

Analisis Komparatif Sistem PV/T Berpendingin Udara dan Berpendingin Air untuk Peningkatan Efisiensi Energi Surya di Kondisi Iklim Tropis Indonesia

Neysa Amelia Hutagalung^{*1}, Ida Bagus Gede Manuaba², I Nyoman Setiawan³, Ida Ayu Dwi Giriantari⁴, Wayan Gede Ariastina⁵, I Nyoman Satya Kumara⁶, Muhammad Zohri⁷, Ahmad Fudholi⁸

^{1,2,3,4,5,6}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

⁷Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Islam Negeri Mataram, Mataram, Indonesia

⁸Pusat Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jakarta, Indonesia

Email: ¹hutagalung.24020@student.unud.ac.id, ²ibgmanuaba@unud.ac.id, ³setiawan@unud.ac.id,

⁴dayu.giriantari@unud.ac.id, ⁵w.ariastina@unud.ac.id, ⁶satya.kumara@unud.ac.id,

⁷muhammadzohri@uinmataram.ac.id, ⁸ahmad.fudholi@brin.go.id

Abstrak

Sistem fotovoltaiik/termal (PV/T) menghasilkan energi listrik dan termal secara simultan dari satu perangkat, sehingga pemanfaatan energi surya lebih tinggi dibandingkan modul PV konvensional. Di iklim tropis Indonesia, temperatur permukaan modul kerap melampaui 60 °C saat iradiasi puncak, menyebabkan penurunan efisiensi listrik 0,40%/°C hingga 0,50%/°C sekaligus mempercepat degradasi modul. Kontribusi utama artikel ini adalah tinjauan sistematis pertama yang secara bersamaan membandingkan keempat metrik kinerja utama efisiensi listrik, termal, gabungan, dan penurunan temperatur modul untuk kedua konfigurasi pendingin dalam konteks spesifik iklim tropis Indonesia. Tinjauan literatur sistematis dilakukan menggunakan protokol PRISMA 2020 terhadap 32 studi terindeks Scopus/Web of Science yang diterbitkan pada 2017 sampai dengan 2025. Sistem berpendingin air mencapai efisiensi listrik $18.1 \pm 0.8\%$, efisiensi termal $60.7 \pm 5.2\%$, efisiensi gabungan $78.5 \pm 6.3\%$, dan penurunan temperatur modul 21.0 ± 3.7 °C. Seluruh nilai lebih tinggi dibandingkan berpendingin udara: $16.2 \pm 0.7\%$, $34.8 \pm 3.5\%$, $51.0 \pm 4.1\%$, dan 10.2 ± 1.4 °C. Perbedaan keempat metrik konsisten pada seluruh studi yang dianalisis.

Kata kunci: Efisiensi Termal, Energi Surya, Fotovoltaiik/Termal, Pendingin Air, Pendingin Udara.

Comparative Analysis of Air-Cooled and Water-Cooled PV/T Systems for Improved Solar Energy Efficiency under Indonesian Tropical Climate

Abstract

Abstrak berbahasa Inggris diletakkan pada bagian ini. Gunakan font Times New Roman 10pt, italic.

Photovoltaic/thermal (PV/T) systems simultaneously generate electrical and thermal energy from a single device, achieving higher solar utilization than conventional PV. In Indonesia, module surface temperatures frequently exceed 60 °C under peak irradiance, reducing electrical efficiency by 0.40%/°C until 0.50%/°C and accelerating degradation. Despite growing PV/T literature, no systematic review has provided an integrated four-metric comparison of both cooling configurations in a tropical context. This study fills that gap. A systematic literature review following PRISMA 2020 was conducted on 32 Scopus/Web of Science-indexed studies (2017 until 2025). Water-cooled systems achieve electrical efficiency $18.1 \pm 0.8\%$, thermal efficiency $60.7 \pm 5.2\%$, combined efficiency $78.5 \pm 6.3\%$, and module temperature reduction 21.0 ± 3.7 °C, outperforming air-cooled systems at 16.2

Keywords: Air-Cooled Photovoltaic, Photovoltaic/Thermal, Solar Energy Systems, Thermal Efficiency, Water-Cooled Photovoltaic.

1. PENDAHULUAN

Indonesia menerima iradiasi matahari rata-rata 4.8 kWh/m² hingga 6.0 kWh/m² per hari, dengan sebagian wilayah timur mencapai 6.5 kWh/m² [1]. Target bauran energi terbarukan nasional 23% pada 2025 mendorong

ekspansi instalasi fotovoltaik (PV) di seluruh kepulauan [2], dan kinerja sistem PV di bawah kondisi iklim setempat menjadi isu yang semakin penting.

