# Optimalisasi Prototipe Desalinasi Non-Invasif Tenaga Surya Menggunakan Sistem Desalinasi Hibrida (Fotovoltaik-Termoelektrik) untuk Produksi Air Bersih Off-Grid di Daerah

**Roy Lamrun Sianturi[1], Rinaldo Hasudungan Malau[2], Tiara Melinda[3]**
[1, 2,3] Universitas Negeri Medan
roysianturi@unimed.ac.id

**Abstract**

Access to clean water in remote coastal areas of Indonesia requires autonomous and sustainable desalination solutions. This study aims to optimize a prototype of a non-invasive solar desalination system by integrating hybrid Photovoltaic-Thermoelectric (PV-TE) technology for off-grid clean water production. A pilot-scale unit was developed from a baseline passive solar still by incorporating photovoltaic panels and dual-function thermoelectric modules that serve as waste heat recovery units and active condenser coolants. Test results demonstrate significant performance enhancement, with conductivity removal efficiency reaching 99.83% and producing very pure water (80 µS/cm). Water productivity increased exponentially by 1148%, from 0.50 L/day.m² in the baseline prototype to 6.24 L/day.m² in the hybrid system, while overall energy conversion efficiency reached 29.05%. These findings confirm that the strategic integration of PV-TE components not only overcomes the productivity limitations of passive solar desalination but also offers an autonomous, low-environmental-impact desalination solution. This research contributes to the development of decentralized water infrastructure replicable in sun-rich coastal communities.

**Keyword:** Hybrid Desalination; PV-TE; Solar Energy; Off-grid; Clean Water; Coastal Area.

**Abstrak**

Akses terhadap air bersih di wilayah pesisir Indonesia yang terpencil membutuhkan solusi desalinasi yang mandiri dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan prototipe sistem desalinasi tenaga surya non-invasif dengan mengintegrasikan teknologi hibrida Fotovoltaik-Termoelektrik (PV-TE) untuk produksi air bersih off-grid. Unit skala pilot dikembangkan dari prototipe dasar distilasi surya pasif melalui penambahan panel fotovoltaik dan modul termoelektrik yang berfungsi ganda sebagai pemulih panas buang dan pendingin aktif kondensor. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan, dimana efisiensi penghilangan konduktivitas mencapai 99,83% dengan kualitas air sangat murni (80 µS/cm). Produktivitas air meningkat secara eksponensial sebesar 1148%, dari 0,50 L/hari.m² pada prototipe dasar menjadi 6,24 L/hari.m² pada sistem hibrida, dengan efisiensi konversi energi sistem mencapai 29,05%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa integrasi strategis komponen PV-TE tidak hanya mengatasi keterbatasan produktivitas pada desalinasi surya pasif, tetapi juga menawarkan solusi desalinasi otonom yang rendah dampak lingkungan. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan infrastruktur air mandiri yang dapat direplikasi di komunitas pesisir dengan intensitas matahari melimpah.

**Kata Kunci:** Desalinasi Hibrida; PV-TE; Energi Surya; Off-grid, Air Bersih; Pesisir.

## 1. PENDAHULUAN

Krisis kelangkaan air bersih secara global berdampak akut di wilayah pesisir dan kepulauan, termasuk Indonesia, di mana lebih dari 15 juta penduduk pesisir (setara dengan

17,2% rumah tangga) belum memiliki akses air bersih layak [1],[2]. Tekanan antropogenik dan perubahan iklim memperburuk kondisi ini, sehingga mendesak pengembangan solusi desalinasi yang berkelanjutan dan ekonomis, khususnya untuk sistem off-grid yang sesuai dengan karakteristik daerah terpencil [3]. Teknologi konvensional seperti Reverse Osmosis (RO), meski mendominasi pasar global, memiliki keterbatasan mendasar berupa ketergantungan energi fosil yang tinggi, biaya operasional dan pemeliharaan mahal, serta dampak ekologis negatif dari limbah brine hipersalin, sehingga kurang aplikatif untuk implementasi di daerah pesisir terpencil [4-6] . Sementara itu, teknologi desalinasi surya pasif, meski menawarkan keunggulan keberlanjutan dan kemudahan perawatan, masih memiliki kelemahan pada laju produktivitas air yang rendah [7]. Fenomena ini mempertegas urgensi inovasi teknologi yang mampu menyeimbangkan parameter efisiensi energi, kelayakan ekonomi, dan minimalisasi dampak lingkungan.

