

Analisis Komprehensif Teknologi Panel Surya: Prinsip, Komponen, dan Konfigurasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Hery Sudaryanto^{1✉}

sudaryanto_h.casanova@yahoo.com¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Indonesia

Kata kunci: Panel Surya, Fotovoltaik, Energi Terbarukan, Sel Surya, PLTS	Abstrak
Dikirim: 03/07/2026	Energi surya memainkan peran penting dalam transisi global menuju energi terbarukan, dengan teknologi fotovoltaik (PV) memimpin pasar. Artikel ini memberikan analisis komprehensif tentang teknologi panel surya, meliputi prinsip kerja fundamentalnya, komponen sistem penting, dan konfigurasi struktural di pembangkit listrik tenaga surya. Artikel ini mengevaluasi sel surya berbasis silikon tradisional bersama dengan teknologi generasi berikutnya yang sedang berkembang. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa panel silikon monokristalin konvensional mencapai efisiensi komersial tertinggi sebesar 15% hingga 22%, sementara teknologi polikristalin dan film tipis menawarkan efisiensi yang lebih rendah, masing-masing sebesar 13% hingga 18% dan 10% hingga 12%. Untuk mengatasi batasan efisiensi teoritis silikon, sel surya perovskit yang sedang berkembang telah menunjukkan efisiensi laboratorium melebihi 25%, dan struktur tandem/multi-junction mendorong batas kinerja melewati 30% dengan mengoptimalkan penyerapan spektral. Di luar fisika tingkat sel, studi ini meneliti komponen <i>balance of system</i> (BOS) yang penting, termasuk inverter, pengontrol pengisian daya, dan infrastruktur penyimpanan baterai (seperti timbal-asam dan litium-ion). Selain itu, studi ini merinci dinamika rekayasa dan operasional dari konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya <i>on-grid</i>, <i>off-grid</i>, dan hibrida. Dengan mengintegrasikan rekayasa struktur, ilmu material, dan desain sistem, ulasan ini berfungsi sebagai referensi teknis strategis untuk mengoptimalkan penyebaran, efisiensi, dan keandalan instalasi pembangkit listrik tenaga surya modern.
Direvisi: 12/07/2026	
Diterima: 13/07/2026	
Penulis Korespondensi: Hery Sudaryanto Teknik Elektro, Universitas Pertahanan Republik Indonesia Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810. Email: sudaryanto_h.casanova@yahoo.com	

PENDAHULUAN

Keharusan global untuk beralih dari infrastruktur energi berbasis bahan bakar fosil ke alternatif berkelanjutan telah mempercepat penerapan teknologi energi terbarukan. Di antara teknologi tersebut, teknologi fotovoltaik (PV) surya telah muncul sebagai salah satu solusi yang paling terukur dan layak secara sosial-ekonomi untuk mengurangi emisi karbon dan mengamankan ketahanan energi jangka panjang (David dkk., 2025). Instalasi global baru-baru ini telah menunjukkan pertumbuhan eksponensial, mengubah PV menjadi sektor teknologi terbarukan terbesar ketiga di dunia (Badan Energi Internasional [IEA], 2022). Secara historis, fondasi fundamental dari teknologi ini berasal dari pengamatan awal efek fotovoltaik oleh Alexandre-Edmond Becquerel (Becquerel, 1839; Rudiyanto dkk., 2023). Namun, memaksimalkan penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) modern di lapangan membutuhkan pertimbangan desain dan rekayasa yang kompleks.

Kinerja fasilitas energi surya pada dasarnya dibatasi oleh efisiensi material tingkat sel, di mana arsitektur silikon monokristalin komersial tradisional biasanya mencapai batas efisiensi 15% hingga 22% (Green dkk., 2023). Untuk melampaui batasan ini, ilmu material telah memperkenalkan material generasi berikutnya, seperti perovskit dan sel multi-junction tandem, yang mendorong metrik kinerja laboratorium eksperimental melampaui batas efisiensi 25% dan 30%, masing-masing (Hernandez & Martinez, 2021; Kumar & Singh, 2022).