Modul PV silikon kristalin mengalami penurunan efisiensi listrik 0.40 hingga 0.50% per kenaikan 1 °C di atas suhu standar 25 °C [3]. Di kota-kota seperti Makassar, Kupang, atau Sorong, temperatur permukaan modul bisa mencapai 65 hingga 70 °C saat iradiasi puncak. Kondisi ini setara kehilangan efisiensi 16% hingga 22% dari energi keluaran. Paparan suhu tinggi yang berkelanjutan juga mempercepat potential-induced degradation (PID), delaminasi enkapsulant, dan kerusakan sambungan solder [4].

Sistem fotovoltaik/termal (PV/T) menggabungkan modul PV dengan kolektor termal dalam satu unit. Panas yang biasanya terbuang dipulihkan sebagai keluaran termal untuk pemanas air, pengeringan pertanian, atau proses industri. Total efisiensi pemanfaatan energi surya sistem ini dapat melampaui 80%, jauh di atas 13% hingga 15% pada PV konvensional [5]. Fudholi dkk. [6] telah menetapkan tolok ukur kinerja PV/T untuk kondisi tropis yang menjadi acuan bagi pengembangan teknologi ini di kawasan ASEAN.

Dua konfigurasi utama pada sistem PV/T adalah pendingin udara dan pendingin air. Pendingin udara memiliki struktur yang lebih sederhana dan biaya lebih rendah, sedangkan pendingin air menawarkan kinerja termal yang lebih baik karena kapasitas panas volumetrik air sekitar 3.500 kali lebih besar dibandingkan udara [3]. Namun, studi kuantitatif yang secara sistematis membandingkan kedua konfigurasi ini dalam konteks iklim tropis Indonesia masih terbatas.

Calise dkk. [7] dan Yazdanifard dkk. [8] mengkaji berpendingin air secara mendalam tanpa menyertakan data berpendingin udara. Liang dkk. [9] dan Pang dkk. [10] sebaliknya fokus pada eksperimen berpendingin udara tanpa kerangka komparatif. Sohani dkk. [11] dan Hemmat Esfe dkk. [12] masing-masing mengkaji pendekatan machine learning dan nanofluid untuk berpendingin air, juga tanpa pembanding udara. Belum terdapat tinjauan yang secara simultan mengevaluasi empat metrik utama, yaitu efisiensi listrik, efisiensi termal, efisiensi gabungan, dan penurunan temperatur modul, untuk kedua konfigurasi dalam konteks iklim tropis Indonesia. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemahaman komparatif terhadap kinerja kedua sistem masih belum terintegrasi secara menyeluruh, terutama dalam lingkungan operasi bersuhu tinggi. Oleh karena itu, studi ini disusun untuk membandingkan hasil-hasil penelitian yang berguna memberikan gambaran yang lebih komprehensif terkait perbedaan kinerja kedua konfigurasi tersebut.

Penelitian ini membandingkan kinerja sistem PV/T berpendingin udara dan berpendingin air melalui tinjauan literatur sistematis terhadap 32 studi yang terindeks pada periode 2017 hingga 2025, dengan sistem PV konvensional sebagai acuan pembanding.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur sistematis dengan mengikuti protokol PRISMA 2020 [13]. Pencarian literatur dilakukan pada lima basis data utama, yaitu Elsevier ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, MDPI, dan Taylor & Francis Online, menggunakan kombinasi kata kunci "photovoltaic thermal" OR "PV/T" dengan "air-cooled" OR "water-cooled" OR "liquid cooling" OR "nanofluid", serta "efficiency", "thermal performance", dan "module temperature". Rentang publikasi yang dianalisis dibatasi pada periode 2017 hingga 2025.

