



STUDI EKSPERIMENTAL ENERGI LISTRIK SISTEM *HYBRID* PANEL SURYA-TERMoeLEKTRIK GENERATOR

Ibnu Abiyu¹, Ayong Hiendro², Ismail Yusuf³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Tanjungpura Pontianak
d1021211088@student.untan.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan energi matahari melalui panel surya (*photovoltaic*/PV) merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan. Namun, peningkatan suhu pada permukaan panel surya dapat menurunkan kinerja sistem karena menyebabkan penurunan tegangan dan efisiensi keluaran. Energi panas yang terakumulasi pada panel surya tersebut umumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem *hybrid* panel surya-termoelektrik generator (TEG), meliputi karakteristik tegangan, arus, daya, energi listrik yang dihasilkan, serta pengaruh perbedaan suhu terhadap kinerja TEG. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dengan pengujian langsung di lapangan menggunakan panel surya monocrystalline 100 Wp yang dikombinasikan dengan 10 modul TEG tipe SP1848-27145 SA. Pengambilan data dilakukan pada rentang waktu pukul 07.00-17.00 WIB dengan parameter yang diukur meliputi suhu panel surya, suhu *heatsink*, tegangan, arus, daya, dan energi listrik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel surya menghasilkan energi listrik total sebesar 389,775 Wh, sedangkan sistem *hybrid* panel surya-TEG menghasilkan energi total sebesar 390,583 Wh. Penambahan TEG memberikan kontribusi energi tambahan sebesar 0,808 Wh atau sekitar 0,21% dibandingkan sistem panel surya tanpa TEG. Modul TEG menghasilkan rentang perbedaan suhu (ΔT) sebesar 5,1 °C hingga 10,7 °C. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin TEG, semakin besar daya listrik yang dihasilkan. Meskipun kontribusi energi TEG masih relatif kecil akibat rendahnya nilai ΔT yang terbentuk, integrasi TEG pada panel surya terbukti mampu menghasilkan energi listrik tambahan melalui pemanfaatan panas yang sebelumnya terbuang.

Kata Kunci: panel surya, termoelektrik generator, sistem *hybrid*, energi listrik, efek Seebeck

Article History

Received: September 2026
Reviewed: September 2026
Published: September 2026
Plagiarism Checker No: 235
Prefix DOI :
[10.8734/Kohesi.v1i2.365](https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365)

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under
a [Creative Commons
Attribution-NonCommercial
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Abstract

The utilization of solar energy through photovoltaic (PV) panels is one solution for utilizing environmentally friendly renewable energy. However, an increase in the operating temperature of solar panels can reduce system performance due to a decrease in voltage and output efficiency. The thermal energy accumulated in the solar panel is generally not optimally utilized. This study aims to analyze the performance of a hybrid solar panel-thermoelectric generator (TEG) system, including its voltage, current, power, and electrical energy characteristics, as well as the effect of temperature differences on the performance of the TEG. The research method used was an experimental method through direct field testing using a 100 Wp monocrystalline solar panel combined with 10 SP1848-27145 SA TEG modules. Data were collected from 07:00 to 17:00 WIB, with the measured parameters including panel temperature, TEG hot-side and cold-side temperatures, voltage, current, power, and electrical energy.

The results showed that the solar panel produced a total electrical energy of 389.775 Wh, while the hybrid solar panel-TEG system produced 390.583 Wh. The addition of TEG contributed an additional electrical energy of 0.808 Wh, equivalent to 0.21% compared to the solar panel system without TEG. The TEG module exhibited a temperature difference (ΔT) ranging from 5.1 °C to 10.7 °C. The test results also showed that a greater temperature difference between the hot and cold sides of the TEG resulted in greater electrical power output. Although the contribution of TEG was relatively small due to the limited ΔT , the integration of TEG into the solar panel system was proven to generate additional electrical energy by utilizing thermal energy that would otherwise be wasted.

Keywords: *photovoltaic, thermoelectric generator, hybrid system, electrical energy, Seebeck effect*

1. PENDAHULUAN

Matahari merupakan sumber energi utama yang mengeluarkan energi dalam bentuk cahaya dan panas secara banyak dan tanpa menghasilkan emisi. Secara geografis, Indonesia terletak di daerah tropis sehingga menerima sinar matahari yang cukup kuat sepanjang tahun, membuat negara ini memiliki peluang besar untuk dikembangkan menjadi sumber energi surya. *International Renewable Energy Agency (IRENA)* [1] menyatakan bahwa kapasitas teknis energi surya di Indonesia mencapai sekitar 207,8 gigawatt. Di sisi lain, kebutuhan listrik nasional terus naik, dan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyatakan bahwa tingkat elektrifikasi nasional sudah mencapai 99,83% pada akhir tahun 2024, dengan target 100% pada tahun 2025. Karena itu, penggunaan energi terbarukan menjadi cara penting untuk memastikan pasokan listrik yang terus berkelanjutan.

