

Implementasi Sistem *Hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator* sebagai Sumber Energi Listrik pada Kapal Nelayan

Faiq Rasyad Hazami¹, Maulidiah Rahmawati²

¹SMA Islam Sabilillah Malang Boarding School, ²Politeknik Pelayaran Surabaya
Korespondensi, maulidiah@poltekpel-sby.ac.id

Received: May 2026; Accepted: May 2026; Published: May 2026

DOI: 10.30649/je.v7i2.162

Abstrak

Kebutuhan energi listrik pada kapal nelayan masih didominasi oleh generator berbahan bakar fosil yang menyebabkan tingginya konsumsi bahan bakar dan emisi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem *Hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator* (PV–TEG) sebagai sumber energi listrik tambahan pada kapal nelayan dengan memanfaatkan energi surya dan panas buangan mesin diesel kapal. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif melalui perancangan *prototype* sistem *hybrid* yang terdiri dari *photovoltaic* 20 WP, empat modul *thermoelectric* generator tipe SP1848-27145-SA, *buck-boost converter*, dan baterai 12 V. Pengujian dilakukan secara langsung pada kapal nelayan bermesin diesel di wilayah Laut Suramadu, Surabaya selama dua skenario pengujian lapangan dengan durasi pengamatan 6 jam per hari mulai pukul 09.00–15.00 WIB. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan *photovoltaic*, tegangan *thermoelectric* generator, beda temperatur (ΔT), dan daya keluaran sistem *hybrid*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *photovoltaic* menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 20.00 V pada pengujian hari ke-1 dan 20.63 V pada pengujian hari ke-2. *Thermoelectric* generator menghasilkan tegangan maksimum sebesar 6.3 V pada kondisi beda temperatur 47.3°C. Implementasi sistem *hybrid* berhasil meningkatkan daya keluaran sistem dari 14.46 W menjadi 17.28 W pada pengujian hari ke-1 atau meningkat sebesar 19.50%, sedangkan pada pengujian hari ke-2 daya meningkat dari 41.15 W menjadi 48.72 W atau meningkat sebesar 18.40%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi *photovoltaic* dan *thermoelectric generator* mampu meningkatkan kontinuitas suplai energi listrik kapal nelayan melalui pemanfaatan *waste heat* mesin diesel dan energi surya secara simultan.

Kata kunci: *photovoltaic, thermoelectric generator, hybrid renewable energy, kapal nelayan, waste heat recovery*

Abstract

Electrical energy systems on small-fishing-vessels are still predominantly dependent on fossil-fuel-based generators, resulting in high fuel consumption and environmental emissions. This study aims to implement a hybrid photovoltaic–thermoelectric generator (PV–TEG) system as an additional electrical energy source for fishing-vessels by utilizing solar energy and diesel engine waste heat. The research employed a quantitative experimental approach through the development of a hybrid prototype consisting of a 20 WP photovoltaic module, four SP1848-27145-SA thermoelectric generator modules, a buck-boost converter, and a 12 V

battery. Field testing was conducted on a diesel-powered fishing-vessel in the Suramadu coastal area, Surabaya, under two experimental scenarios with a 6-hour observation period from 09:00 to 15:00 WIB. The evaluated parameters included photovoltaic voltage, thermoelectric generator voltage, temperature difference (ΔT), and hybrid system output power. The results showed that the photovoltaic system produced an average voltage of 20.00 V during the first test and 20.63 V during the second test. The thermoelectric generator achieved a maximum output voltage of 6.3 V at a temperature difference of 47.3°C. The implementation of the hybrid PV-TEG system increased output power from 14.46 W to 17.28 W during the first test, representing a 19.50% improvement, while during the second test the output power increased from 41.15 W to 48.72 W, corresponding to an 18.40% improvement. These findings demonstrate that the integration of photovoltaic and thermoelectric generator systems can improve the continuity of electrical power supply on fishing-vessels through simultaneous utilization of solar energy and diesel engine waste heat.