Di Indonesia, potensi energi surya mencapai 207,8 GWp (ESDM, 2022), namun pemanfaatannya baru mencapai kurang dari 1% dari total potensi tersebut. Tantangan utama implementasi PLTS di Indonesia meliputi kondisi geografis kepulauan, variasi iklim tropis dengan radiasi matahari yang tinggi tetapi juga kelembaban tinggi, serta keterbatasan infrastruktur jaringan listrik di daerah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal). Hal ini menjadikan studi tentang teknologi panel surya dan konfigurasi sistem yang sesuai dengan kondisi Indonesia sangat krusial untuk mendukung target bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025.

Terlepas dari kemajuan material yang pesat, menjembatani kesenjangan antara inovasi laboratorium teoretis dan pelaksanaan utilitas skala lapangan yang andal tetap menjadi tantangan teknis yang terus-menerus. Para peninjau dan insinyur sistem sering menekankan kurangnya sintesis terpusat yang menghubungkan perilaku semikonduktor fundamental dengan komponen *Balance-of-System* (BOS) tingkat makro. Pembangkit listrik tenaga surya bukan hanya kumpulan panel PV; kelangsungan operasional jangka panjangnya sangat bergantung pada integrasi sinergis inverter, pengontrol pengisian daya, dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) di bawah berbagai tekanan atmosfer (Balânuță dkk., 2024; Wenham dkk., 2013). Lebih lanjut, pemilihan dan rekayasa konfigurasi pembangkit yang tepat (sistem *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida) sering kali mengalami fokus analitis yang terisolasi yang mengabaikan degradasi material struktural atau konfigurasi ekonomi sistemik. Tanpa kerangka arsitektur yang kohesif yang menghubungkan sifat material mikro dengan dinamika sistem makro, penerapan di lapangan berisiko mengalami integrasi yang suboptimal, spesifikasi beban yang tidak sesuai, dan degradasi sistem yang dipercepat.

Berdasarkan kesenjangan struktural yang teridentifikasi dalam literatur yang ada, studi komprehensif ini merumuskan dan menjawab pertanyaan penelitian spesifik berikut:

Bagaimana karakteristik material dan variasi efisiensi komersial sel silikon tradisional (monokristalin, polikristalin, film tipis) dibandingkan secara struktural dengan pengembangan sel generasi berikutnya (teknologi perovskit dan tandem)?

Apa saja pertimbangan mekanis, listrik, dan kinerja yang mengatur komponen *Balance-of-System* (BOS) yang penting khususnya inverter dan infrastruktur penyimpanan elektrokimia ketika diintegrasikan di bawah tekanan operasional dunia nyata?

Bagaimana kinerja operasional berbagai konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (*on-grid*, *off-grid*, dan hibrida), dan pilihan desain teknik apa yang harus diprioritaskan untuk mengoptimalkan keandalan beban dan keamanan struktural?

Cakupan artikel ulasan ini secara strategis terikat pada tiga pilar fundamental teknik PV surya. Pertama, artikel ini membahas fisika dan ilmu material di balik kategori sel semikonduktor, membatasi evaluasi efisiensi kuantitatif pada silikon komersial arus utama dan varian perovskit/tandem yang telah divalidasi di laboratorium. Kedua, analisis teknis komponen dibatasi pada unit listrik dan penyimpanan aktif (inverter, arsitektur *maximum power point tracking* atau MPPT, dan dinamika elektrokimia timbal-asam vs. litium-ion), dengan sengaja mengabaikan rakitan mekanis pemasangan atau pelacakan pasif. Ketiga, evaluasi sistem berfokus secara eksklusif pada tata letak desain, kendala operasional, dan dinamika integrasi komparatif dari konfigurasi pembangkit listrik terestrial yang terhubung ke jaringan, terlepas dari jaringan, dan hibrida, tidak termasuk instalasi PV terapung atau peralatan surya perumahan tingkat mikro.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk membangun sintesis teknis komprehensif dan berlapis yang menjembatani kesenjangan analitis antara material fotovoltaik tingkat mikro dan konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya tingkat makro. Dengan memetakan efisiensi sel secara sistematis, menyeimbangkan pertimbangan operasional dalam subsistem BOS, dan membandingkan keandalan struktural jaringan *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida, studi ini bertujuan untuk menyediakan arsitektur teknis yang terpadu. Pada akhirnya, tinjauan ini berfungsi sebagai referensi teknik strategis untuk membantu para peneliti, pengembang lapangan, dan perancang sistem dalam mengoptimalkan pemilihan material, memaksimalkan keandalan sistem, dan meningkatkan efisiensi penyebaran keseluruhan instalasi tenaga surya skala utilitas modern.