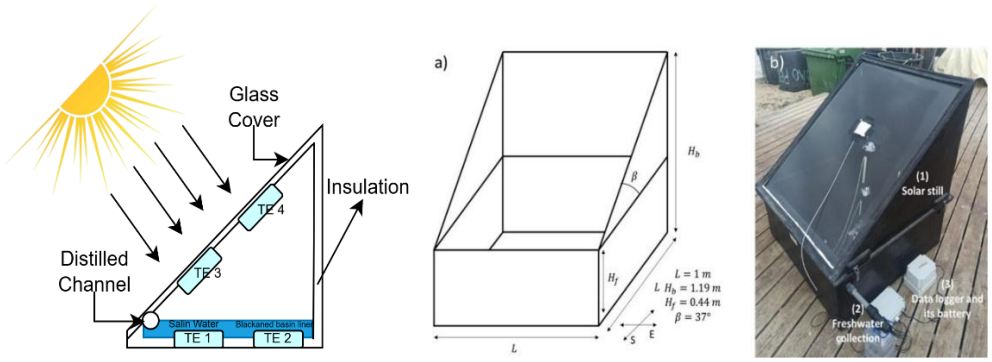
Studi ini mengusulkan optimasi prototipe sistem desalinasi non-invasif bertenaga surya melalui pendekatan hibrid Fotovoltaik-Termoelektrik (PV-TE). Sistem ini bertujuan mengoptimalkan pemanfaatan spektrum energi matahari secara integral: panel fotovoltaik mengonversi cahaya menjadi listrik, sedangkan modul termoelektrik memanfaatkan gradien panas untuk menghasilkan daya tambahan sekaligus meningkatkan proses pendinginan dan kondensasi[8]. Sinergi ini diproyeksikan mampu meningkatkan efisiensi konversi energi dan produktivitas air secara signifikan dibandingkan model desalinasi surya pasif standar. Pendekatan ini selaras dengan tren peningkatan performa melalui modifikasi desain dan integrasi komponen hibrid yang telah dieksplorasi sebelumnya [9,10]. Namun, penelitian ini memberikan penekanan khusus pada konfigurasi yang bersifat modular, mudah dipasang secara off-grid, dan non-invasif terhadap ekosistem pesisir, sebagai respons terhadap karakteristik infrastruktur dan fluktuasi permintaan air bersih di wilayah tersebut [11].

Tujuan penelitian ini adalah mengoptimasi desain dan kinerja prototipe sistem desalinasi hibrid PV-TE untuk produksi air bersih off-grid yang efisien dan berkelanjutan di daerah pesisir. Kebaruan (novelty) penelitian terletak pada strategi integrasi dan optimasi sinergi modul PV dan TE dalam satu unit sistem desalinasi surya yang kompak dan non-invasif, dengan fokus pada pemanfaatan energi termal untuk peningkatan laju kondensasi dan manajemen energi yang adaptif. Melalui optimalisasi ini, penelitian diharapkan menghasilkan solusi yang rendah emisi, mudah dioperasikan, dan minim perawatan, sehingga dapat berkontribusi langsung pada ketahanan air masyarakat pesisir terpencil dan menjaga integritas ekosistem laut dari dampak limbah desalinasi konvensional.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Pengembangan Prototipe Sistem Hibrid (Fotovoltaik-Termoelektrik)