Key words: photovoltaic, thermoelectric generator, hybrid renewable energy, fishing- vessel, waste heat recovery

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik pada sektor maritim terus mengalami peningkatan seiring berkembangnya aktivitas pelayaran, sistem navigasi, komunikasi, dan kebutuhan operasional kapal nelayan skala kecil hingga menengah. Di sisi lain, sebagian besar kapal nelayan tradisional di Indonesia masih bergantung pada generator berbahan bakar fosil sebagai sumber utama energi listrik, sehingga menyebabkan tingginya konsumsi bahan bakar, biaya operasional, dan emisi karbon di lingkungan laut [1]. Pemanfaatan energi terbarukan pada sistem kelistrikan kapal menjadi salah satu pendekatan yang mulai dikembangkan untuk mendukung transisi energi berkelanjutan pada sektor maritim [2]. Teknologi *photovoltaic* (PV) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling banyak diterapkan karena memiliki konstruksi sederhana, biaya perawatan relatif rendah, dan mampu menghasilkan energi listrik secara langsung melalui konversi radiasi matahari [3]. Namun demikian, performa sistem *photovoltaic* pada aplikasi kapal sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas iradiasi matahari, kondisi cuaca, orientasi panel, serta temperatur permukaan modul

yang berubah secara dinamis selama operasi pelayaran. Kondisi tersebut menyebabkan kestabilan daya keluaran sistem *photovoltaic standalone* masih menjadi tantangan dalam implementasi sistem energi listrik pada kapal nelayan skala kecil [4], [5].

Beberapa penelitian terbaru telah mengembangkan sistem *hybrid renewable energy* untuk meningkatkan kontinuitas suplai daya dan efisiensi pemanfaatan energi pada aplikasi maritim [2], [6]. Integrasi *photovoltaic* dengan sumber energi tambahan seperti *fuel cell*, baterai, maupun *thermoelectric generator* (TEG) dilaporkan mampu meningkatkan reliabilitas sistem pembangkit listrik berbasis energi terbarukan [7], [8], [9]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada simulasi sistem hybrid atau aplikasi pada bangunan dan kendaraan darat, sedangkan implementasi *thermoelectric generator* pada kapal nelayan masih relatif terbatas [6], [9]. Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya menggunakan sumber panas buatan atau sistem pemanas eksternal untuk menghasilkan perbedaan temperatur pada TEG, sehingga belum secara optimal memanfaatkan waste heat dari mesin diesel kapal sebagai sumber energi termal [10].

Padahal, sistem pendinginan mesin diesel kapal menghasilkan energi panas terbuang yang cukup besar dan berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi tambahan melalui mekanisme konversi termoelektrik [11]. Oleh karena itu, masih terdapat research gap terkait implementasi sistem *hybrid photovoltaic–thermoelectric* generator berbasis pemanfaatan panas buangan mesin kapal dan pendinginan alami air laut pada kapal nelayan skala kecil.

Secara konseptual, thermoelectric generator bekerja berdasarkan efek *Seebeck*, yaitu fenomena munculnya beda potensial listrik akibat adanya perbedaan temperatur pada dua sisi material semikonduktor [12], [13], [14]. Pada sistem *hybrid photovoltaic–thermoelectric generator*, energi listrik dihasilkan melalui dua mekanisme konversi energi yang berbeda, yaitu konversi radiasi matahari menjadi energi listrik pada photovoltaic dan konversi energi panas menjadi energi listrik pada TEG. Integrasi kedua sistem tersebut memungkinkan pemanfaatan energi matahari dan energi panas terbuang secara simultan untuk meningkatkan total daya keluaran sistem [15], [16]. Dalam penelitian ini, sisi panas TEG diperoleh dari air panas hasil sistem pendinginan mesin diesel kapal, sedangkan sisi dingin diperoleh dari sirkulasi air laut sehingga terbentuk perbedaan temperatur yang digunakan untuk menghasilkan tegangan listrik tambahan. Tegangan keluaran dari photovoltaic dan TEG kemudian diintegrasikan melalui konfigurasi *hybrid DC* dan distabilkan menggunakan *buck-boost converter* sebelum digunakan untuk proses pengisian baterai kapal. Pendekatan ini dipilih karena mampu memanfaatkan potensi energi terbuang yang selama ini belum digunakan secara optimal pada sistem kelistrikan kapal nelayan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan menganalisis kinerja sistem *hybrid photovoltaic–thermoelectric*

