energi listrik memanfaatkan modul TEG, serta untuk menganalisa penempatan posisi pemasangan modul TEG yang paling efektif dan efisien. Nilai temperatur area HRSG sangat dipengaruhi dari temperatur *output* dan posisi sumber panasnya, semakin tinggi temperatur *output* dan mendekati area sumber panas maka temperatur titik lokasi tersebut akan semakin tinggi sedangkan semakin rendah temperatur *output* yang dihasilkan serta menjauhi titik lokasi sumber panas maka temperatur pada lokasi tersebut akan menjadi lebih rendah, seperti yang telah diperlihatkan Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi termal cerobong HRSG

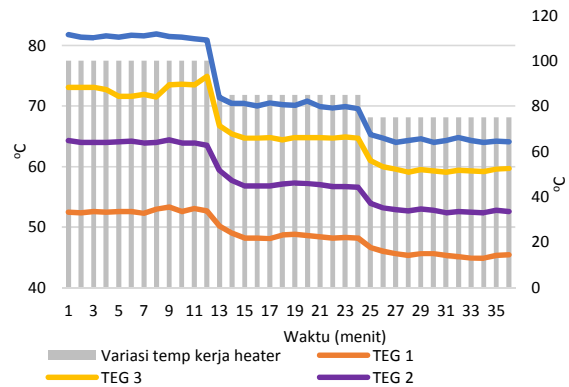
Hasil perhitungan yang menganalisa koefisien *seeback* dan daya listrik seluruh modul TEG ditunjukkan Tabel 7 dibawah ini.

Tabel 7. Data Hasil Perhitungan Koefisien *seeback* dan Daya Listrik berdasarkan posisi modul TEG

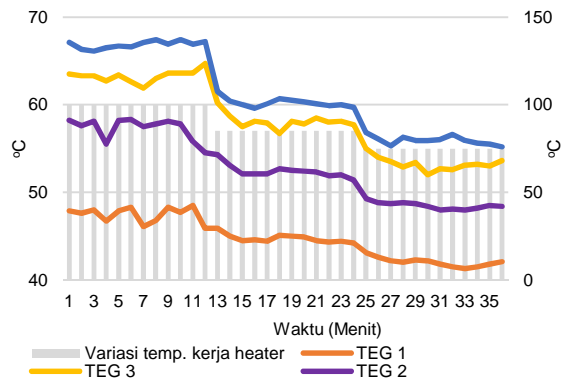
Temp. Heater (°C)	Koefisien Seeback (V/°C)	Daya Listrik (mW)	Nomor Modul TEG
75	0,094	0,03562	1
75	0,161	0,10448	2
75	0,221	0,19802	3
75	0,231	0,21566	4
85	0,125	0,06267	1
85	0,207	0,17234	2
85	0,275	0,30586	3
85	0,284	0,32601	4
100	0,134	0,07286	1
100	0,222	0,19810	2
100	0,288	0,33566	3
100	0,281	0,31783	4

Gambar 4 memperlihatkan hasil eksperimen berupa grafik perbandingan temperatur sisi panas seluruh titik lokasi pemasangan modul TEG 1 sampai dengan 4 terhadap variasi temperatur kerja

*heater* 75°C, 85°C dan 100°C. Nilai maksimum temperatur sisi panas rata-rata adalah 81.47°C pada modul TEG nomor 4 dengan variasi temperatur kerja *heater* 100°C. Hal ini disebabkan posisi pemasangan modul TEG nomor 4 berada paling dekat sumber panas *heater* HRSG. Semakin dekat posisi pemasangan modul TEG dari sumber panas maka penyerapan temperatur sisi panas yang diterima akan semakin tinggi, begitu juga dengan kondisi sebaliknya. Gambar 6 memperlihatkan grafik perbandingan temperatur sisi dingin modul TEG nomor 1 sampai dengan 4 yang dihubungkan dengan *heatsink* sebagai media pendingin modul TEG.