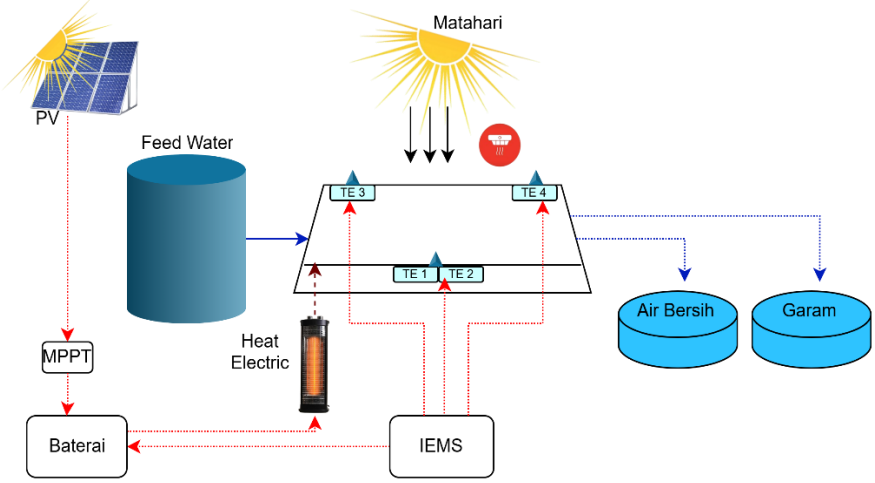
Penelitian ini mengembangkan sistem desalinasi dalam dua tahap. Tahap pertama adalah pembuatan prototipe dasar (baseline) distilasi surya pasif konvensional dengan variasi tinggi chamber (40, 80, dan 160 cm) untuk menentukan konfigurasi terbaik. Hasil uji menunjukkan unit setinggi 40 cm menghasilkan produktivitas tertinggi (0,45–0,50 L/hari.m$^2$) dan dipilih sebagai acuan. Prototipe ini terdiri dari basin fiberglass berpigmen hitam, penutup kaca dengan kemiringan 37°, dan sistem sensor untuk memantau suhu serta konduktivitas.




**Gambar 1.** Desain Protype Sistem desalinasi Hibrid (Fotovoltaik-Termoelektrik)

## 2.2. Integrasi dan Konfigurasi Komponen Fotovoltaik-Termoelektrik

Pada tahap kedua, prototipe dasar dioptimasi menjadi unit skala pilot dengan mengintegrasikan sistem hibrida Fotovoltaik-Termoelektrik (PV-TE). Modul Fotovoltaik (PV) berfungsi sebagai pembangkit listrik utama untuk menggerakkan pompa sirkulasi dan sistem kendali. Sementara itu, Modul Termoelektrik (TEG) diintegrasikan dengan dua fungsi strategis. Pertama, sebagai generator listrik tambahan dengan menempelkan sisi panasnya pada plat absorber atau pipa air panas untuk memulihkan energi termal terbuang (waste heat recovery) melalui Efek Seebeck. Kedua, dan yang utama, sebagai pendingin aktif kondensor dengan menempatkan susunan TEG yang diaktifkan secara listrik (dari PV dan TEG itu sendiri) pada bagian atas permukaan kaca kondensasi. Posisi ini, dilengkapi heat sink pada sisi dingin TEG, secara langsung menciptakan zona bersuhu sangat rendah (Efek Peltier) di area tempat uap terkondensasi, sehingga secara drastis meningkatkan gradien suhu dan laju pengembunan. Konfigurasi ini menjadikan TEG sebagai komponen kunci yang secara simultan meningkatkan efisiensi konversi energi dan mempercepat siklus produksi air.