generator sebagai sumber energi listrik pada kapal nelayan menggunakan metode eksperimental. Prototype sistem terdiri atas photovoltaic 20 WP, *thermoelectric generator* tipe SP1848-27145 SA, *buck-boost converter*, dan baterai penyimpanan energi. Pengujian dilakukan pada kapal nelayan bermesin diesel untuk mengevaluasi karakteristik tegangan, pengaruh beda temperatur terhadap keluaran TEG, serta peningkatan daya sistem hybrid dibandingkan *photovoltaic standalone* pada berbagai kondisi cuaca.

Novelty utama pada penelitian ini terletak pada implementasi langsung sistem *hybrid photovoltaic–thermoelectric generator* pada kapal nelayan dengan memanfaatkan waste heat dari sistem pendinginan mesin diesel dan air laut sebagai media pendingin alami TEG. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang sebagian besar masih menggunakan sumber panas eksternal atau pendekatan simulasi, penelitian ini mengembangkan *prototype hybrid renewable energy* berbasis kondisi operasional nyata pada lingkungan maritim. Kontribusi penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif pengembangan sistem energi listrik kapal berbasis *renewable energy* yang lebih efisien, sederhana, dan aplikatif untuk kapal nelayan skala kecil. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi awal dalam pengembangan teknologi energy harvesting maritim berbasis *integrasi photovoltaic* dan *thermoelectric generator* pada sistem kelistrikan kapal di masa mendatang.

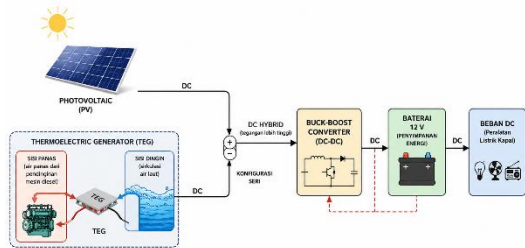
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif untuk menganalisis performa sistem *Hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator* (PV–TEG) pada kapal nelayan berdasarkan karakteristik tegangan, daya keluaran, dan pengaruh

perbedaan temperatur terhadap kinerja TEG. Penelitian meliputi perancangan sistem, integrasi perangkat keras, pengujian lapangan pada kapal nelayan bermesin diesel, serta analisis performa sistem hybrid dibandingkan *photovoltaic standalone*.

2.1. Konfigurasi Sistem Hybrid PV-TEG

Sistem yang dikembangkan terdiri atas *photovoltaic* (PV), *thermoelectric generator* (TEG), *buck-boost converter*, baterai, dan beban DC seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Photovoltaic digunakan sebagai sumber energi utama, sedangkan TEG memanfaatkan perbedaan temperatur antara air panas hasil pendinginan mesin diesel kapal dan sirkulasi air laut untuk menghasilkan energi listrik tambahan. Tegangan keluaran PV dan TEG dihubungkan secara seri dan distabilkan menggunakan *buck-boost converter* sebelum digunakan untuk proses charging baterai 12 V, sehingga sistem tetap mampu menghasilkan suplai daya tambahan pada kondisi cuaca berawan atau mendung.



Gambar 1. Diagram blok sistem hybrid photovoltaic–thermoelectric generator pada kapal nelayan.