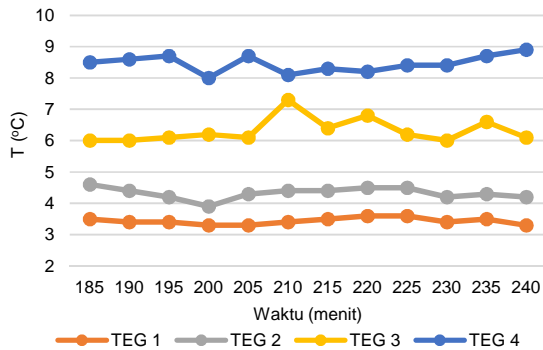
Gambar 4. Perbandingan temperatur sisi panas modul TEG 1 s.d 4



Gambar 5. Perbandingan temperatur sisi dingin modul TEG 1 s.d 4

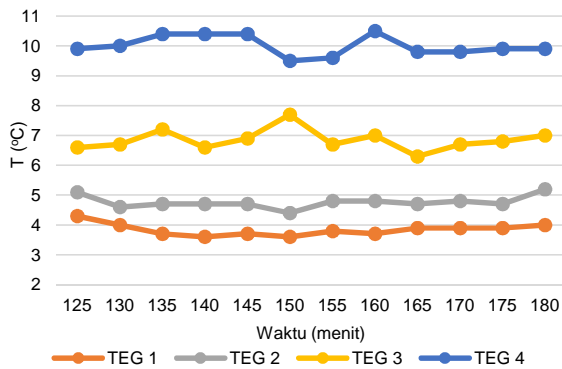
Gambar 6 menunjukkan hasil eksperimen berupa grafik perbandingan perbedaan temperatur ( *T* ) antara sisi panas dan sisi dingin berdasarkan posisi pemasangan modul TEG 1 sampai dengan 4 terhadap variasi temperatur kerja *heater* 75°C. Perbedaan temperatur adalah salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap kinerja modul TEG, semakin tinggi *T* maka semakin baik kinerja modul TEG sedangkan semakin kecil *T* maka semakin rendah juga kinerja modul TEG. Pada pola variasi uji ini, nilai rata-rata tertinggi perbedaan

temperatur adalah  $8.46^{\circ}\text{C}$  yang terjadi di posisi pemasangan modul TEG nomor 4.



**Gambar 6.** Grafik perbedaan temperatur ( T ) terhadap variasi temperatur kerja *heater*  $75^{\circ}\text{C}$

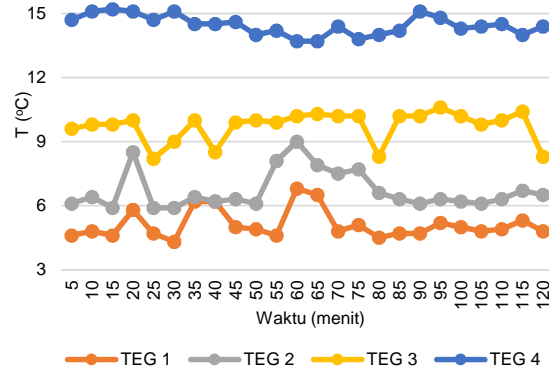
Gambar 7 memperlihatkan grafik perbandingan perbedaan temperatur ( T ) antara sisi panas dan sisi dingin berdasarkan posisi pemasangan modul TEG terhadap variasi temperatur kerja *heater*  $85^{\circ}\text{C}$ . Pada pola variasi uji ini, nilai rata-rata tertinggi perbedaan temperatur adalah  $10.01^{\circ}\text{C}$  yang juga terjadi di posisi pemasangan modul TEG nomor 4.



**Gambar 7.** Grafik perbedaan temperatur ( T ) terhadap variasi temperatur kerja *heater*  $85^{\circ}\text{C}$

Gambar 8 memperlihatkan grafik perbandingan perbedaan temperatur ( T ) antara sisi panas dan sisi dingin berdasarkan posisi pemasangan modul TEG terhadap variasi temperatur kerja *heater*  $100^{\circ}\text{C}$ . Pada pola variasi uji ini, nilai rata-rata tertinggi perbedaan temperatur adalah  $14.46^{\circ}\text{C}$  yang juga sama terjadi di posisi pemasangan modul TEG nomor 4 (posisi paling dekat dengan sumber panas HRSG). Hal ini disebabkan salah satunya dipengaruhi oleh temperatur dari sumber energi panas *heater* yang diterima seluruh bagian HRSG sehingga semakin tinggi temperatur sumber panas yang diberikan maka semakin besar juga nilai perbedaan