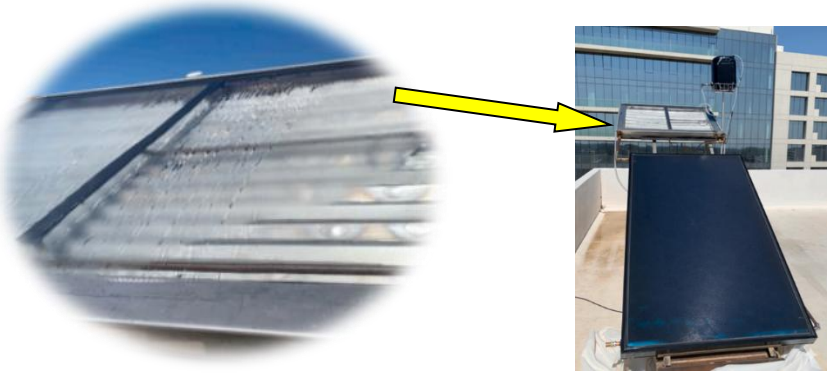



**Gambar 2.** Prinsip Kerja Destilasi Hibrid (Fotovoltaik-Termoelektrik)

## 2.3. Rancangan Eksperimen dan Prosedur Pengujian

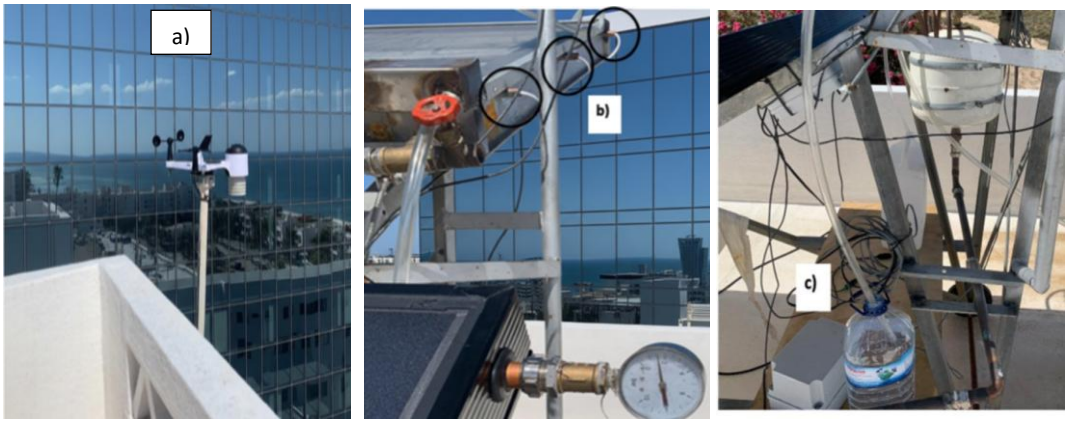
Pengujian dilakukan dalam dua fase. Fase pertama (Oktober 2025) adalah pengujian prototipe dasar untuk memperoleh data baseline kinerja. Fase kedua (November 2025–Januari 2026) adalah pengujian unit skala pilot hibrida yang terintegrasi penuh, baik di

lokasi laboratorium maupun di lapangan (pesisir Belawan). Parameter yang diukur mencakup variabel input (radiasi matahari, suhu ambient), kinerja sistem (produktivitas air, kualitas air), serta performa komponen hibrida (output listrik PV dan TEG, konsumsi daya). Data dari sensor dan pengambilan sampel air dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas sistem.



**Gambar 3.** Unit skala pilot akhir dengan modul desalinasi hybrid dengan kondensasi air pada penutup kaca.

Stasiun meteorologi yang berdekatan (Fine Offset, WH2650) dipasang di lokasi percobaan untuk memantau suhu atmosfer, radiasi matahari, dan arah serta kecepatan angin (Gambar 4).




**Gambar 4.** (a) Stasiun cuaca, (b) sensor suhu dan konduktivitas pada panel desalinasi dan (c) koneksi kotak kontrol untuk pemantauan online melalui GSM.