Penggunaan energi matahari dengan teknologi panel surya (*photovoltaic/PV*) semakin berkembang sebagai cara untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Panel surya bisa mengubah energi matahari menjadi listrik langsung, tetapi performanya sangat tergantung



pada suhu lingkungan dan suhu sekitar [2]. Energi panas yang tidak digunakan biasanya dibuang ke lingkungan. Oleh karena itu, dibuat pendekatan penggabungan panel surya dengan Generator Termoelektrik (TEG) sebagai sistem *hybrid* PV-TEG. TEG beroperasi berdasarkan efek Seebeck, yaitu kemampuan bahan untuk menghasilkan listrik karena adanya perbedaan suhu antara dua bagian yang berbeda. Dengan memanfaatkan perbedaan suhu yang terjadi karena panas dari panel surya, sistem *hybrid* PV-TEG memungkinkan energi panas diubah menjadi listrik tambahan, sehingga memaksimalkan penggunaan energi matahari.

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *hybrid* PV-TEG dapat memberikan peningkatan kinerja sistem, baik dari sisi daya keluaran maupun efisiensi, bergantung pada konfigurasi dan kondisi pengujian [4], [5]. Integrasi panel surya-TEG memungkinkan energi panas yang sebelumnya tidak termanfaatkan dapat digunakan, sehingga pemanfaatan energi matahari menjadi lebih optimal. Kinerja sistem ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis material TEG, konfigurasi rangkaian listrik (seri atau paralel), serta teknik pembuangan panas yang digunakan untuk menjaga perbedaan temperatur pada modul termoelektrik.

Berdasarkan pada latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan energi yang dihasilkan oleh matahari. Fokus pada penelitian ini dengan menganalisis pengaruh penambahan TEG terhadap tegangan, arus, daya dan energi sistem *hybrid*, menghitung daya listrik yang dihasilkan pada sistem dan panel surya, serta mengkaji pengaruh suhu terhadap kinerja TEG dalam menghasilkan listrik. Penelitian ini memberikan gambaran teknis mengenai karakteristik kinerja sistem *hybrid* PV-TEG berdasarkan kondisi pengujian yang dilakukan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis kinerja sistem *hybrid* panel surya-termoelektrik generator (TEG) melalui pengujian langsung terhadap sistem yang telah dirancang. Sistem menggunakan satu unit panel surya monocrystalline berkapasitas 100 Wp yang dikombinasikan dengan 10 modul TEG tipe SP1848-27145 SA. Parameter yang diamati meliputi temperatur panel surya, temperatur sisi panas dan sisi dingin TEG, tegangan, arus, daya, dan energi listrik.

Variabel penelitian meliputi perbedaan temperatur (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin TEG sebagai parameter termal, sedangkan parameter keluaran yang diamati meliputi tegangan, arus, daya, dan energi listrik. Pengambilan data dilakukan pada rentang waktu pukul 07.00-17.00 WIB. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi, yaitu pengujian panel surya, pengujian TEG, dan pengujian sistem *hybrid* panel surya-TEG.

Analisis data dilakukan untuk mengetahui kinerja panel surya, TEG, dan sistem *hybrid* berdasarkan parameter tegangan, arus, daya, dan energi listrik. Daya keluaran dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus, sedangkan energi listrik dihitung berdasarkan daya dan waktu pengujian. Selanjutnya, hubungan antara perbedaan temperatur (ΔT) dengan daya keluaran TEG dianalisis untuk mengetahui pengaruh perbedaan temperatur terhadap kinerja TEG.

Selain itu, perubahan kondisi temperatur selama pengujian diamati untuk mengetahui pengaruh ΔT terhadap kinerja TEG. Kondisi lingkungan selama pengujian juga menjadi pertimbangan dalam menginterpretasikan perubahan daya keluaran panel surya dan TEG. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem *hybrid* panel surya-termoelektrik generator berdasarkan daya dan energi listrik yang dihasilkan.

2.1 Energi Matahari

Energi matahari yang juga disebut energi surya adalah bentuk energi yang berasal langsung dari sinar matahari dalam bentuk panas dan cahaya. Energi ini dapat digunakan langsung atau diubah lagi menjadi bentuk energi lain yang lebih berguna, seperti listrik. Menggunakan energi matahari sebagai sumber listrik alternatif merupakan salah satu inovasi penting dalam bidang

energi yang bisa diperbarui. Selain tersedia dalam jumlah banyak, energi surya juga baik untuk lingkungan karena tidak menghasilkan emisi atau merusak ekosistem.

Salah satu hal penting dalam menggunakan energi matahari adalah iradiasi matahari, yaitu jumlah energi dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan tertentu dalam satu satuan luas, dan satuan yang digunakan adalah W/m^2 . Semakin besar tingkat radiasi yang diterima oleh panel surya, semakin banyak daya listrik yang dihasilkan, karena radiasi yang lebih tinggi akan menghasilkan tegangan dan arus keluaran yang lebih besar dari modul. Nilai iradiansi di Indonesia umumnya cukup tinggi, berkisar antara $4 \text{ kWh}/m^2$ hingga $5 \text{ kWh}/m^2$ per hari [9], menjadikannya wilayah yang sangat potensial untuk pemanfaatan energi surya. Namun, kondisi seperti bayangan, awan, atau orientasi panel yang tidak optimal dapat mengurangi intensitas radiasi yang diterima sehingga menurunkan daya keluaran.