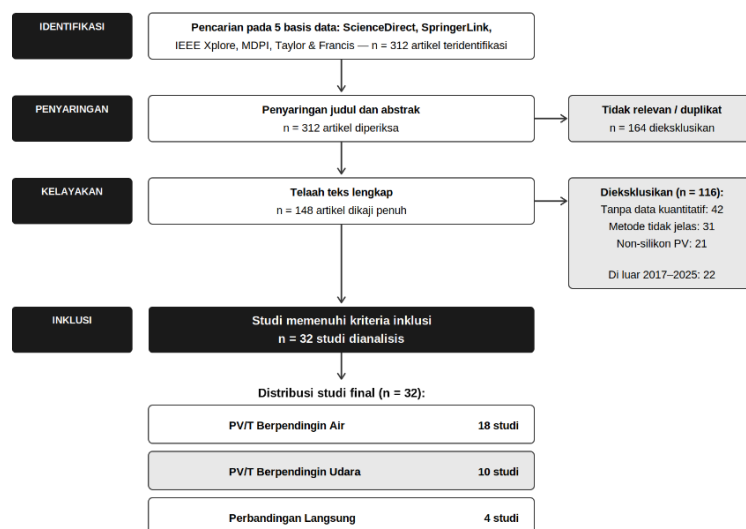
2.1 Kriteria Seleksi

Studi disertakan jika membahas sistem PV/T berpendingin udara atau air dan menyediakan data kuantitatif minimal dua dari empat metrik kinerja yang ditinjau. Studi juga harus terindeks Scopus atau Web of Science serta diterbitkan dalam rentang tahun 2017 hingga 2025. Studi dikecualikan apabila hanya bersifat kualitatif, tidak menjelaskan metode secara memadai, menggunakan teknologi PV non-silikon tanpa komponen PV/T, atau berada di luar rentang tahun publikasi yang ditetapkan.

2.2 Proses Seleksi dan Mitigasi Bias

Proses seleksi dilakukan dalam empat tahap sesuai diagram PRISMA 2020 (Gambar 1). Pencarian awal menghasilkan 312 artikel, kemudian dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak sehingga tersisa 148 artikel untuk ditinjau lebih lanjut secara teks lengkap. Dari jumlah tersebut, 116 artikel dieliminasi karena tidak memenuhi kriteria inklusi, sehingga diperoleh 32 studi akhir yang terdiri dari 18 studi berpendingin air, 10 studi berpendingin udara, dan 4 studi yang membandingkan kedua konfigurasi secara langsung.

Seluruh proses penyaringan dilakukan oleh dua peneliti secara independen. Perbedaan hasil seleksi diselesaikan melalui diskusi hingga dicapai kesepakatan. Untuk mengurangi potensi bias publikasi, studi yang melaporkan kinerja rendah pada salah satu konfigurasi tetap disertakan dalam analisis.



Gambar 1. Diagram alir seleksi artikel berdasarkan protokol PRISMA 2020.

2.3 Analisis Data

Untuk setiap metrik kinerja, dihitung nilai rata-rata tertimbang dan simpangan baku (SD) dari seluruh studi pada masing-masing kategori sistem. Rata-rata tertimbang digunakan untuk memberikan kontribusi yang proporsional berdasarkan jumlah data dalam setiap studi. Perbandingan antar sistem dilakukan berdasarkan nilai rata-rata serta sebaran data yang dilaporkan dalam studi yang dianalisis. Untuk mengevaluasi konsistensi hasil, dilakukan analisis sensitivitas dengan mengecualikan studi yang memiliki nilai ekstrem dan kemudian menilai kembali stabilitas temuan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sifat Termofisika Fluida Pendingin

Perbedaan kinerja antara sistem berpendingin udara dan air terutama dipengaruhi oleh sifat termofisika kedua fluida. Parameter utama pada kondisi 25 °C disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Termofisika Udara dan Air pada 25 °C [3]

Parameter	Udara	Air	Rasio (Air/Udara)
Kapasitas panas spesifik (J/kg·K)	1.005	4.186	4.2x
Konduktivitas termal (W/m·K)	0.026	0.600	23x
Densitas (kg/m ³)	1.18	997	845x
Kapasitas panas volumetrik (kJ/m ³ ·K)	1.19	4.173	3.518x
Viskositas dinamis (mPa·s)	0.018	0.890	49x

Kapasitas panas volumetrik air sekitar 3.518 kali lebih besar dibandingkan udara, sehingga mampu membawa energi termal yang lebih besar dari permukaan modul pada laju aliran yang sama. Namun, viskositas air yang lebih tinggi (sekitar 49 kali dibanding udara) meningkatkan kebutuhan daya pompa, yang perlu diperhitungkan dalam analisis kelayakan sistem pada Subbab 3.7.

3.2 Perbandingan Kinerja Keseluruhan

Tabel 2 menyajikan kinerja ketiga jenis sistem berdasarkan sintesis dari 32 studi. Nilai rata-rata dihitung secara tertimbang berdasarkan jumlah data yang dilaporkan pada masing-masing studi.