## 2.4. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menghitung efisiensi penghilangan garam, produktivitas harian spesifik, dan efisiensi konversi energi sistem hibrida secara keseluruhan. Analisis korelasi statistik digunakan untuk mengkuantifikasi hubungan antara produktivitas dengan radiasi matahari dan suhu operasi. Perbandingan kinerja antara prototipe dasar dan unit pilot hibrida dilakukan untuk mengisolasi dan membuktikan kontribusi signifikan dari integrasi komponen termoelektrik dalam peningkatan performa sistem desalinasi.

**Tabel 1.** Metodologi analitik yang digunakan dalam karakterisasi air.

| Parameter | Satuan | Metode | Ketakpastian |
|---|---|---|---|
| Konduktivitas listrik | µS/cm | Elektrometri SMEWW 2510B | 3% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Salinitas | g/L | Refraktometri | ND |

[ND] Tidak ditentukan.

### 2.5. Kinerja Sistem

Berdasarkan metode Isah et al. [12], efisiensi termal dan konversi sistem dievaluasi untuk menilai kinerja unit skala pilot. Efisiensi termal mengukur perolehan panas air relatif terhadap radiasi matahari masukan, sementara efisiensi konversi mencakup efisiensi termal dan proses desalinasi secara keseluruhan. Dalam karya ini, efisiensi konversi ditentukan menggunakan persamaan (2) dan (3) yang diberikan, memungkinkan perhitungan efisiensi sistem berdasarkan parameter eksperimental.

$$Q = m \times H_{fg} \quad (1)$$

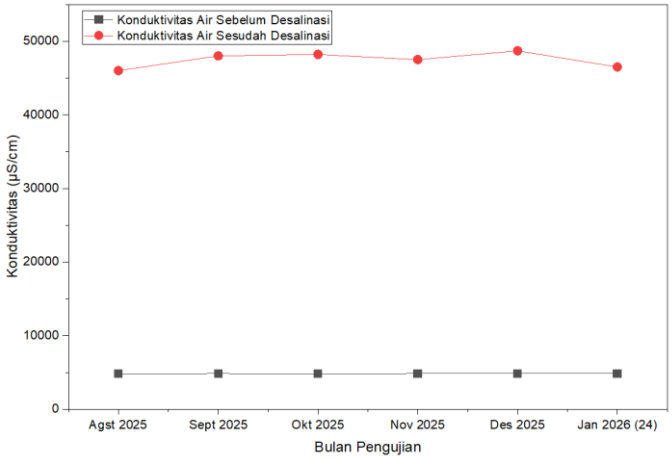
$$\eta = \frac{Q}{IA} \times 100 \quad (2)$$

Persamaan (1) menyatakan bahwa energi yang digunakan oleh fluida (Q) sama dengan hasil perkalian massa air yang menguap (m), diukur dalam kg, dan panas penguapan air laut ($H_{fg}$), diberikan dalam kJ/kg dan disesuaikan dengan air dan salinitas eksperimental. Persamaan (2) mendefinisikan efisiensi sistem ($\eta$) sebagai rasio total panas bermanfaat yang diperoleh oleh fluida (Q) terhadap hasil perkalian intensitas radiasi matahari rata-rata per jam (I), diberikan dalam W/m², luas penutup kaca (A), diukur dalam m², dan dikalikan dengan 100 untuk dinyatakan sebagai persentase.