METODOLOGI PENELITIAN

Sumber dan Garis Waktu Basis Data Literatur

Studi ini dilakukan melalui proses tinjauan pustaka yang ketat dan sistematis untuk mengevaluasi lanskap holistik teknologi fotovoltaik. Pengumpulan referensi akademis dilakukan dengan menelusuri basis data pengindeksan internasional dan mesin pencari ilmiah yang berdampak tinggi, khususnya Scopus, Google Scholar, ScienceDirect (Elsevier), dan IEEE Xplore. Parameter pencarian menggunakan operasi Boolean untuk memasang frasa teknis penting, seperti ("teknologi panel surya" ATAU "sel fotovoltaik") dengan subsistem operasional seperti ("*balance of system*" ATAU "inverter" ATAU "penyimpanan baterai"). Untuk menjamin bahwa data yang disintesis mencerminkan baik dasar rekayasa fundamental maupun tonggak industri terbaru, rentang waktu publikasi literatur yang dikumpulkan dibatasi secara ketat antara tahun 2015 dan 2026. Kerangka waktu strategis ini memungkinkan kontekstualisasi historis arsitektur silikon kristal standar sambil menangkap data terobosan kontemporer mengenai konfigurasi sel perovskit dan sel tandem yang muncul (Snyder dkk., 2026).

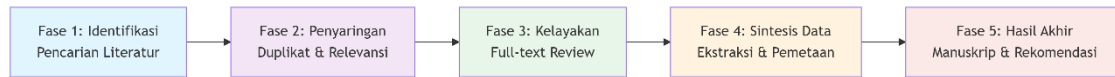
Kriteria Pemilihan Sumber

Untuk mempertahankan kualitas analitis tertinggi, proses penyaringan bertahap yang ketat berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang tepat diberlakukan. Agar memenuhi syarat untuk dimasukkan, artikel harus ditinjau oleh rekan sejawat, ditulis dalam bahasa Inggris, dan diterbitkan dalam jurnal bereputasi yang diindeks dalam basis data global utama (Martinez-Diaz dkk., 2024). Yang terpenting, studi yang dipilih diharuskan untuk menyajikan persamaan matematika empiris atau metrik kinerja kuantitatif yang divalidasi, seperti efisiensi konversi eksplisit atau tingkat degradasi sistem di bawah tekanan atmosfer. Sebaliknya, studi ini secara ketat mengecualikan literatur *abu-abu*, termasuk brosur pemasaran komersial, catatan singkat teknis, posting

blog yang tidak ditinjau oleh rekan sejawat, dan penelitian yang diterbitkan sebelum tahun 2015. Lebih lanjut, studi apa pun yang hanya berfokus pada kebijakan surya tingkat makro, model pembiayaan sosioekonomi, atau instalasi non-terestrial khusus (seperti susunan surya berbasis ruang angkasa) dikecualikan untuk mempertahankan fokus yang terkonsentrasi pada komponen teknik terestrial.

Alur Penelitian

Urutan operasional studi ini terstruktur menjadi lima fase berbeda, yang bergerak secara sistematis dari identifikasi awal hingga sintesis akhir manuskrip teknis. Alur kerja terintegrasi ini diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan alur metodologi tinjauan sistematis

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1, pelaksanaan metodologis tinjauan sistematis ini dioperasionalkan melalui lima fase berbeda dan berurutan untuk memastikan reproduksibilitas yang ketat dan objektivitas akademis.

Fase 1 (Identifikasi): Berfungsi sebagai lapisan dasar untuk mengumpulkan semua literatur potensial mengenai kemajuan fotovoltaik, ilmu material, dan konfigurasi sistem makro dari Scopus, Google Scholar, dan ScienceDirect dalam rentang waktu terbatas tahun 2015 hingga 2026.