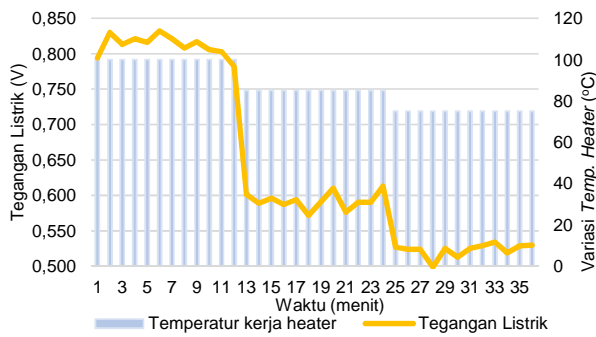
temperatur modul TEG sedangkan semakin kecil temperatur sumber panas yang diberikan maka semakin rendah juga perbedaan temperaturnya.



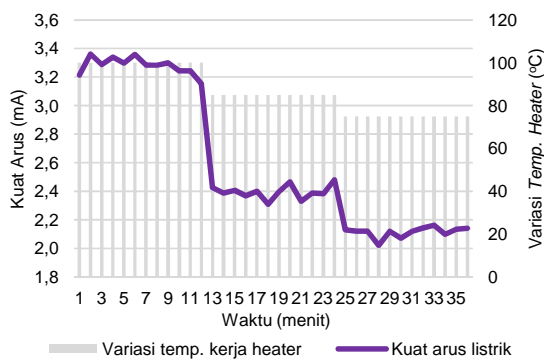
**Gambar 8.** Grafik perbedaan temperatur ( T ) terhadap variasi temperatur kerja *heater*  $100^{\circ}\text{C}$

Gambar 9 memperlihatkan grafik perbandingan tegangan listrik yang dihasilkan modul TEG serta disusun secara seri terhadap variasi temperatur *heater*  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $85^{\circ}\text{C}$  dan  $75^{\circ}\text{C}$ . Nilai tertinggi tegangan listrik adalah  $0.832\text{ V}$  atau  $832\text{ mV}$  pada variasi temperatur *heater* paling besar  $100^{\circ}\text{C}$ . Hal ini terjadi karena energi panas yang diterima modul TEG jauh lebih besar dari pada variasi temperatur *heater* yang lain. Gambar 11 adalah grafik perbandingan kuat arus secara seri, nilai tertinggi kuat arusnya adalah  $3.358\text{ mA}$  pada variasi temperatur *heater* masuk ke cerobong HRSG  $100^{\circ}\text{C}$ . Kondisi tersebut berbanding lurus terhadap tegangan yang dihasilkan modul TEG, dimana ketika tegangan naik maka kuat arus juga akan mengalami kenaikan, sedangkan jika tegangan turun maka kuat arus juga akan mengalami penurunan. Gambar 12 memperlihatkan daya listrik secara seri yang dihasilkan modul TEG terhadap variasi temperatur *heater* dengan nilai tertinggi daya listrik adalah  $2.794\text{ mW}$  pada kondisi temperatur *heater* maksimum  $100^{\circ}\text{C}$  sehingga menyebabkan kenaikan pada tegangan, arus serta daya listrik dibandingkan dengan kondisi temperatur *heater* yang lebih rendah ( $75^{\circ}\text{C}$  dan  $85^{\circ}\text{C}$ ).

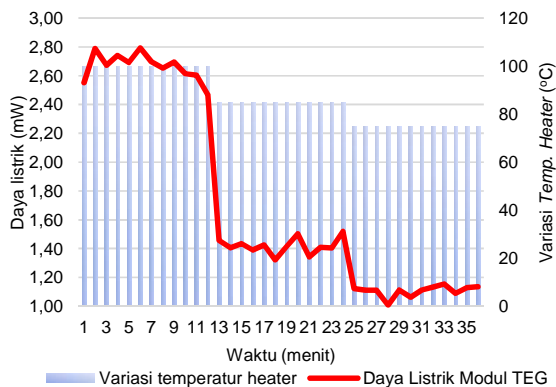
Semakin tinggi panas yang diberikan dari sumber panas (*heater*) maka semakin tinggi juga tegangan dan kuat arus yang akan dihasilkan oleh seluruh modul TEG sedangkan semakin kecil yang diberikan dari *heater*, semakin rendah juga tegangan dan kuat arus yang dihasilkan dari modul TEG.