Tabel 2. Perbandingan Kinerja PV Konvensional, PV/T Pendingin Udara, dan PV/T Pendingin Air

Performance Metric	Conventional PV	PV/T Air-Cooled System	PV/T Water-Cooled System
Electrical efficiency range (%)	12.4-14.5	15.1-17.1	16.7-19.8
Mean electrical efficiency (%)	13.5	16.2 ± 0.7	18.1 ± 0.8
Thermal efficiency range (%)	-	29.5-40.2	52.4-68.7

Performance Metric	Conventional PV	PV/T Air-Cooled System	PV/T Water-Cooled System
Mean thermal efficiency (%)	-	34.8 ± 3.5	60.7 ± 5.2
Combined efficiency range (%)	12.4-14.5	44.3-57.3	70.0-88.5
Mean combined efficiency (%)	13.5	51.0 ± 4.1	78.5 ± 6.3
Module temperature reduction. ($^{\circ}\text{C}$)	0	7.8-12.0	15.2-26.5
Mean module temperature reduction. ($^{\circ}\text{C}$)	0	10.2 ± 1.4	21.0 ± 3.7

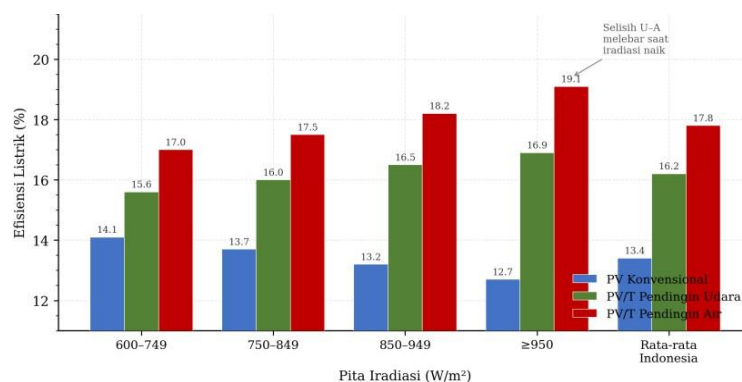
PV/T berpendingin air menunjukkan kinerja lebih tinggi pada seluruh metrik yang dianalisis dengan keunggulan paling besar pada efisiensi termal dengan selisih 25.9% dan efisiensi gabungan dengan selisih 27.5%. Secara umum, interval mean $\pm$ SD pada kedua sistem menunjukkan pola yang tidak saling tumpang tindih di seluruh metrik yang mengindikasikan perbedaan kinerja yang konsisten. Hasil analisis sensitivitas juga menunjukkan bahwa temuan tetap stabil setelah studi outlier dikeluarkan dengan efisiensi listrik rata-rata menjadi 18.0% untuk sistem berpendingin air dan 16.0% untuk sistem berpendingin udara serta perbedaan keduanya tetap konsisten.

3.3 Efisiensi Listrik Berdasarkan Iradiasi

Selisih efisiensi listrik antara sistem berpendingin air dan udara meningkat seiring kenaikan tingkat iradiasi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 2, yaitu dari 1.4% pada rentang 600–749 W/m^2 menjadi 2.2% pada iradiasi di atas 950 W/m^2 .

Tabel 3. Efisiensi Listrik (%) Berdasarkan Perbedaan Iradiasi

Irradiance (W/m^2)	Conventional PV	Air-Cooled PV/T	Water-Cooled PV/T	Difference (%)
600-749	14.1	15.6	17.0	1.4
750-849	13.7	16.0	17.5	1.5
850-949	13.2	16.5	18.2	1.7
≥ 950	12.7	16.9	19.1	2.2
Indonesia average (700-900)	13.4	16.2	17.8	1.6



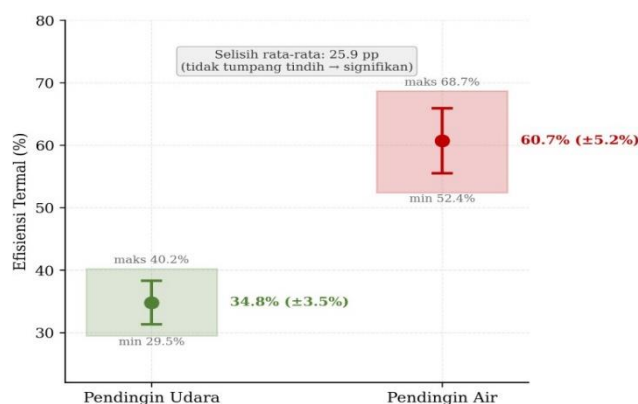
Gambar 2. Efisiensi listrik berdasarkan pita iradiasi untuk tiga jenis sistem PV.