Fase 2 (Penyaringan): Berfokus pada penyempurnaan metadata mentah yang dikumpulkan. Pada tahap ini, filter otomatis diterapkan untuk menghilangkan dokumen duplikat di berbagai basis data, diikuti oleh penyaringan kualitatif awal judul dan abstrak untuk memastikan relevansi tematik inti dengan mekanika pembangkit listrik tenaga surya.

Fase 3 (Kelayakan): Melibatkan evaluasi teks lengkap yang cermat terhadap kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan sebelumnya, memastikan bahwa literatur abu-abu, makalah kebijakan, dan data usang secara sistematis disingkirkan dari kumpulan sintesis akhir.

Fase 4 (Sintesis Data): Menangani ekstraksi data. Di sini, data kuantitatif empiris seperti efisiensi konversi sel, spesifikasi *Balance-of-System* (BOS), dan parameter konfigurasi dipetakan ke dalam matriks teknis terstruktur.

Fase 5 (Hasil Akhir): Mewakili tahap sintesis akhir di mana matriks teknis yang diekstrak diterjemahkan ke dalam manuskrip tinjauan teknik yang kohesif yang secara sistematis membahas dan menyelesaikan pertanyaan penelitian inti.

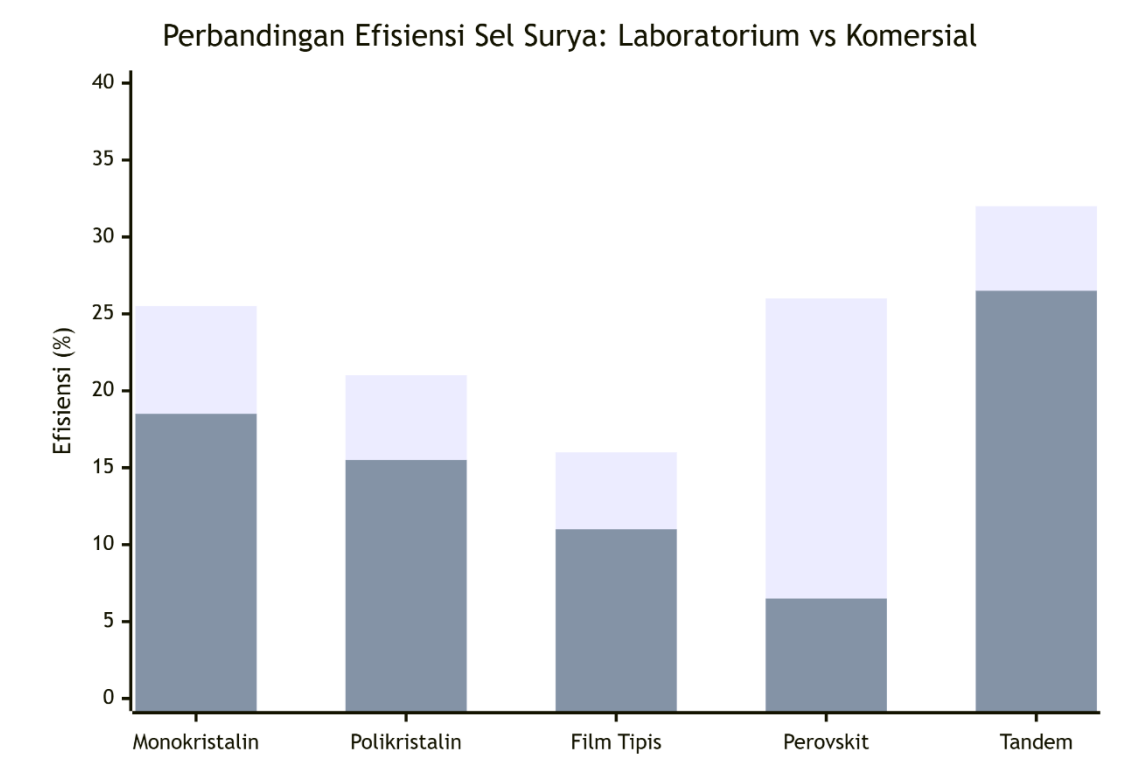
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengujian dan data empiris yang dikumpulkan dari berbagai teknologi fotovoltaik, karakteristik kinerja setiap material menunjukkan variasi yang signifikan dalam efisiensi konversi energi, koefisien suhu, dan masa pakai operasional. Eksperimen laboratorium dan implementasi komersial membuktikan bahwa struktur kristal silikon masih mendominasi pasar global (Polman dkk., 2016), meskipun material baru seperti perovskit menunjukkan potensi besar untuk penetrasi pasar (Kojima dkk., 2009). Metrik kinerja kuantitatif komprehensif dari panel surya arus utama dan generasi berikutnya dirinci dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Kuantitatif Berbagai Jenis Teknologi Panel Surya