2.2 Panel Surya

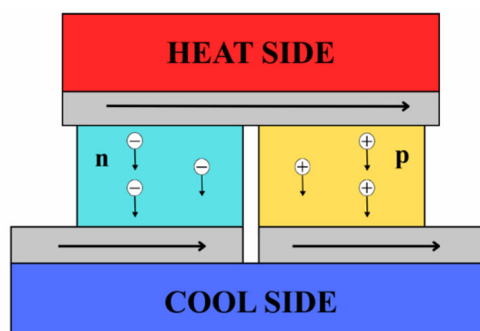
Panel surya merupakan alat yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Proses tersebut terjadi ketika foton cahaya matahari mengenai sel surya berbahan semikonduktor, sehingga elektron bergerak dan menghasilkan arus listrik searah [10]. Panel surya terdiri dari beberapa jenis, di antaranya *monocrystalline* dan *polycrystalline* [11]. Penelitian ini menggunakan panel surya jenis *monocrystalline* karena memiliki efisiensi yang relatif tinggi dalam memanfaatkan energi matahari. Panel surya *monocrystalline* yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Panel Surya

2.3 Termoelektrik Generator

Termoelektrik Generator (TEG) merupakan perangkat yang dapat mengubah energi panas menjadi energi listrik tanpa menggunakan bagian bergerak maupun fluida kerja. Prinsip kerjanya didasarkan pada efek Seebeck, yaitu timbulnya tegangan listrik akibat adanya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG. Prinsip kerja TEG ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Prinsip Kerja Termoelektrik Generator

teModul TEG terdiri dari pasangan semikonduktor tipe-n dan tipe-p yang menghasilkan energi listrik ketika terdapat perbedaan temperatur antara kedua sisinya. Besarnya daya listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh perbedaan temperatur, material semikonduktor, ukuran, dan susunan modul TEG. Bentuk fisik modul TEG yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Termoelektrik Generator

2.4 Pengaruh Temperatur pada Panel Surya dan TEG

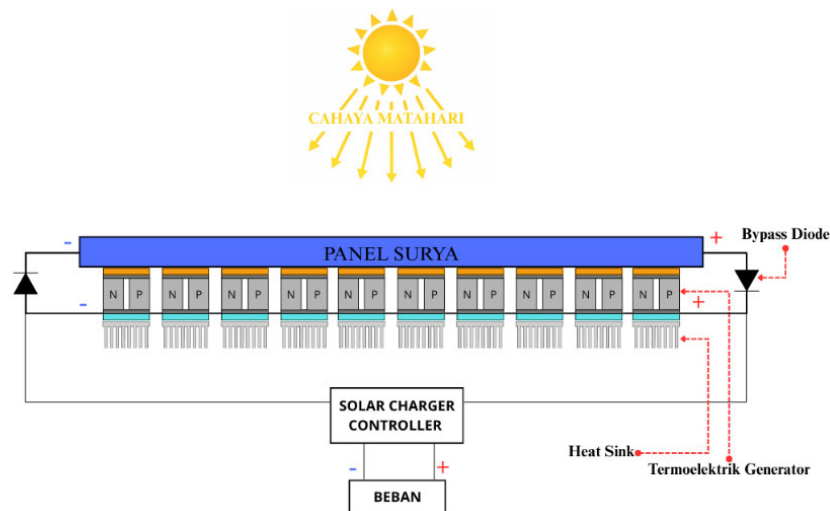
Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh temperatur. Peningkatan suhu permukaan panel surya akibat paparan sinar matahari dapat menyebabkan penurunan tegangan dan daya yang dihasilkan [12]. Kenaikan temperatur menyebabkan perubahan pada karakteristik semikonduktor sel surya sehingga tegangan keluaran mengalami penurunan. Oleh karena itu, meskipun intensitas radiasi matahari tinggi, peningkatan suhu panel dapat menyebabkan daya listrik yang dihasilkan menjadi lebih rendah.

Berbeda dengan panel surya, peningkatan temperatur dapat dimanfaatkan oleh termoelektrik generator (TEG) untuk menghasilkan energi listrik. TEG bekerja berdasarkan efek Seebeck, yaitu menghasilkan tegangan listrik akibat adanya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul [13]. Semakin besar perbedaan temperatur (ΔT) yang terjadi, semakin besar pula tegangan dan daya listrik yang dapat dihasilkan oleh TEG.