2.2. Parameter dan Spesifikasi Sistem

Parameter utama sistem hybrid photovoltaic–thermoelectric generator yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1. Thermoelectric generator tipe SP1848-27145 SA dipilih karena memiliki kemampuan konversi termal yang lebih baik pada temperatur

tinggi dibandingkan modul termoelektrik konvensional. Empat modul TEG dirangkai secara seri untuk meningkatkan tegangan keluaran sistem termoelektrik.

Tabel 1. Parameter Sistem Hybrid PV-TEG

Komponen	Spesifikasi
Jenis photovoltaic	Polycrystalline
Kapasitas photovoltaic	20 WP
Tegangan maksimum PV (Vmp)	17.2 V
Arus maksimum PV (Imp)	1.18 A
Tegangan open circuit PV (Voc)	21.6 V
Jenis TEG	SP1848-27145 SA
Jumlah modul TEG	4 modul
Tegangan TEG pada ΔT 40°C	1.8 V/modul
Buck-boost converter output	14.2 V
Tegangan baterai	12 V
Jenis baterai	Lead-acid battery
Beban	Lampu DC
Lokasi pengujian	Laut Suramadu, Surabaya

2.3. Prinsip Kerja Sistem

Kinerja sistem thermoelectric generator didasarkan pada efek Seebeck, yaitu fenomena munculnya beda potensial akibat adanya perbedaan temperatur antara dua sisi material semikonduktor. Tegangan keluaran TEG dapat dinyatakan menggunakan Persamaan (1):

$$V_{TEG} = \alpha \Delta T \tag{1}$$

dengan:

V_{TEG} = tegangan keluaran thermoelectric generator (V),

α = koefisien Seebeck,

ΔT = perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin (°C).

Daya listrik keluaran sistem dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$P = V \times I \tag{2}$$

dengan:

P = daya listrik (W),
 V = tegangan keluaran (V),
 I = arus keluaran (A).

Untuk mengevaluasi peningkatan performa sistem hybrid terhadap photovoltaic standalone digunakan persentase peningkatan daya sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3):

$$\eta_{imp} = \frac{P_{hybrid} - P_{PV}}{P_{PV}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan:

η_{imp} = peningkatan performa (%),

P_{hybrid} = daya keluaran sistem hybrid (W),

P_{PV} = daya keluaran photovoltaic standalone (W).

2.4. Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan secara langsung pada kapal nelayan bermesin diesel di wilayah Laut Suramadu, Surabaya selama dua tahap pengujian dengan durasi 6 jam setiap pengujian mulai pukul 09.00–15.00 WIB. Parameter yang diukur meliputi tegangan *photovoltaic*, *thermoelectric generator*, tegangan hybrid, temperatur sisi panas dan dingin TEG, beda temperatur (ΔT), kondisi cuaca, dan daya keluaran sistem menggunakan termometer digital dan multimeter digital DC. Pada sistem TEG, sisi panas berasal dari air pendingin mesin diesel kapal, sedangkan sisi dingin menggunakan sirkulasi air laut secara kontinu.

2.5. Skenario Pengujian

Penelitian dilakukan melalui tiga skenario pengujian, yaitu karakteristik *photovoltaic standalone*, karakteristik *thermoelectric generator* berdasarkan variasi beda temperatur, dan pengujian sistem *hybrid photovoltaic–thermoelectric generator* pada kondisi operasional kapal nelayan. Pengujian dilakukan untuk

menganalisis pengaruh kondisi cuaca terhadap tegangan photovoltaic, hubungan beda temperatur terhadap tegangan TEG, serta peningkatan daya sistem hybrid dibandingkan *photovoltaic standalone*.

2.6. Teknik Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan membandingkan performa photovoltaic standalone dan sistem hybrid PV–TEG. Analisis dilakukan terhadap: rata-rata tegangan keluaran, daya keluaran sistem, hubungan beda temperatur terhadap tegangan TEG, dan persentase peningkatan daya sistem hybrid.

Data hasil pengukuran kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah interpretasi karakteristik sistem. Analisis engineering dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kondisi cuaca, stabilitas temperatur, dan pemanfaatan *waste heat* mesin diesel terhadap performa sistem *hybrid renewable energy* pada kapal nelayan.