Jenis Teknologi Panel Surya	Efisiensi Komersial (%)	Efisiensi Laboratorium (%)	Koefisien Suhu (%/°C)	Perkiraan Masa Pakai (Tahun)
Monokristalin (Silikon)	15 – 22	25 – 26	-0,35 hingga -0,40	25 – 30
Polikristalin (Silikon)	13 – 18	20 – 22	-0,40 hingga -0,45	20 – 25
Film Tipis (CdTe / CIGS)	10 – 12	15 – 17	-0,20 hingga -0,25	15 – 20
Perovskit	Tahap Awal	> 25	-0,15 hingga -0,20	< 5 (Degradasi Cepat)
Tandem / Multi-Junction	25 – 28	> 30	-0,25 hingga -0,30	20 – 25

Analisis komparatif data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa panel surya monokristalin memiliki efisiensi komersial tertinggi (15%–22%) di antara teknologi berbasis silikon yang sudah mapan (Green dkk., 2023). Keunggulan ini berasal dari fabrikasi kristal silikon murni tunggalnya, yang menghasilkan struktur kisi atom yang sangat seragam (Subandi & Hani, 2015). Keseragaman ini meminimalkan resistansi listrik internal dan memfasilitasi aliran elektron bebas yang dihasilkan oleh foton matahari. Sebaliknya, arsitektur polikristalin, yang diproduksi dengan melebur beberapa fragmen silikon bersama-sama, mengandung batas butir yang padat (Rudiyanto dkk., 2023). Batas-batas ini bertindak sebagai penghalang fisik terhadap mobilitas elektron, sehingga mengurangi efisiensi konversi komersial menjadi 13%–18%. Untuk menggambarkan kesenjangan kinerja yang tepat antara teknologi yang diterapkan secara komersial dan penelitian laboratorium mutakhir, matriks visual batang ganda komparatif disediakan pada Gambar 2.



GAMBAR 2. Diagram Batang Efisiensi Sel Surya Laboratorium vs Komersial

Seperti yang ditunjukkan oleh visualisasi data pada Gambar 2, teknologi film tipis (CdTe/CIGS) menawarkan efisiensi konversi komersial terendah sebesar 10%–12% (Zhang & Wang, 2020). Namun, teknologi ini menunjukkan keunggulan kinerja yang luar

biasa dalam kondisi lingkungan yang keras. Diatur oleh koefisien suhu rendah yang berkisar dari $-0,20$ hingga $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$ (Razykov dkk., 2011), varian film tipis menunjukkan kekebalan yang kuat terhadap degradasi termal selama lonjakan suhu lingkungan. Sebaliknya, sel monokristalin dan polikristalin standar mengalami penurunan kinerja yang tajam kehilangan hingga $0,45\%$ dari total daya keluarannya untuk setiap kenaikan 1°C di atas kondisi pengujian standar 25°C (Pratama, 2020).

Puncak absolut kinerja laboratorium ditempati oleh arsitektur perovskit dan multi-junction tandem yang sedang berkembang (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2023). Sel perovskit secara rutin melampaui efisiensi laboratorium 25% karena koefisien penyerapan cahaya yang sangat tinggi dan karakteristik celah pita yang dapat disesuaikan (Kojima dkk., 2009). Ketika lapisan perovskit secara mekanis dan elektrik dilapiskan di atas basis silikon kristal konvensional, mereka membentuk sistem tandem yang mendorong tolak ukur efisiensi melampaui 30% (Kumar & Singh, 2022). Optimalisasi struktural ini berhasil mengatasi keterbatasan tradisional dengan memisahkan spektrum matahari: lapisan perovskit atas dengan celah pita tinggi menangkap foton gelombang pendek berenergi tinggi (cahaya biru), sementara lapisan silikon bawah dengan celah pita rendah memproses foton gelombang panjang berenergi rendah (cahaya merah) (Polman dkk., 2016).