Peningkatan iradiasi menyebabkan kenaikan beban termal pada modul, sementara kapasitas udara dalam mengalirkan panas relatif tetap, sehingga selisih kinerja antara kedua sistem semakin meningkat. Pada wilayah Indonesia dengan tingkat iradiasi tinggi seperti Nusa Tenggara Timur dan Papua Barat, sistem berpendingin air menunjukkan keuntungan kinerja yang lebih besar dibandingkan rata-rata nasional. Hasil ini sejalan dengan temuan Liang et al. [9] dan Borbon et al. [14] yang menunjukkan bahwa optimasi geometri saluran pada sistem berpendingin udara dapat meningkatkan efisiensi listrik hingga mendekati 17.1%, meskipun masih berada di bawah kinerja sistem berpendingin air pada dataset penelitian ini.

3.4 Efisiensi Termal

Selisih efisiensi termal antara kedua sistem sebesar 25.9% jauh lebih besar dibandingkan selisih efisiensi listrik sebesar 1.9%. Sistem berpendingin air memiliki efisiensi termal rata-rata $60.7 \pm 5.2\%$ dengan rentang

52.4–68.7%, sedangkan sistem berpendingin udara berada pada rata-rata $34.8 \pm 3.5\%$ dengan rentang 29.5–40.2%. Kedua distribusi menunjukkan pemisahan yang jelas tanpa adanya tumpang tindih.



Gambar 3. Perbandingan efisiensi termal PV/T berpendingin udara dan air

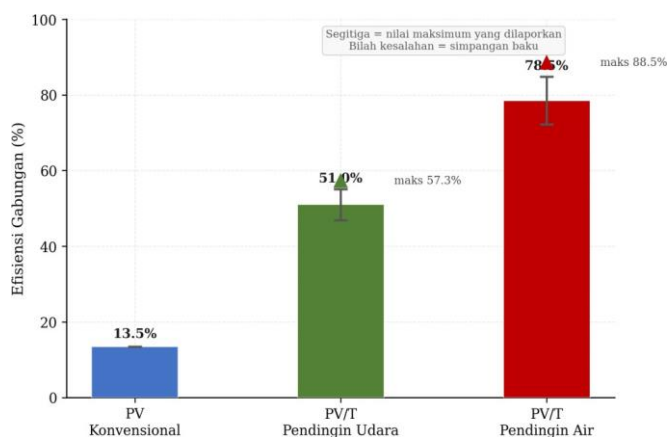
Hasan dan Samsudin [15] melaporkan efisiensi termal 58.3–65.7% untuk berpendingin air di Malaysia, konsisten dengan rentang kajian ini. Salem dan Ramadan [16] menemukan bahwa desain saluran serpentine meningkatkan koefisien konveksi 42% dibandingkan saluran lurus, yang menjelaskan sebagian variasi di dalam rentang 52.4–68.7%. Konfigurasi berpendingin udara terbaik, termasuk yang mengintegrasikan PCM seperti pada Rezaei dkk. [17], menghasilkan efisiensi termal maksimum sekitar 40%. Batasannya ada pada sifat termofisika udara, bukan pada desain salurannya.

3.5 Efisiensi Gabungan

PV konvensional hanya memanfaatkan sekitar 13.5% energi surya yang diterima. Sistem berpendingin udara meningkatkan efisiensi gabungan menjadi rata-rata $51.0 \pm 4.1\%$ dengan nilai maksimum 57.3%, sedangkan sistem berpendingin air mencapai rata-rata $78.5 \pm 6.3\%$ dengan nilai maksimum 88.5%.

Tabel 4. Perbandingan Kinerja Sistem PV dan PV/T

Configuration	Electrical Efficiency (%)	Thermal Efficiency (%)	Combined Efficiency (%)
Conventional PV	13.5	-	13.5
PV/T Air-Cooled (average)	16.2 ± 0.7	34.8 ± 3.5	51.0 ± 4.1
PV/T Air-Cooled (maximum)	17.1	40.2	57.3
PV/T Water-Cooled (average)	18.1 ± 0.8	60.7 ± 5.2	78.5 ± 6.3
PV/T Water-Cooled (maximum)	19.8	68.7	88.5



Gambar 4. Rata-rata efisiensi gabungan untuk tiga jenis sistem PV. Bilah galat = simpangan baku; segitiga = nilai maksimum yang dilaporkan.