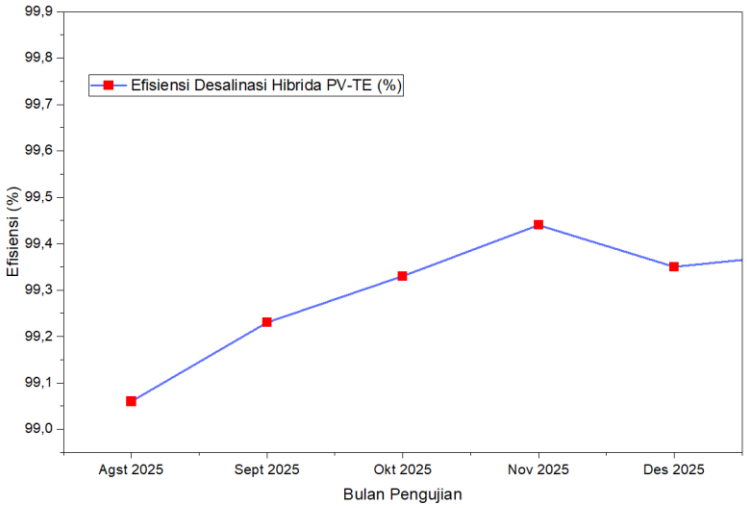
## 3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Efisiensi penghilangan konduktivitas

Berdasarkan hasil pengujian, sistem hibrida PV-TE secara konsisten mencapai efisiensi penghilangan konduktivitas sangat tinggi, berkisar antara 99,08% hingga 99,83%. Performa puncak dicapai pada September-Oktober 2025, dengan efisiensi 99,83% menghasilkan air sangat murni (konduktivitas ~80 µS/cm). Namun, pada musim panas (Desember-Januari) meski efisiensi tetap di atas 99%, terjadi penurunan kualitas air produk yang signifikan, ditandai dengan kenaikan konduktivitas menjadi sekitar 440 µS/cm. Fenomena ini mengindikasikan adanya tekanan termal (thermal stress) pada sistem saat operasi pada suhu ambient tinggi.




**Gambar 5.** Perbandingan Konduktivitas Air Sebelum dan Sesudah Desalinasi

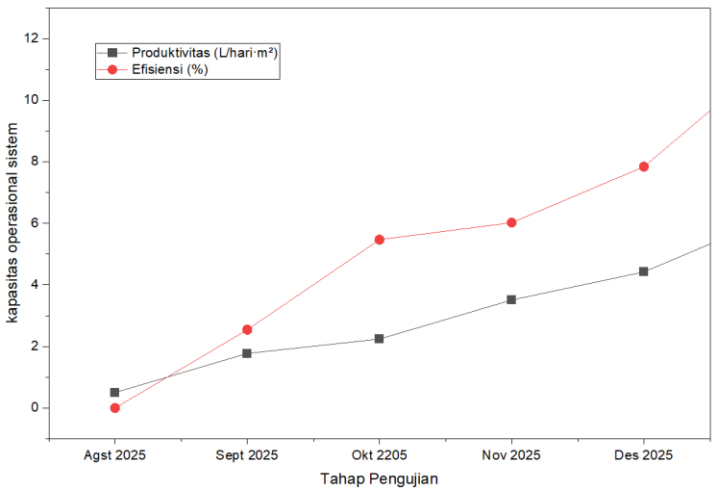



**Gambar 6.** Trend Efisiensi Bulanan Sistem Hibrida PV-TE

Analisis mendalam mengungkapkan bahwa penurunan performa di musim panas terutama disebabkan oleh mekanisme re-evaporasi pada permukaan kondensor dan penurunan efektivitas modul termoelektrik. Suhu ambient yang tinggi (>35°C) mengurangi gradien suhu efektif antara uap panas dan permukaan kondensor, meskipun ΔT numerik tetap besar. Selain itu, efisiensi modul TEG sebagai pendingin aktif menurun secara signifikan karena sisi panasnya menjadi terlalu panas, sementara kemampuan heat sink untuk membuang panas ke lingkungan juga berkurang. Kondisi ini menciptakan double penalty: TEG tidak hanya kurang efektif mendinginkan, tetapi juga menghasilkan lebih sedikit energi listrik dari pemulihan panas buang. Hasilnya, laju kondensasi bersih menurun dan air yang telah terkondensasi cenderung menguap kembali sebelum terkumpul, sehingga menurunkan kualitas akhir produk meski efisiensi konversi energi tetap terjaga.