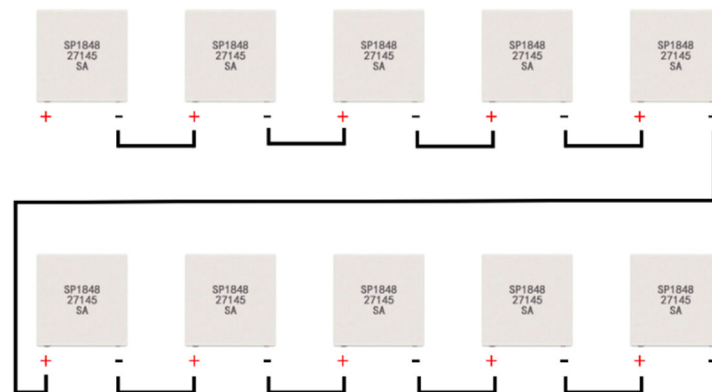
Pada sistem *hybrid* panel surya-TEG, panas yang terakumulasi pada permukaan panel surya dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas pada sisi panas TEG. Dengan demikian, panas yang sebelumnya tidak dimanfaatkan oleh panel surya dapat dikonversikan menjadi energi listrik tambahan melalui TEG. Pemanfaatan tersebut memungkinkan panas yang menjadi salah satu faktor penurunan kinerja panel surya untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi tambahan dalam sistem *hybrid*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian sistem *hybrid* panel surya-termoelektrik generator (TEG) dilakukan untuk mengetahui karakteristik keluaran sistem dalam menghasilkan energi listrik. Sistem *hybrid* menggunakan satu unit panel surya *monocrystalline* berkapasitas 100 Wp yang dikombinasikan dengan 10 modul TEG tipe SP1848-27145 SA. TEG memanfaatkan panas yang terserap pada permukaan panel surya untuk menghasilkan energi listrik tambahan berdasarkan efek Seebeck. Modul TEG ditempatkan pada bagian belakang panel surya dan dilengkapi *heatsink* pada sisi dingin untuk membantu pelepasan panas serta mempertahankan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin TEG. Susunan sistem *hybrid* panel surya dan TEG yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.

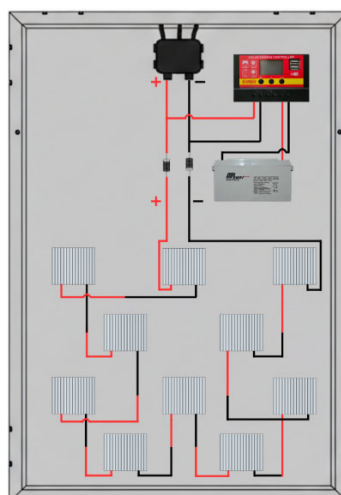


Gambar 4. Sistem Hybrid Panel Surya-Termoelektrik Generator



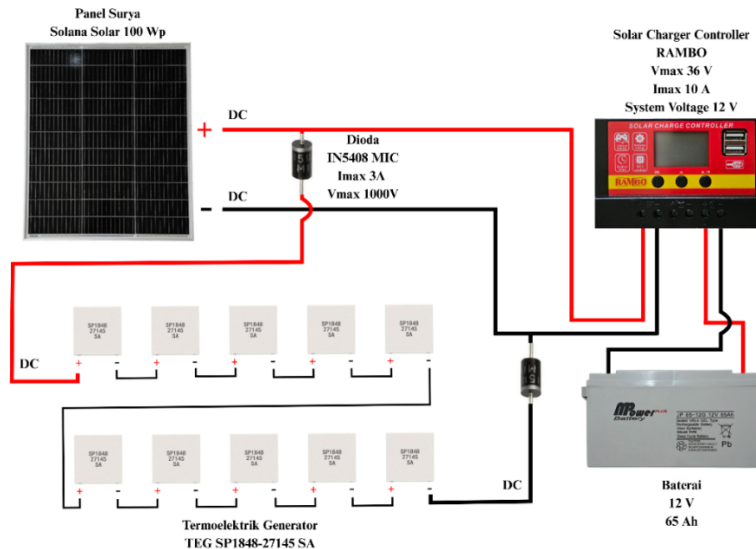
Gambar 5. Rangkaian Termoelektrik Generator

Selanjutnya, sebanyak 10 modul TEG disusun secara seri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Susunan tersebut digunakan untuk menghasilkan tegangan keluaran yang kemudian diintegrasikan dengan panel surya. Setelah rangkaian TEG disusun secara seri, rangkaian tersebut diparalelkan dengan panel surya dan dilengkapi dioda untuk mencegah terjadinya arus balik menuju TEG. Sistem juga menggunakan *solar charge controller* (SCC) sebelum energi listrik diteruskan menuju beban. Peletakan modul TEG pada sistem ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peletakan Termoelektrik Generator

Desain *Engineering Detail* (DED) sistem *hybrid* ditunjukkan pada Gambar 7. DED menyajikan konfigurasi teknis sistem yang terdiri dari satu panel surya *monocrystalline* 100 Wp dan 10 modul TEG SP1848-27145 SA yang disusun secara seri. Keluaran panel surya dan TEG digabungkan untuk membentuk sistem *hybrid*, kemudian dialirkan menuju *solar charge controller* dan baterai sebagai beban. Setiap modul TEG dilengkapi *heatsink* pada sisi dingin untuk menjaga perbedaan temperatur selama pengujian.