**Gambar 9.** Perbandingan tegangan listrik secara seri



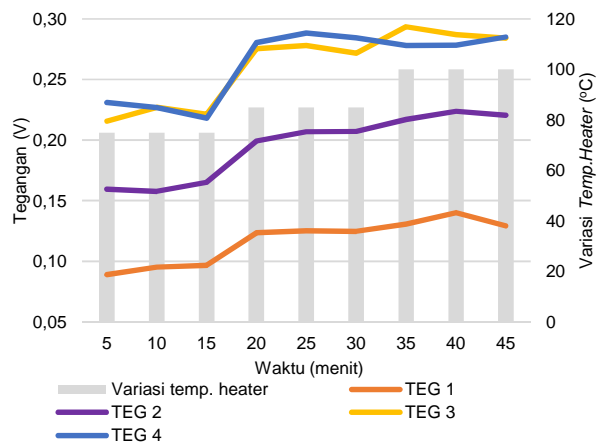
**Gambar 10.** Perbandingan kuat arus secara seri



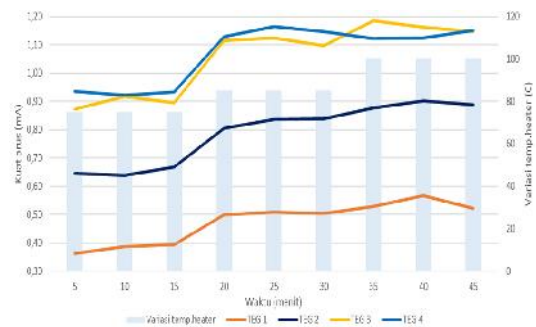
**Gambar 11.** Perbandingan daya listrik secara seri modul TEG 1 s.d 4

Gambar 12 dan 13 menunjukkan grafik perbandingan tegangan dan kuat arus listrik yang diproduksi setiap modul TEG secara individual (tunggal) sesuai dengan penempatan lokasi pemasangan modul TEG di cerobong HRSG. Nilai tertinggi tegangan dan kuat arus yang dihasilkan modul TEG nomor 3 yang dipasang pada bagian paling bawah cerobong HRSG yaitu 0,293 mV dan 1.19 mA. Gambar 14 memperlihatkan grafik daya listrik yang diproduksi masing-masing modul TEG.

Nilai paling tinggi daya listrik dihasilkan juga pada posisi pemasangan modul TEG nomor 3 yaitu 0.35 mW pada variasi temperatur heater 100°C. Hal ini dipengaruhi oleh TEG nomor 3 dipasang pada bagian bawah cerobong dan sejajar dengan arah aliran udara panas yang melewati cerobong menuju atmosfer, sehingga temperatur yang diterima pada area pemasangan modul TEG 3 lebih tinggi dibandingkan di lokasi yang lainnya. Selisih nilai produksi listrik antara modul TEG nomor 1 – 4 yang dipasang berbeda lokasinya adalah 0.08 sampai dengan 0.11 mW, semakin dekat lokasi pemasangan modul TEG terhadap sumber panas maka semakin tinggi penyerapan energi panas dari modul TEG sehingga menyebabkan peningkatan produksi yang akan dihasilkan. Berdasarkan hal tersebut, posisi paling efektif untuk memasang modul TEG di cerobong HRSG adalah pada lokasi paling bawah cerobong dibanding dipasang di tengah atau paling atas cerobong HRSG.