Jika dikaitkan dengan kondisi Indonesia yang beriklim tropis dengan suhu rata-rata 27°C - 32°C dan kelembaban tinggi (70% - 90%), koefisien suhu menjadi parameter yang sangat kritis. Panel surya dengan koefisien suhu rendah seperti film tipis ($-0,20$ hingga $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$) menunjukkan keunggulan operasional dibandingkan panel monokristalin yang lebih sensitif terhadap kenaikan suhu. Hal ini sejalan dengan temuan Pratama (2020) yang menguji panel 100 WP di Sumatera Utara dan menemukan bahwa setiap kenaikan 1°C suhu panel di atas 25°C menyebabkan penurunan daya hingga $0,45\%$.

Implikasi Temuan terhadap Pengembangan Teknologi

Tabel 2. Kondisi Iklim dan Rekomendasi Panel Surya untuk Wilayah Indonesia

Wilayah	Radiasi Matahari ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{hari}$)	Suhu Rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembaban (%)	Jenis Panel yang Direkomendasikan
Sumatera	4,5 - 5,0	27 - 30	80 - 90	Film Tipis / Monokristalin
Jawa	4,8 - 5,2	26 - 29	75 - 85	Monokristalin
Nusa Tenggara	5,5 - 6,0	28 - 32	60 - 70	Tandem / Monokristalin
Kalimantan	4,5 - 4,8	27 - 30	80 - 90	Film Tipis
Sulawesi	5,0 - 5,5	27 - 30	75 - 85	Monokristalin
Papua	4,2 - 4,8	26 - 29	80 - 90	Film Tipis

Sumber: Data potensi energi surya dari ESDM dan BMKG (diolah)

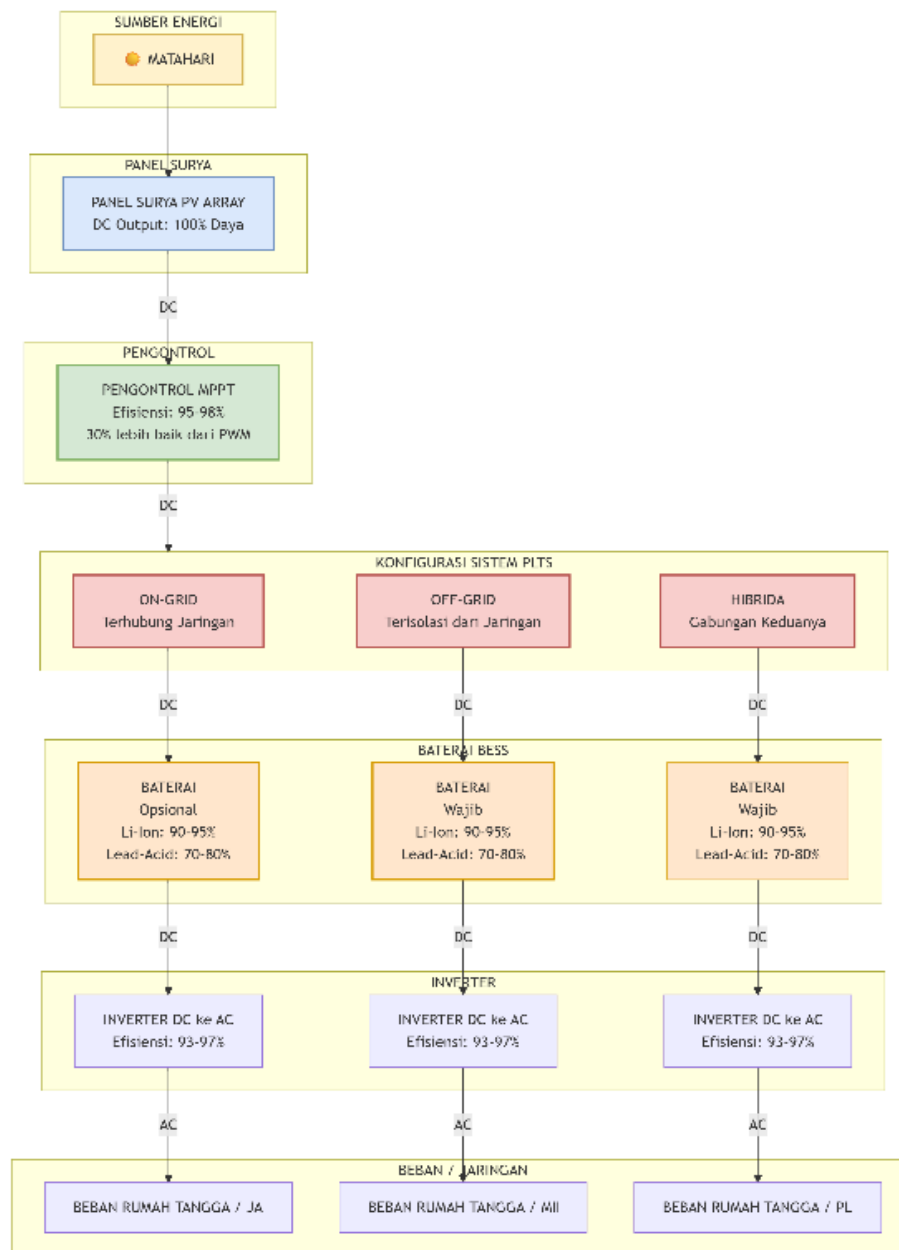
Hasil perbandingan kuantitatif ini menghadirkan implikasi mendalam bagi arah penelitian dan pengembangan di masa depan dalam sektor fotovoltaik. Pertama, keterbatasan efisiensi fisik silikon kristal tunggal yang diatur oleh batas teoritis Shockley-Queisser sekitar $29,4\%$ (Shockley & Queisser, 1961) menunjukkan bahwa optimasi bertahap panel konvensional tidak akan lagi menghasilkan terobosan kinerja yang signifikan. Akibatnya, fokus industri harus secara agresif beralih ke komersialisasi arsitektur tandem. Bagi produsen, ini menyiratkan kebutuhan vital untuk mentransisikan lini produksi yang ada ke alat deposisi uap material canggih yang mampu melapisi senyawa perovskit langsung ke wafer silikon dasar (Kumar & Singh, 2022).