## 3.2. Produktivitas air tawar

Produktivitas air tawar, yang diukur sebagai air yang dihasilkan per meter persegi panel desalinasi per hari (L/hari.m²), merupakan indikator kunci efisiensi dan kapasitas operasional sistem.




**Gambar 7.** Trend Produktivitas air tawar dan efisiensi dari Desalinasi Hybrid (PV-TE)

Hasil pengujian produktivitas air tawar menunjukkan peningkatan eksponensial dan konklusif dari 0,50 L/hari·m² pada prototipe dasar (Agustus 2025) menjadi 6,24 L/hari·m² pada unit skala pilot hibrida PV-TE (Januari 2026), yang merepresentasikan peningkatan sebesar 11,48% atau 12,5 kali lipat. Lonjakan produktivitas yang bertahap dan konsisten ini dari 1,77 L/hari·m² (September), 3,51 L/hari·m² (November), hingga 4,42 L/hari·m² (Desember), secara langsung memvalidasi efektivitas integrasi dan optimasi sistem hibrida, di mana modul Fotovoltaik (PV) menjamin pasokan energi yang stabil untuk operasi, sementara fungsi ganda modul Termoelektrik (TEG) sebagai pemulih panas buang dan, yang terpenting, sebagai pendingin aktif pada kondensor, secara drastis meningkatkan gradien suhu dan mempercepat laju kondensasi, sehingga mentransformasi keterbatasan produktivitas yang menjadi kelemahan mendasar pada desalinasi surya pasif konvensional.

### 3.3. Analisis kinerja sistem

Analisis kinerja sistem desalinasi hibrida PV-TE dilakukan dengan mengevaluasi parameter termodinamika dan konversi energi berdasarkan metode Isah et al. [12]. Sistem ini mencapai efisiensi konversi sebesar 29,05%, angka yang secara signifikan melampaui efisiensi sistem desalinasi surya pasif konvensional yang umumnya berkisar antara 7-15%. Pencapaian efisiensi tinggi ini merupakan hasil dari sinergi optimal antara komponen Fotovoltaik (PV) dan Termoelektrik (TEG), di mana panel PV bertanggung jawab atas konversi spektrum cahaya tampak menjadi listrik untuk menggerakkan pompa dan sistem kontrol, sementara modul TEG menjalankan fungsi ganda yang kritis: pertama, sebagai generator listrik tambahan melalui pemanfaatan panas buang (waste heat recovery) dari absorber dan kolektor surya dengan memanfaatkan Efek Seebeck; dan kedua yang merupakan kontributor utama peningkatan efisiensi system sebagai pendingin aktif pada permukaan kondensor melalui penerapan Efek Peltier. Pendinginan aktif ini menciptakan zona bersuhu rendah (10-15°C) pada bidang kondensasi, sehingga secara drastis meningkatkan gradien suhu (ΔT) antara uap jenuh panas (60-75°C) dan permukaan kondensor. Peningkatan ΔT inilah yang menjadi penggerak utama percepatan laju perpindahan panas laten selama kondensasi, yang secara langsung mentranslasikan menjadi peningkatan produktivitas air dan efisiensi termal sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, integrasi PV-TE tidak hanya berhasil meningkatkan recovery energi matahari secara keseluruhan tetapi juga menciptakan mekanisme umpan balik positif di mana energi termal yang biasanya terbuang dikonversi menjadi sarana untuk meningkatkan efisiensi proses desalinasi itu sendiri.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa optimalisasi sistem desalinasi hibrida Fotovoltaik-Termoelektrik (PV-TE) secara signifikan meningkatkan kinerja produksi air bersih off-grid untuk daerah pesisir, dengan efisiensi penghilangan konduktivitas mencapai 99,83%, produktivitas air meningkat 1148% menjadi 6,24 L/hari.m², dan efisiensi konversi energi sistem sebesar 29,05%. Keberhasilan ini didorong oleh fungsi ganda modul TEG sebagai pemulih panas buang dan pendingin aktif kondensor, yang menciptakan gradien suhu tinggi untuk mempercepat siklus kondensasi. Untuk pengembangan mendatang, disarankan fokus pada: (1) optimasi manajemen termal sistem, seperti integrasi phase-change material, untuk menjaga kinerja TEG pada suhu ekstrem; (2) eksplorasi material