Gambar 7. Desain Engineering Detail Sistem Hybrid Panel Surya-TEG

3.1 Data Output Panel Surya

Pengujian panel surya dilakukan untuk mengetahui karakteristik keluaran berupa tegangan, arus, daya, dan energi listrik pada berbagai waktu pengujian. Berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus, daya dan energi listrik dihitung, kemudian hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Output Panel Surya

No	Waktu (Jam)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Energi (Wh)
1	7:00	12,15	0,81	9,842	4,921
2	7:30	12,23	1,12	13,698	6,849
3	8:00	12,31	1,51	18,588	9,294
4	8:30	12,44	1,91	23,760	11,88
5	9:00	12,56	2,41	30,270	15,135
6	9:30	12,68	2,49	31,573	15,787
7	10:00	12,79	3,28	41,951	20,976
8	10:30	12,87	3,49	44,916	22,458
9	11:00	13,04	3,38	44,075	22,038
10	11:30	13,01	3,84	49,958	24,979
11	12:00	13,05	4,16	54,288	27,144
12	12:30	13,09	4,18	54,716	27,358
13	13:00	13,12	4,29	56,285	28,143
14	13:30	13,1	4,19	54,889	27,445
15	14:00	13,03	3,99	51,990	25,995



16	14:30	12,98	3,82	49,584	24,792
17	15:00	12,91	3,47	44,798	22,399
18	15:30	12,82	3,15	40,383	20,192
19	16:00	12,7	2,1	26,67	13,335
20	16:30	12,53	1,79	22,429	11,215
21	17:00	12,4	1,2	14,88	7,44
Energi Total					389,775

Berdasarkan Tabel 1, daya keluaran panel surya mengalami perubahan selama waktu pengujian. Secara umum, daya meningkat dari pagi hingga siang hari dan kemudian menurun pada sore hari. Daya keluaran pada pukul 07:00 sebesar 9,842 W dan meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 56,285 W pada pukul 13:00. Setelah mencapai nilai maksimum, daya menurun hingga 14,880 W pada pukul 17:00.

3.2 Data Output Termoelektrik Generator

Pengujian termoelektrik generator menghasilkan data suhu sisi panas dan sisi dingin, serta tegangan pada berbagai waktu pengujian. Berdasarkan data tegangan dan suhu tersebut, daya dan energi dihitung dan seluruh hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Output Termoelektrik Generator

No	Waktu (Jam)	Suhu Panel (°C)	Suhu Heatsink (°C)	ΔT (°C)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Energi (Wh)
1	7:00	34,2	29,1	5,1	0,68	0,042	0,029	0,015
2	7:30	35,8	29,8	6	0,77	0,050	0,039	0,020
3	8:00	38,4	30,9	7,5	0,93	0,062	0,058	0,029
4	8:30	40,7	32,3	8,4	1,04	0,07	0,072	0,036
5	9:00	43,9	33,8	10,1	1,16	0,084	0,097	0,049
6	9:30	46,8	36,1	10,7	1,23	0,089	0,109	0,055
7	10:00	49,4	39,2	10,2	1,29	0,085	0,109	0,055
8	10:30	50,8	41,7	9,1	1,34	0,076	0,102	0,051
9	11:00	52,1	44	8,1	1,38	0,067	0,092	0,046
10	11:30	53,2	44,7	8,5	1,42	0,071	0,101	0,051
11	12:00	54,3	45,6	8,7	1,45	0,072	0,104	0,052
12	12:30	55,1	46,1	9	1,48	0,075	0,111	0,056
13	13:00	55,9	46,4	9,5	1,53	0,079	0,121	0,060
14	13:30	56,3	46,6	9,7	1,55	0,081	0,126	0,063
15	14:00	56,1	46,8	9,3	1,51	0,077	0,116	0,058
16	14:30	55,2	46,1	9,1	1,47	0,076	0,112	0,056
17	15:00	53,4	44,6	8,8	1,4	0,073	0,102	0,051
18	15:30	50,7	42,4	8,3	1,31	0,069	0,090	0,045
19	16:00	47,8	39,9	7,9	1,18	0,066	0,078	0,039
20	16:30	44,5	37,2	7,3	1,03	0,061	0,063	0,032
21	17:00	40,8	34,4	6,4	0,86	0,053	0,046	0,023
Energi Total								0,942

Berdasarkan data pada Tabel 2, tegangan keluaran modul termoelektrik generator (TEG) dipengaruhi oleh perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul. Dalam pengujian ini, perbedaan suhu ΔT berada antara 5,1 °C sampai 10,7 °C, sedangkan daya yang dihasilkan berkisar dari 0,029 W hingga 0,126 W. Daya terendah dicapai saat ΔT sebesar 5,1 °C, sedangkan



daya tertinggi dicapai saat ΔT sebesar $9,7^{\circ}\text{C}$.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan suhu, semakin banyak energi listrik yang dapat dihasilkan TEG. Hal ini sesuai dengan prinsip efek Seebeck, di mana perbedaan suhu antara dua sisi modul menciptakan perbedaan tegangan listrik sehingga menghasilkan arus dan daya keluaran.