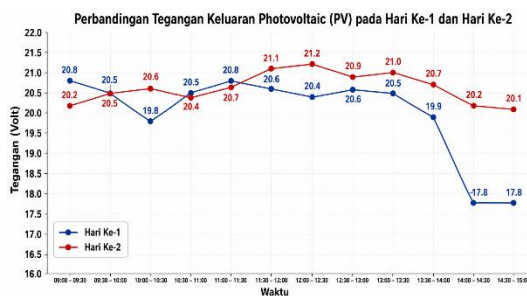
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Tegangan Photovoltaic

Pengujian karakteristik photovoltaic dilakukan untuk menganalisis kestabilan tegangan keluaran panel surya pada kondisi operasional kapal nelayan. Pengambilan data dilaksanakan selama 6 jam mulai pukul 09.00–15.00 WIB pada dua skenario pengujian dengan kondisi cuaca yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa photovoltaic sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan kondisi cuaca selama proses pengambilan data berlangsung.

Pada pengujian hari ke-1, photovoltaic menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 20.00 V dengan tegangan maksimum sebesar 20.8 V dan tegangan minimum sebesar 17.8 V. Penurunan

tegangan terjadi ketika kondisi cuaca berubah menjadi mendung pada pukul 14.00–15.00 WIB. Sementara itu, pada pengujian hari ke-2 dengan kondisi cuaca dominan cerah, photovoltaic menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 20.63 V dengan tegangan maksimum sebesar 21.2 V dan tegangan minimum sebesar 20.1 V. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kestabilan tegangan photovoltaic pada kondisi cuaca cerah lebih baik dibandingkan kondisi cuaca tidak menentu.



Gambar 2. Perbandingan tegangan keluaran photovoltaic pada pengujian hari ke-1 dan hari ke-2.

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa karakteristik tegangan photovoltaic pada pengujian hari ke-2 cenderung lebih stabil dibandingkan pengujian hari ke-1. Pada kondisi mendung, tegangan photovoltaic mengalami penurunan sebesar 3.0 V atau sekitar 14.42% dibandingkan kondisi tegangan maksimum.

$$\% \Delta V = \frac{20.8 - 17.8}{20.8} \times 100\% \approx 14.42\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa photovoltaic standalone memiliki keterbatasan dalam menjaga kestabilan suplai daya ketika intensitas iradiasi matahari menurun. Secara teoritis, kondisi tersebut terjadi karena penurunan intensitas cahaya menyebabkan jumlah elektron bebas yang dihasilkan oleh material semikonduktor photovoltaic berkurang sehingga tegangan keluaran sistem ikut menurun. Temuan ini memperkuat kebutuhan integrasi sumber

energi tambahan melalui thermoelectric generator untuk meningkatkan kontinuitas suplai energi listrik pada kapal nelayan.

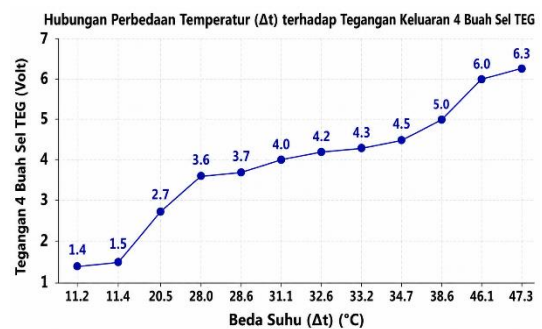
3.2. Karakteristik Thermoelectric Generator (TEG)

Pengujian thermoelectric generator dilakukan untuk menganalisis hubungan antara perbedaan temperatur (ΔT) dan tegangan keluaran TEG. Pada penelitian ini, sisi panas thermoelectric generator diperoleh dari air panas hasil pendinginan mesin diesel kapal, sedangkan sisi dingin diperoleh dari sirkulasi air laut secara kontinu.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan beda temperatur memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan tegangan keluaran thermoelectric generator. Pada kondisi beda temperatur tertinggi sebesar 47.3°C, TEG menghasilkan tegangan sebesar 6.3 V. Sebaliknya, pada kondisi beda temperatur terendah sebesar 11.2°C, tegangan yang dihasilkan hanya sebesar 1.4 V.