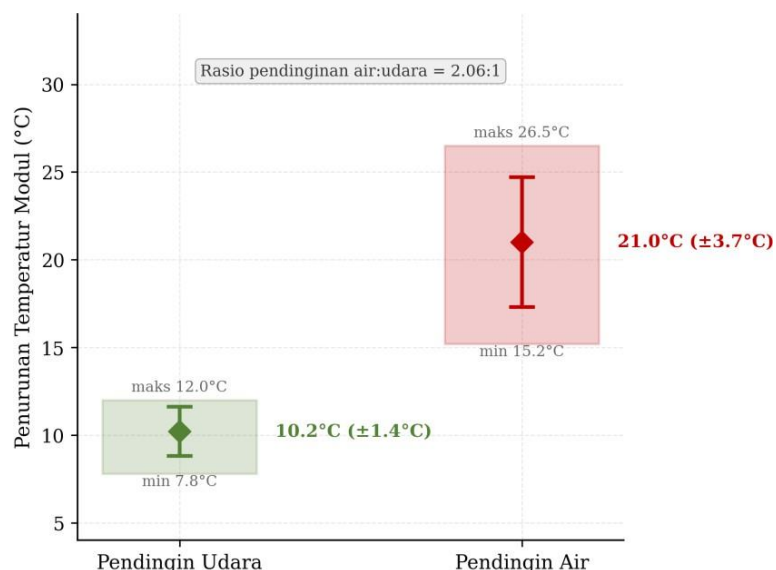
Calise dkk. [7] menunjukkan bahwa rasio keluaran termal terhadap listrik pada sistem berpendingin air berada pada kisaran 3.4 hingga 4.2 dalam kondisi iklim Mediterania. Dalam studi ini, diperoleh rentang 3.3 hingga 3.8 pada kondisi tropis, sedikit lebih rendah dibandingkan studi tersebut. Perbedaan ini berkaitan dengan karakteristik iradiasi yang lebih tinggi di wilayah tropis yang meningkatkan kontribusi keluaran listrik secara relatif. Pada sektor bangunan komersial yang memerlukan pasokan energi listrik dan panas secara bersamaan, peningkatan efisiensi gabungan ini berpotensi memperpendek periode pengembalian investasi sistem [18], [19].

3.6 Penurunan Temperatur Modul

Sistem berpendingin air menurunkan temperatur modul rata-rata 21.0 ± 3.7 °C, hampir dua kali lebih besar dibandingkan sistem berpendingin udara 10.2 ± 1.4 °C sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 5. Secara umum, distribusi kedua kelompok menunjukkan pemisahan yang konsisten tanpa tumpang tindih.

Tabel 5. Module Temperature Reduction and Performance Impact

Indicator	PV/T Air-Cooled	PV/T Water-Cooled
Temperature reduction range (°C)	7.8-12.0	15.2-26.5
Mean temperature reduction (°C)	10.2 ± 1.4	21.0 ± 3.7
Estimated operating temperature in Indonesia (°C)	50-60	40-50
Estimated electrical efficiency recovery (%)	4.1-5.1	8.4-10.5
Potential module lifetime extension (years)	1-2	2-5



Gambar 5. Perbandingan penurunan temperatur modul PV/T berpendingin udara dan air

Rasio aktual sebesar 2.06:1 untuk sistem berpendingin air terhadap udara lebih rendah dibandingkan prediksi teoritis berdasarkan rasio kapasitas panas volumetrik sebesar 3.518:1, yang disebabkan oleh adanya tahanan kontak termal antara modul dan absorber sehingga menurunkan efektivitas perpindahan panas pada kondisi operasional. Penurunan temperatur modul selanjutnya berkaitan dengan mekanisme degradasi yang mengikuti pendekatan Arrhenius, di mana setiap penurunan temperatur sebesar 10 °C dapat memperlambat laju degradasi sekitar dua kali lipat. Dengan penurunan temperatur rata-rata sebesar 21 °C pada sistem berpendingin air, laju PID dan delaminasi enkapsulan diperkirakan menurun dengan faktor sekitar 3.7 hingga 4.3. Dalam konteks ekonomi, pada kisaran harga modul saat ini sebesar Rp 2.5–4.0 juta per kWp, perpanjangan umur modul hingga tiga tahun setara dengan potensi penghematan sekitar Rp 7.5–12 juta per kWp [4].