3.3 Data Output Sistem Hybrid Panel Surya-Termoelektrik Generator

Pengujian sistem *hybrid* panel surya-termoelektrik generator (TEG) menghasilkan data tegangan, arus, dan suhu pada panel. Berdasarkan data tegangan dan arus tersebut, daya dan energi dapat dihitung dan seluruh hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Output *Hybrid* Panel Surya-Termoelektrik Generator

No	Waktu (Jam)	Suhu Panel ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu Heatsink ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Energi (Wh)
1	7:00	34,2	29,1	5,1	12,15	0,81	9,842	4,921
2	7:30	35,8	29,8	6	12,23	1,11	13,575	6,788
3	8:00	38,4	30,9	7,5	12,31	1,51	18,588	9,294
4	8:30	40,7	32,3	8,4	12,44	1,91	23,760	11,880
5	9:00	43,9	33,8	10,1	12,56	2,41	30,270	15,135
6	9:30	46,8	36,1	10,7	12,68	2,51	31,827	15,914
7	10:00	49,4	39,2	10,2	12,79	3,31	42,335	21,168
8	10:30	50,8	41,7	9,1	12,87	3,51	45,174	22,587
9	11:00	52,1	44	8,1	13,04	3,41	44,466	22,233
10	11:30	53,2	44,7	8,5	13,01	3,97	51,650	25,825
11	12:00	54,3	45,6	8,7	13,05	4,22	55,071	27,536
12	12:30	55,1	46,1	9	13,09	4,18	54,716	27,358
13	13:00	55,9	46,4	9,5	13,12	4,21	55,235	27,618
14	13:30	56,3	46,6	9,7	13,1	4,18	54,758	27,379
15	14:00	56,1	46,8	9,3	13,03	3,91	50,947	25,474
16	14:30	55,2	46,1	9,1	12,98	3,73	48,415	24,208
17	15:00	53,4	44,6	8,8	12,91	3,36	43,378	21,689
18	15:30	50,7	42,4	8,3	12,82	3,12	39,998	19,999
19	16:00	47,8	39,9	7,9	12,7	2,35	29,845	14,923
20	16:30	44,5	37,2	7,3	12,53	1,78	22,303	11,152
Energi Total								390,583

Berdasarkan data pada Tabel 3, daya yang dihasilkan oleh sistem *hybrid* berubah selama masa pengujian. Secara keseluruhan, output daya menunjukkan pola naik dari pagi sampai siang hari, lalu mulai turun hingga menjelang sore hari. Pola tersebut dipengaruhi oleh tingkat sinar matahari yang diterima oleh panel surya serta energi listrik tambahan yang dihasilkan oleh TEG.

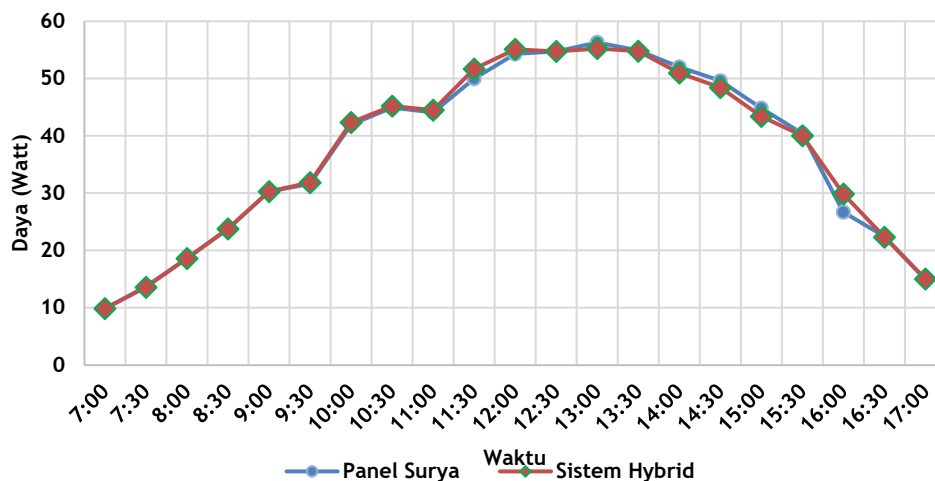
Pada pukul 07.00, sistem *hybrid* menghasilkan daya sebesar 9,842 W. Daya terus meningkat hingga mencapai 42,335 W pada pukul 10.00 dan nilai tertinggi sebesar 55,235 W pada pukul 13.00. Setelah itu, daya mulai menurun hingga mencapai 15,004 W pada pukul 17.00. Penurunan tersebut terjadi karena radiasi matahari yang diterima panel surya berkurang, sehingga daya yang dihasilkan panel surya dan TEG juga ikut menurun.

Berdasarkan hasil pengujian, daya rata-rata sistem *hybrid* sebesar 37,197 W, dengan daya tertinggi 55,235 W dan daya terendah 9,842 W. Total energi listrik yang dihasilkan selama pengujian adalah 390,583 Wh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem *hybrid* mampu menghasilkan energi listrik selama periode pengujian dengan memanfaatkan energi matahari melalui panel surya serta energi panas melalui TEG.