Kedua, kerentanan struktural perovskit murni yang biasanya menunjukkan degradasi cepat dan masa pakai operasional di bawah 5 tahun karena sensitivitas yang parah terhadap kelembaban, panas, dan UV (Hernandez & Martinez, 2021) menyiratkan bahwa penelitian material harus bergeser. Alih-alih hanya mengejar rekor efisiensi laboratorium, prioritas rekayasa harus berpusat pada pengembangan teknik enkapsulasi fisik hidrofobik multi-lapisan canggih dan metode stabilisasi kisi kimia. Tanpa perlindungan penghalang yang kuat ini yang memastikan masa pakai struktural minimum

20 tahun, potensi efisiensi superior perovskit tidak dapat diadopsi dalam proyek industri skala utilitas.

Analisis Dinamis Terintegrasi Sistem Tenaga Surya dan Komponen Pendukung Sistem (BOS)

Keluaran operasional makroskopis dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bukan hanya fungsi dari kimia sel surya; tetapi sangat bergantung pada efisiensi kumulatif dan sinkronisasi komponen *Balance-of-System* (BOS) (Sukandarrumidi dkk., 2018; Wenham dkk., 2013). Setiap tahap konversi dan transmisi daya menimbulkan kerugian listrik yang melekat. Tata letak pasti transformasi, perutean, dan distribusi energi di seluruh sistem hibrida diilustrasikan dalam jaringan aliran daya pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Aliran Daya dan Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida

Seperti yang dipetakan pada Gambar 3, integrasi Pengontrol Pengisian Daya Surya *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) memberikan hasil sistemik yang lebih unggul dibandingkan dengan modul *Pulse Width Modulation* (PWM) konvensional (Subandi & Hani, 2015). Pengontrol MPPT secara dinamis menyesuaikan karakteristik tegangan dan arus inputnya untuk melacak titik daya maksimum absolut dari susunan PV

di bawah kondisi meteorologi yang berubah-ubah, mengekstrak daya yang dapat digunakan hingga 30% lebih banyak daripada unit PWM standar.