penyerap dan kondensor yang lebih advance; (3) implementasi sistem kontrol cerdas berbasis machine learning pada IEMS; serta (4) studi kelayakan ekonomi dan uji coba jangka panjang di berbagai lokasi pesisir untuk validasi komersialisasi.

## 5. REFERENSI


[1] A. P. Ekowati and M. F. D. Lusno, "Analisis Capaian dan Tantangan Akses Air Minum Aman di Indonesia Menuju SDGS 6.1. 1," *J. Penelit. Inov.*, vol. 5, no. 2, pp. 1707–1714, 2025.

[2] B. P. S. Indonesia, "Persentase Rumah Tangga yang Memiliki Akses terhadap Sumber Air Minum Layak Menurut Provinsi - Tabel Statistik." Accessed: Feb. 06, 2026. [Online]. Available: https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/ODQ1IzI=/persentase-rumah-tangga-yang-memiliki-akses-terhadap-sumber-air-minum-layak-menurut-provinsi.html

[3] R. D. Lufira, U. Andawayanti, and N. Z. ST Fitriani, *Krisis Sumber Daya Air Pendekatan Inovatif dan Solusi Berkelanjutan*. CV. AE MEDIA GRAFIKA, 2025.

[4] E. Jones, M. Qadir, M. T. Van Vliet, V. Smakhtin, and S. Kang, "The state of desalination and brine production: A global outlook," *Sci. Total Environ.*, vol. 657, pp. 1343–1356, 2019.

[5] M. Goosen, H. Mahmoudi, Y. Alyousef, and N. Ghaffour, "Solar desalination: A review of recent developments in environmental, regulatory and economic issues," *Sol. Compass*, vol. 5, p. 100034, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.solcom.2023.100034.

[6] G. Hasanin *et al.*, "The microbial growth potential of antiscalants used in seawater desalination," *Water Res.*, vol. 233, p. 119802, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.119802.

[7] H. G. Hameed, H. A. N. Diabil, and M. A. Al-Moussawi, "A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity," *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 484–500, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2022.11.199.

[8] R. L. Sianturi and W. S. Nababan, "Hybrid Energy (Thermoelectric Generator-Archimedes Screw Turbine) Study and Experiment as a Green Energy Generator Based on the Internet of Things (IoT)," *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. ENERGY*, vol. 8, no. 2, pp. 147–156, 2024.

[9] A. S. Abdullah, W. H. Alawee, S. A. Mohammed, A. Majdi, Z. M. Omara, and F. A. Essa, "Increasing the productivity of modified cords pyramid solar still using electric heater and various wick materials," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 169, pp. 169–176, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2022.11.016.

[10] A. Negi, G. S. Dhindsa, and S. S. Sehgal, "Experimental investigation on single basin tilted wick solar still integrated with flat plate collector," *SCPINM-2021*, vol. 48, pp. 1439–1446, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.210.

[11] U. Habitat, "World cities report: Envisaging the future of cities," *U. N. Hum. Settl. Programme UN-Habitat Nairobi Kenya*, 2022.

[12] A. S. Isah, H. B. Takaijudin, B. S. Mahinder Singh, U. A. Abubakar, S. J. Mohammad, and T. Oladoyin abimbola, "Assessing the performance, sustainability, and economic viability of a photovoltaic-based solar desalination system for water scarce regions," *J. Clean. Prod.*, vol. 421, p. 138528, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138528.