3.4 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan fokus penelitian yang telah dijelaskan di bagian latar belakang, analisis pada subbab ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak penambahan generator termoelektrik (TEG) terhadap karakteristik keluaran dari sistem *hybrid* panel surya dan TEG. Parameter yang dianalisis mencakup tegangan, arus, daya, serta energi listrik yang dihasilkan, serta dampak suhu terhadap efisiensi panel surya, TEG, dan sistem *hybrid* secara keseluruhan. Hubungan antara energi yang dihasilkan panel surya dan sistem *hybrid* yang menggabungkan panel surya dengan TEG terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Daya yang Dihasilkan pada Panel Surya dan Sistem Hybrid terhadap Waktu

Berdasarkan Gambar 10, terlihat bahwa pola perubahan daya pada sistem panel surya dan sistem *hybrid* panel surya-TEG memiliki kecenderungan yang sama, yaitu meningkat dari pagi hingga siang hari dan menurun pada sore hari. Pola tersebut menunjukkan bahwa keluaran kedua sistem dipengaruhi oleh perubahan kondisi penyinaran matahari yang diterima panel surya. Daya keluaran tertinggi pada kedua sistem terjadi pada rentang waktu sekitar pukul 12.00 hingga 13.30.

Secara umum, daya keluaran sistem *hybrid* memiliki nilai yang hampir sama dengan daya keluaran panel surya tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi daya yang diberikan oleh TEG relatif kecil dibandingkan dengan daya utama yang dihasilkan panel surya. Meskipun demikian, TEG tetap mampu menghasilkan energi listrik tambahan melalui pemanfaatan panas yang terserap pada permukaan panel surya melalui efek Seebeck.

Berdasarkan hasil perhitungan, panel surya menghasilkan energi total sebesar 389,775 Wh, sedangkan sistem *hybrid* menghasilkan energi total sebesar 390,583 Wh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan TEG memberikan peningkatan energi keluaran sistem sebesar 0,808 Wh atau sekitar 0,21% dari energi yang dihasilkan panel surya.

Kontribusi TEG yang rendah dipengaruhi oleh perbedaan suhu (ΔT) yang tidak terlalu besar selama pengujian. Nilai ΔT berada dalam rentang 5,1 °C sampai 10,7 °C, dengan daya rata-rata sebesar 0,089 Watt dan energi total sebesar 0,942 Wh. Selain itu, peningkatan suhu di bagian panas TEG juga menyebabkan peningkatan suhu *heatsink* di bagian dingin. Kondisi itu membuat pelepasan panas di sisi yang lebih dingin tidak berjalan dengan baik, sehingga perbedaan suhu yang terbentuk tidak terlalu besar.

Berdasarkan hasil pengujian daya TEG terhadap waktu, daya keluaran TEG juga mengalami kenaikan dan penurunan selama periode pengujian. Kenaikan daya terjadi ketika perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin meningkat. Sebaliknya, daya dapat mengalami penurunan ketika suhu pada sisi dingin atau *heatsink* ikut meningkat sehingga ΔT menjadi lebih kecil. Dengan demikian, perubahan daya TEG tidak hanya dipengaruhi oleh kenaikan suhu pada sisi panas, tetapi juga oleh kemampuan *heatsink* dalam melepaskan panas pada sisi dingin. Kondisi tersebut



menyebabkan daya keluaran TEG mengalami fluktuasi selama pengujian.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa TEG mampu menghasilkan energi listrik tambahan melalui pemanfaatan panas pada permukaan panel surya. Meskipun peningkatan energi yang diperoleh masih relatif kecil, integrasi TEG memberikan kontribusi tambahan sebesar 0,808 Wh terhadap energi keluaran sistem hybrid. Rendahnya kontribusi tersebut berkaitan dengan nilai ΔT yang terbatas akibat kenaikan suhu pada sisi dingin TEG.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, sistem *hybrid* panel surya-termoelektrik generator (TEG) berhasil menghasilkan energi listrik melalui pemanfaatan energi matahari dalam bentuk cahaya dan panas. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama, sedangkan TEG memanfaatkan panas yang terserap pada permukaan panel surya untuk menghasilkan energi listrik tambahan berdasarkan prinsip efek Seebeck. Selama periode pengujian, sistem *hybrid* mampu menghasilkan energi listrik total sebesar 390,583 Wh, yang menunjukkan bahwa integrasi panel surya dan TEG dapat bekerja sebagai sistem *hybrid* untuk menghasilkan energi listrik tambahan.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penambahan TEG memberikan kontribusi terhadap energi keluaran sistem *hybrid*. Panel surya tunggal menghasilkan energi total sebesar 389,775 Wh, sedangkan sistem *hybrid* menghasilkan energi sebesar 390,583 Wh. Dengan demikian, penambahan TEG memberikan tambahan energi sebesar 0,808 Wh atau sekitar 0,21% dibandingkan sistem panel surya tanpa TEG. Meskipun peningkatan yang diperoleh relatif kecil, hasil tersebut membuktikan bahwa energi panas yang sebelumnya terbuang masih dapat dimanfaatkan dan dikonversi menjadi energi listrik tambahan.