3.7 Analisis Tekno-Ekonomi Sistem PV/T

Sistem berpendingin air memiliki biaya kapital sekitar 25 hingga 40% lebih tinggi dibandingkan sistem berpendingin udara pada kapasitas yang setara, terutama akibat tambahan komponen seperti pompa, perpipaan, dan penukar kalor [18], [19]. Pada skala 1 kWp yang umum digunakan pada instalasi rumah tangga di Indonesia, selisih biaya komponen tersebut diperkirakan berada pada kisaran Rp 2,5 hingga 5,5 juta. Dengan mempertimbangkan tambahan keluaran termal sebesar 150–200 kWh/m²/tahun, selisih investasi tersebut

berpotensi teramortisasi dalam rentang waktu 3 hingga 6 tahun pada aplikasi yang memanfaatkan energi panas seperti pemanas air. Tabel 6 menyajikan ringkasan perbandingan parameter tekno-ekonomi kedua konfigurasi.

Tabel 6. Perbandingan Parameter Tekno-Ekonomi Sistem PV/T

Parameter	PV/T Pendingin Udara	PV/T Pendingin Air
Relative capital cost	Lower (baseline)	Higher 25-40%
Additional component cost (1 kWp)	-	Rp 2,5-5,5 million
Additional thermal output	50--80 kWh/m ² /year	150--200 kWh/m ² /year
Estimated payback period	5-8 years	3-6 years
Maintenance complexity	Low	High
Pump power consumption	Minimal	5-15 W
Recommended application	Off-grid, remote areas	Commercial Building

Sejumlah kendala praktis perlu diperhatikan dalam implementasi sistem berpendingin air. Kandungan mineral pada air di beberapa wilayah Indonesia berpotensi mempercepat korosi pada komponen heat exchanger berbahan aluminium. Selain itu, konsumsi daya pompa sebesar 5 hingga 15 W dapat mengurangi keluaran bersih sistem sekitar 1 hingga 3%. Kebutuhan pemeliharaan yang lebih kompleks juga menuntut kompetensi teknis tambahan yang masih terbatas di luar wilayah perkotaan. Berdasarkan penelitian Tripathi dkk. [21] pada kondisi lapangan di India yang memiliki karakteristik operasional sebanding dengan wilayah timur Indonesia.

Sebaliknya, sistem berpendingin udara tetap menjadi pilihan yang relevan untuk instalasi off-grid di daerah terpencil, wilayah dengan keterbatasan air, serta proyek dengan keterbatasan anggaran investasi. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi sebaiknya didasarkan pada karakteristik beban energi dan ketersediaan infrastruktur di lokasi implementasi, bukan hanya pada pertimbangan umum kinerja sistem.

4. KESIMPULAN

Hasil tinjauan sistematis berbasis PRISMA 2020 terhadap 32 studi periode 2017 hingga 2025 menunjukkan bahwa sistem PV/T berpendingin air memiliki kinerja lebih tinggi pada seluruh metrik yang dianalisis. Efisiensi listrik rata-rata mencapai $18.1 \pm 0.8\%$ dibandingkan $16.2 \pm 0.7\%$ pada sistem berpendingin udara, efisiensi termal 60.7

$\pm 5.2\%$ dibandingkan $34.8 \pm 3.5\%$, efisiensi gabungan $78.5 \pm 6.3\%$ dibandingkan $51.0 \pm 4.1\%$, serta penurunan temperatur modul 21.0 ± 3.7 °C dibandingkan 10.2 ± 1.4 °C. Perbedaan tersebut menunjukkan konsistensi hasil pada berbagai studi dan memperkuat relevansi teknologi ini dalam kondisi iklim tropis. Keunggulan sistem berpendingin air juga semakin jelas pada kondisi iradiasi tinggi di Indonesia, dengan selisih efisiensi listrik meningkat dari 1.4% pada iradiasi rendah menjadi 2.2% pada tingkat di atas 950 W/m².