Pada Gambar 3 terlihat bahwa tegangan keluaran thermoelectric generator meningkat seiring bertambahnya beda temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul TEG. Peningkatan beda temperatur sebesar 36.1°C menghasilkan peningkatan tegangan sebesar 4.9 V atau sekitar 350%.

$$\% \Delta V_{TEG} = \frac{6.3 - 1.4}{1.4} \times 100\% \approx 350\%$$



Gambar 3. Hubungan perbedaan temperatur terhadap tegangan keluaran thermoelectric generator.

Karakteristik tersebut sesuai dengan prinsip efek *Seebeck* dimana gradien temperatur pada material termoelektrik menghasilkan beda potensial listrik. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa kestabilan temperatur sisi panas sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional mesin diesel kapal. Ketika temperatur air pendingin mesin meningkat akibat putaran mesin yang lebih tinggi, tegangan keluaran thermoelectric generator juga meningkat secara signifikan.

Dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan sumber panas buatan atau heater eksternal, penelitian ini menunjukkan bahwa *waste heat* mesin diesel kapal dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber energi termal tambahan. Pendekatan tersebut memberikan keuntungan praktis karena tidak memerlukan tambahan konsumsi energi eksternal untuk menghasilkan sumber panas pada sistem thermoelectric generator.

3.3. Analisis Kinerja Sistem Hybrid PV-TEG

Implementasi sistem *hybrid photovoltaic-thermoelectric* generator menunjukkan peningkatan performa dibandingkan photovoltaic standalone pada seluruh skenario pengujian. Integrasi photovoltaic dan thermoelectric generator menghasilkan tegangan hybrid yang lebih stabil sehingga mampu meningkatkan daya keluaran sistem secara keseluruhan.

Pada pengujian hari ke-1, sistem photovoltaic standalone menghasilkan daya rata-rata sebesar 14.46 W, sedangkan sistem hybrid PV-TEG menghasilkan daya sebesar 17.28 W. Dengan demikian, terjadi peningkatan daya sebesar 2.82 W atau sekitar 19.50%.

$$\eta_{imp} = \frac{17.28 - 14.46}{14.46} \times 100\% \approx 19.50\%$$

Sementara itu, pada pengujian hari ke-2 photovoltaic standalone menghasilkan daya rata-rata sebesar 41.15 W, sedangkan sistem hybrid menghasilkan daya sebesar 48.72 W. Hasil tersebut menunjukkan peningkatan daya sebesar 7.57 W atau sekitar 18.40%.

$$\eta_{imp} = \frac{48.72 - 41.15}{41.15} \times 100\% \approx 18.40\%$$

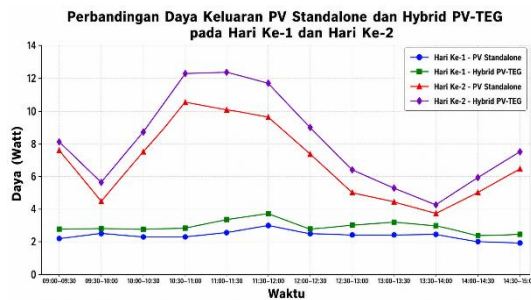
Ringkasan hasil pengujian sistem hybrid ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan performa photovoltaic standalone dan sistem hybrid PV-TEG.

Parameter	Hari ke-1	Hari ke-2
Daya photovoltaic standalone	14.46 W	41.15 W
Daya sistem hybrid	17.28 W	48.72 W
Selisih daya	2.82 W	7.57 W
Persentase peningkatan	19.50%	18.40%

Untuk memperjelas perbandingan performa sistem, hasil daya keluaran *photovoltaic standalone* dan sistem hybrid ditunjukkan pada Gambar 4.