Selain itu, perbedaan suhu (ΔT) terbukti memengaruhi kinerja TEG dalam menghasilkan energi listrik. Pada penelitian ini, nilai ΔT yang terbentuk berada pada rentang 5,1 °C hingga 10,7 °C, dengan daya keluaran TEG berkisar antara 0,029 Watt hingga 0,126 Watt. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin cenderung meningkatkan daya yang dihasilkan TEG. Namun, perubahan daya tidak berlangsung secara terus-menerus karena peningkatan suhu pada sisi panas juga diikuti oleh kenaikan suhu *heatsink* pada sisi dingin. Kondisi tersebut menyebabkan nilai ΔT mengalami perubahan selama pengujian, sehingga daya keluaran TEG juga mengalami kenaikan dan penurunan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Capacity Statistics 2023," 2023. [Online]. Available: www.irena.org
- [2] N. M. Shatar *et al.*, "Performance Evaluation of Unconcentrated Photovoltaic-Thermoelectric Generator Hybrid System Under Tropical Climate," *J. Sustainability*, vol. 11, no. 22, p. 6192, 2019.
- [3] U. A. Saleh, M. A. Johar, S. A. Jumaat, M. N. Rejab, and W. A. W. Jamaludin, "Evaluation of a PV-TEG Hybrid System Configuration for an Improved Energy Output: A Review," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10, no. 2, pp. 385-400, 2021.
- [4] I. Bayusari, V. C. Ronting, A. Soraya, Caroline, Hermawati, and Rahmawati, "Performance Evaluation of a Hybrid Solar Panel and Thermoelectric Generator (TEG) System with Copper Plate Enhancement on the Hot Side," *International Journal of Mechanics, Energy Engineering and Applied Science (IJMEAS)*, vol. 3, no. 2, pp. 20-25, 2025.
- [5] R. Rifky, H. R. Murniawan, A. Fikri, M. Mujirudin, and A. Avorizano, "Hibridisasi Panel Surya Dengan Modul Termoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *J. Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, vol. 13, no. 1, pp. 108-123, 2023.



- [6] M. Rifal, N. S. Dera, and R. Pido, "Perancangan Prototype *Hybrid* Energi Antara Solar Cell dan Thermoelectric Generator (TEG)," *Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering*, vol. 3, no. 2, 2020.
- [7] E. D. Purba, M. R. Kirom, and R. F. Iskandar, "Analisis Pemanfaatan Energi Panas Pada Panel Surya Menjadi Energi Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 6, no. 2, p. 4977, 2019.
- [8] L. H. Putranto and S. I. Haryudo, "Pemanfaatan Solar Cell Dan Thermoelektrik Generator (TEG) Sebagai Sumber Energi Listrik Lampu Penerangan Jalan 50 Watt," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 877-883, 2020.
- [9] K. N. Alam, D. B. Santoso, and R. Rahmadewi, "Perancangan Sudut Panel Surya Untuk Sistem Solar Tracker Di Kabupaten Karawang Menggunakan Metode Simulasi PVsyst," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 2, pp. 280-288, Sep. 2023.
- [10] A. I. Ramadhan, E. Diniardi, and S. H. Mukti, "Analisis Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 50 WP," *J. Teknik*, vol. 37, no. 2, pp. 59-63, 2016.
- [11] A. Ashori, M. Z. F. Harapah, and A. Harijono, "Perbandingan Performansi Panel Surya Tipe Amorphous dan Polycrystalline terhadap Daya Pengisian Baterai Lithium-Ion pada Electric Scooter," *Jurnal Riset dan Konseptual*, vol. 7, no. 4, 2022.
- [12] H. S. Jaya, M. H. Rahmat, and A. Asrori, "Analisis Pengaruh Suhu Panel Surya Terhadap Output Panel Performance," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 42-51, Jan. 2024.
- [13] M. Diki, C. F. Hadi, R. F. Lestari, and R. Nalandari, "Pemanfaatan Termoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *Journal Zetroem*, vol. 4, no. 1, pp. 23-25, 2022.
- [14] P. Gunoto and S. Sofyan, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya 100 Wp Untuk Penerangan Lampu Di Ruang Selasar Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan," *Sigma Teknika*, vol. 3, no. 2, pp. 96-106, Nov. 2020.
- [15] M. I. M. Wardana, B. Y. Prasetyo, and L. M. Simbolon, "Kaji Eksperimental Termoelektrik Sebagai Penghasil Air Dengan Variasi Bentuk *Heatsink*," *J. Prosiding The 14th Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 14, no. 1, pp. 258-263, 2023.
- [16] B. R. Utomo, A. Sulistyanto, T. W. B. Riyadi, and A. T. Wijayanta, "Enhanced Performance of Combined Photovoltaic-Thermoelectric Generator and *Heatsink* Panels with a Dual-Axis Tracking System," *J. Energies*, vol. 16, no. 6, 2023.