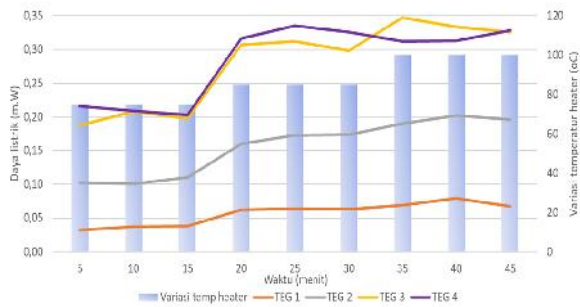


**Gambar 12.** Perbandingan tegangan individual modul TEG 1 s.d 4



**Gambar 13.** Perbandingan kuat arus individual modul TEG 1 s.d 4





**Gambar 14.** Perbandingan daya listrik individual modul TEG 1 s.d 4

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian panas sisa gas buang HRSG menjadi energi listrik menggunakan 4 (empat) modul TEG dan *heatsink* yang dipasang dengan posisi berbeda pada permukaan cerobong HRSG antara lain sisi bagian atas, tengah, bawah cerobong. Produksi listrik tertinggi dihasilkan modul TEG dengan sistem rangkaian seri adalah tegangan dan daya listrik masing-masing 0.83 V dan 2.79 mW serta tingkat efektivitas posisi pemasangan modul TEG yang paling besar terhadap tegangan, kuat arus dan daya listrik yang dihasilkan modul TEG adalah pemasangan modul TEG pada sisi bawah cerobong HRSG dengan nilai tegangan 0.293 mV, kuat arus 1.19 mA dan daya listrik 0.35 mW. Secara keseluruhan, jumlah produksi listrik yang dihasilkan modul TEG belum terlalu tinggi, namun pemanfaatan konversi panas sisa gas buang HRSG menjadi energi listrik ini dapat memperlihatkan salah satu alternatif aplikasi *green energy* untuk menghasilkan energi listrik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Azharuddin, Dalom, I. R. S. (2013). Rancang Bangun Alat Boiler Kondensor. *Austenit*, 5, 31–36.
- Balkrishan, Chand, S., Soni, A., Gupta, A., & Patel, N. K. (2016). A Review on Thermoelectric Cooler. *IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2(11), 674–679. (<http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV2111196.pdf>)
- Beni Kurniawan Saputra, M Ginting, S. W. (2016). Analisa Pengaruh Penggantian Material Tube Terhadap Kecepatan, Suhu Dan Tekanan Pada Lube Oil Cooler Untuk Pendingin Compressor 103 Di Pt Pusri. *Jurnal Austenit*, 8, 33–35.
- Bensaada, M. (2019). *Experimental Investigation of Thermal Effect on the Characteristic Behavior of Thermoelectric Generators: Applicable as a Power Source for Low Earth Orbit Satellites*.

- 28(4), 569–577. <https://doi.org/10.1134/S181023281904012X>
- Ding, L. C., Meyerheinrich, N., Tan, L., Rahaoui, K., Jain, R., & Akbarzadeh, A. (2017). Thermoelectric Power Generation from Waste Heat of Natural Gas Water Heater. *Energy Procedia*, 110(December 2016), 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.101>
- Gomaa, M. R., Murtadha, T. K., Abu-jrai, A., Rezk, H., Altarawneh, M. A., & Marashli, A. (2022). Experimental Investigation on Waste Heat Recovery from a Cement Factory to Enhance Thermoelectric Generation. *Sustainability*, 14(16), 10146. <https://doi.org/10.3390/su141610146>
- Gomaa, M. R., & Rezk, H. (2020). Passive cooling system for enhancement the energy conversion efficiency of thermo-electric generator. *Energy Reports*, 6, 687–692. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.11.149>
- He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., & Zhao, X. (2015). Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 143, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.075>
- Kunt, M. A., & Gunes, H. (2020). Comparing the recovery performance of different thermoelectric generator modules in an exhaust system of a diesel engine both experimentally and theoretically. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(1), 183–190. <https://doi.org/10.1177/0954407019837786>
- Lashin, A., Turkestani, M. Al, & Sabry, M. (2020). Performance of a thermoelectric generator partially illuminated with highly concentrated light. *Energies*, 13(14), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en13143627>
- Liu, J., Yadav, S., & Chul, S. (2022). Case Studies in Thermal Engineering Performance of a thermoelectric generator system for waste heat recovery utilizing plate fin heat sink in bronze ingot casting industry. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38(July), 102340. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102340>
- Mirmanto, M., Tira, H. S., & Pabriansyah, A. (2020). Effect of motorcycle exhaust pipe temperature and electrical circuit on harvested dc power from thermoelectric generators. *Dinamika Teknik Mesin*, 10(1), 41. <https://doi.org/10.29303/dtm.v10i1.319>
- Quan, R., Li, T., Yue, Y., Chang, Y., & Tan, B. (2020). Experimental study on a thermoelectric generator for industrialwaste heat recovery based on a hexagonal heat exchanger. *Energies*, 13(12), 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123137>

SAM, H. (2021). Design and Modeling of a Carbon Capturing Membrane for Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant. *Austin Chemical Engineering*, 8(1), 0–11. <https://doi.org/10.26420/austinchemeng.2021.1084>

Tohidi, F., Ghazanfari Holagh, S., & Chitsaz, A. (2022). Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Applied Thermal Engineering*, 201(PA), 117793. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>