Berdasarkan temuan tersebut, sistem berpendingin air lebih sesuai untuk aplikasi bangunan komersial yang memerlukan suplai energi listrik dan termal secara simultan, sedangkan sistem berpendingin udara tetap relevan untuk kondisi dengan keterbatasan biaya dan ketersediaan air. Pengembangan ke depan memerlukan dukungan kebijakan berupa insentif teknologi PV/T, standarisasi instalasi, serta peningkatan kompetensi tenaga teknis. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis siklus hidup per wilayah, eksplorasi nanofluid berbasis material lokal, serta pemodelan tekno-ekonomi dengan mempertimbangkan proyeksi harga energi jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2023. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024.
- [2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, "Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)," Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2017, Jakarta, 2017.
- [3] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, dan A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [4] N. Haegel et al., "Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy," Science, vol. 380, no. 6643, pp. 39--42, 2023.
- [5] X. Gu, J. Li, Y. Zhang, dan H. Liu, "Performance optimization of multi-channel water-cooled PV/T collectors," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 267, p. 112706, 2024.
- [6] A. Fudholi, M. Zohri, dan K. Sopian, "Recent advances in photovoltaic thermal collector technology: Tropical application prospects," Energies, vol. 15, no. 11, p. 4000, 2022.

-
- [7] F. Calise, D. Capuano, dan L. Vanoli, "A comprehensive review of photovoltaic-thermal systems: Modelling and performance analysis," *Energies*, vol. 15, no. 8, p. 2954, 2022.
- [8] F. Yazdanifard, M. Ameri, dan E. Ebrahimnia-Bajestan, "Review of water-based photovoltaic-thermal (PV/T) systems: Issues, current status and future prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110877, 2022.
- [9] R. Liang, J. Zhang, C. Zhou, dan L. Ni, "Experimental analysis of the air-type photovoltaic thermal system with a double-pass finned channel," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1157, 2023.
- [10] W. Pang, H. Yan, Y. Liu, dan Y. Hu, "Experimental study of a bifacial PVT air collector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, p. 121792, 2024.
- [11] A. Sohani, S. Naderi, F. Torabi, dan H. Sayyaadi, "Application of machine learning to predict the performance of a multi-pass water-cooled PV/T system," *Energy Conversion and Management*, vol. 287, p. 117040, 2023.
- [12] M. Hemmat Esfe, S. Esfandeh, dan M. Afrand, "A state-of-the-art review on the nanofluid-based PVT systems," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 149, pp. 423--455, 2024.
- [13] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, p. n71, 2021.
- [14] F. Borbon, A. Colin, dan E. Ramirez-Rodriguez, "Perforated-fin air PVT: Experimental and CFD study," *Applied Energy*, vol. 342, p. 121125, 2023.
- [15] H. A. Hasan dan M. S. Samsudin, "Performance enhancement of PV panel using water cooling: A case study in Malaysia," *Energies*, vol. 15, no. 11, p. 3988, 2022.
- [16] M. R. Salem dan M. R. Ramadan, "Experimental investigation of the performance of a PV/T solar collector with serpentine tubes," *Energy Conversion and Management*, vol. 232, p. 113867, 2021.
- [17] M. Rezaei, M. Eslami, dan K. Jafarpur, "PCM-assisted air-cooled PVT systems," *Energy*, vol. 291, p. 130304, 2024.
- [18] H. A. Kazem, "Evaluation and analysis of water-based photovoltaic thermal (PVT) system," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 29, p. 101686, 2022.
- [19] S. Verma dan S. S. Chandel, "Review of water-based photovoltaic thermal systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, p. 112424, 2022.
- [20] H. A. Kazem, H. A. S. Al-Badi, dan A. S. Al Busaidi, "Air-cooled photovoltaic/thermal system under hot weather: An experimental study," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2311, 2022.
- [21] R. Tripathi, G. N. Tiwari, dan V. K. Dwivedi, "Corrugated absorber air PVT experimental performance under Indian summer conditions," *Solar Energy*, vol. 268, p. 112267, 2024.
- [22] F. Spertino, A. D'Angola, D. Enescu, dan G. V. Fracastoro, "Energy performance of water-cooled photovoltaic module: A laboratory and field assessment," *Solar Energy*, vol. 197, pp. 169--185, 2021.
- [23] A. Hassan, Z. Said, dan H. Babar, "SiC nanofluid for high-performance PVT cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 229, p. 125756, 2024.
- [24] A. Nahar, M. Hasanuzzaman, dan N. A. Rahim, "3-D CFD simulation and experimental validation of a serpentine flow-channel photovoltaic thermal water collector," *Solar Energy*, vol. 199, pp. 366--378, 2021.
- [25] B. M. Ziapour, H. Mohammadali, dan H. Rahimzadeh, "Simulation of water-cooled PVT system for tropical climate deployment," *Renewable Energy*, vol. 225, p. 120251, 2024.