Seperti terlihat pada Gambar 4, bahwa sistem hybrid secara konsisten menghasilkan daya lebih besar dibandingkan *photovoltaic standalone* pada seluruh skenario pengujian. Konsistensi peningkatan daya pada rentang 18–19% menunjukkan bahwa thermoelectric generator mampu memberikan kontribusi tambahan terhadap suplai energi listrik kapal nelayan, terutama ketika kondisi cuaca menyebabkan penurunan performa photovoltaic.



Gambar 4. Perbandingan daya keluaran photovoltaic standalone dan sistem hybrid PV–TEG.

3.4. Pembahasan dan Kontribusi Penelitian

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi sistem hybrid photovoltaic–thermoelectric generator berhasil meningkatkan performa sistem pembangkit listrik pada kapal nelayan dibandingkan photovoltaic standalone. Temuan ini mendukung konsep *hybrid renewable energy* dimana integrasi beberapa sumber energi mampu meningkatkan kontinuitas suplai daya dan mengurangi ketergantungan terhadap satu sumber energi utama.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada implementasi langsung *thermoelectric generator* berbasis *waste heat recovery* pada kapal nelayan menggunakan kondisi operasional nyata di lingkungan maritim. Berbeda dengan sebagian besar penelitian sebelumnya yang masih menggunakan simulasi atau sumber panas eksternal, penelitian ini memanfaatkan panas buangan aktual dari sistem pendinginan mesin diesel kapal dan pendinginan alami air laut untuk menghasilkan gradien temperatur pada modul TEG. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa energi panas terbuang pada kapal masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi listrik tambahan.

Selain memberikan kontribusi praktis terhadap pengembangan *renewable energy* maritim, penelitian ini juga menunjukkan bahwa performa thermoelec-

tric generator sangat dipengaruhi oleh kestabilan temperatur sisi panas. Oleh karena itu, optimasi sistem pendinginan dan pengaturan aliran fluida panas menjadi faktor penting untuk meningkatkan efisiensi sistem hybrid pada penelitian selanjutnya.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Kapasitas photovoltaic dan thermoelectric generator yang digunakan masih relatif kecil sehingga daya keluaran sistem hybrid belum mampu digunakan sebagai sumber daya utama seluruh beban kelistrikan kapal. Selain itu, penelitian ini belum mengintegrasikan sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) maupun sistem monitoring otomatis berbasis data logging sehingga optimasi performa sistem belum dapat dilakukan secara real-time.

Untuk pengembangan berikutnya, penelitian dapat diarahkan pada peningkatan kapasitas photovoltaic dan thermoelectric generator, penerapan MPPT berbasis kontrol cerdas, integrasi sistem monitoring IoT, serta optimasi thermal management untuk meningkatkan perbedaan temperatur pada thermoelectric generator. Dengan pengembangan tersebut, sistem hybrid renewable energy berbasis *photovoltaic–thermoelectric generator* berpotensi menjadi salah satu alternatif sumber energi listrik ramah lingkungan pada kapal nelayan skala kecil di masa mendatang.

IV. SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem *Hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator* (PV–TEG) sebagai sumber energi listrik tambahan pada kapal nelayan dengan memanfaatkan energi surya dan waste heat dari sistem pendinginan mesin diesel kapal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa photovoltaic dipengaruhi oleh kondisi

cuaca, dimana tegangan mengalami penurunan hingga 14.42% pada kondisi mendung. Sementara itu, thermoelectric generator menunjukkan hubungan yang sebanding terhadap perbedaan temperatur, dengan tegangan maksimum sebesar 6.3 V diperoleh pada kondisi beda temperatur 47.3°C.

Implementasi sistem hybrid PV–TEG terbukti mampu meningkatkan daya keluaran dibandingkan *photovoltaic stand-alone* pada seluruh skenario pengujian. Pada pengujian hari ke-1, daya sistem meningkat dari 14.46 W menjadi 17.28 W atau meningkat sebesar 19.50%, sedangkan pada pengujian hari ke-2 daya meningkat dari 41.15 W menjadi 48.72 W atau meningkat sebesar 18.40%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa integrasi photovoltaic dan thermoelectric generator mampu meningkatkan kontinuitas suplai energi listrik kapal nelayan melalui kombinasi konversi energi surya dan pemanfaatan panas buangan mesin diesel berdasarkan prinsip efek Seebeck.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada kapasitas sistem yang relatif kecil dan belum dilengkapi dengan MPPT maupun monitoring otomatis berbasis data logging. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada optimasi thermal management, peningkatan kapasitas sistem hybrid, integrasi kontrol cerdas berbasis MPPT, serta pengembangan sistem monitoring real-time berbasis IoT untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem renewable energy pada kapal nelayan.

V. RUJUKAN

- [1] M. Issa, A. Ilinca, and F. Martini, “Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 21, p. 7910, 2022.
- [2] O. B. Inal, J.-F. Charpentier, and C. Deniz, “Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111965, 2022.
- [3] S. Al-Ali, A. G. Olabi, and M. Mahmoud, “A review of solar photovoltaic technologies: developments, challenges, and future perspectives,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 27, p. 101057, 2025.
- [4] W. Yang, B. Wang, W. Ke, S. Shen, and X. Wu, “Research on photovoltaic power generation characteristics of small ocean observation unmanned surface vehicles,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 15, p. 3699, 2024.
- [5] O. Bamisile, C. Acen, D. Cai, Q. Huang, and I. Staffell, “The environmental factors affecting solar photovoltaic output,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 208, p. 115073, 2025.
- [6] N. Vahabzad, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Anvari-Moghaddam, “Modeling hybrid energy systems for marine applications: Hybrid electric ships,” in *Hybrid Technologies for Power Generation*, Elsevier, 2022, pp. 419–437.
- [7] Z. Wehbi, R. Taher, J. Faraj, C. Castelain, and M. Khaled, “Hybrid thermoelectric generators-renewable energy systems: A short review on recent developments,” *Energy Rep.* 8 (2022) 1361–1370.”
- [8] Z. Zamanipour, S. K. Thallapelly, and S. M. S. Pirmahalleh, “Advances in the performance of hybrid photovoltaic-thermoelectric generators: a review,” *Future Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 1–11, 2024.
- [9] U. A. Saleh, M. A. Johar, S. A. B. 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.
- [10] H. Kwon, S. Park, W. Song, and W. Kim, “Optimization of thermoelectric systems for maximum power generation based on

- heat-source and heat-sink conditions,” *J. Appl. Phys.*, vol. 136, no. 15, 2024.
- [11] G. Konstantinou, T. Kyratsi, and L. S. Louca, “Design of a thermoelectric device for power generation through waste heat recovery from marine internal combustion engines,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 11, p. 4075, 2022.
- [12] M. Martín-González and O. Caballero-Calero, “Thermoelectric generators as an alternative for reliable powering of wearable devices with wasted heat,” *J. Solid State Chem.*, vol. 316, p. 123543, 2022.
- [13] R. Aridi, J. Faraj, S. Ali, T. Lemenand, and M. Khaled, “Thermoelectric power generators: state-of-the-art, heat recovery method, and challenges,” *Electricity*, vol. 2, no. 3, pp. 359–386, 2021.
- [14] A. Kompatscher and M. Kemerink, “On the concept of an effective temperature Seebeck ratchet,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, no. 2, 2021.
- [15] M. A. I. Khan *et al.*, “An experimental and comparative performance evaluation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system,” *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 722514, 2021.
- [16] A. Z. Sahin, K. G. Ismaila, B. S. Yilbas, and A. Al-Sharafi, “A review on the performance of photovoltaic/thermoelectric hybrid generators,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 5, pp. 3365–3394, 2020.