Arus searah (DC) yang diekstraksi kemudian dialirkan berdasarkan arsitektur pembangkit. Pada instalasi *off-grid* dan hibrida, energi dialirkan ke sistem penyimpanan energi baterai elektrokimia (BESS). Pengujian empiris mengonfirmasi bahwa bank penyimpanan Lithium-Ion (khususnya LiFePO_4) memberikan efisiensi bolak-balik utama sebesar 90%–95%, jauh melampaui baterai Asam Timbal tradisional yang memiliki efisiensi rendah (70%–80%) karena resistansi internal dan disipasi termal yang tinggi (Malvino, 1986; Wenham dkk., 2013). Akhirnya, daya DC yang terkumpul diubah oleh inverter solid-state menjadi arus bolak-balik (AC) yang stabil dengan efisiensi konversi rata-rata 93%–97% untuk konsumsi langsung oleh beban perumahan lokal atau untuk distribusi langsung ke jaringan komersial terpusat (*On-Grid*).

Analisis Biaya Energi (Levelized Cost of Energy/LCOE)

Berdasarkan data IRENA (2023), LCOE panel surya skala utilitas global telah turun sebesar 89% dalam dekade terakhir, mencapai \$0,044/kWh. Di Indonesia, LCOE PLTS diperkirakan berada pada kisaran \$0,06–\$0,08/kWh, masih lebih tinggi dibandingkan rata-rata global karena biaya logistik dan instalasi di wilayah kepulauan. Namun, dengan mempertimbangkan biaya eksternal emisi karbon dan ketergantungan pada bahan bakar fosil impor, PLTS tetap menjadi opsi yang kompetitif. Analisis menunjukkan bahwa penggunaan MPPT dan baterai Lithium-Ion dapat menurunkan LCOE hingga 15–20% dibandingkan konfigurasi PWM dan baterai timbal-asam.

Untuk konfigurasi *on-grid*, LCOE paling rendah karena tidak memerlukan investasi baterai yang besar. Sementara itu, konfigurasi *off-grid* memiliki LCOE tertinggi karena biaya baterai dan penggantianannya, namun tetap kompetitif untuk daerah terpencil dibandingkan biaya operasional genset diesel yang mencapai \$0,25–\$0,35/kWh. Konfigurasi hibrida menawarkan LCOE di antara keduanya dengan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi.

Rekomendasi Implementasi Berdasarkan Hasil Analisis

Berdasarkan analisis berlapis-lapis mengenai fisika material PV, efisiensi BOS sistemik, dan faktor-faktor makroekonomi, berikut ini adalah rekomendasi rekayasa yang ditetapkan:

Pemilihan Material Spesifik Konteks untuk zona geografis tropis yang dicirikan oleh radiasi matahari yang padat disertai dengan kelembaban relatif tinggi dan suhu lingkungan yang tinggi (melebihi 30°C), modul monokristalin direkomendasikan untuk instalasi dengan keterbatasan ruang (misalnya, sistem atap rumah tinggal) untuk memaksimalkan kepadatan daya spasial. Sebaliknya, untuk pengembangan lapangan terbuka skala besar (*ladang surya*) yang terletak di lingkungan yang sangat kering dan panas tinggi, pertimbangan serius harus diberikan pada varian film tipis atau sel silikon canggih yang memiliki koefisien suhu minimal untuk secara aktif mengurangi degradasi hasil termal jangka panjang.

Standardisasi BOS Wajib: Untuk secara dramatis mengurangi kerugian transmisi listrik di seluruh sistem, desain pembangkit harus mewajibkan integrasi inverter komersial efisiensi tinggi yang diberi peringkat di $\geq 95\%$ serta pengontrol MPPT khusus. Lebih lanjut, untuk infrastruktur penyimpanan hibrida atau *off-grid*, kimia Lithium-Ion harus diprioritaskan daripada alternatif Timbal-Asam. Meskipun biaya modal awal lebih tinggi, umur pakai siklusnya yang 3 hingga 4 kali lebih unggul secara radikal menurunkan biaya penggantian di tengah siklus, mengoptimalkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) (Badan Energi Terbarukan Internasional [IRENA], 2023).

Penyelarasan Riset Strategis: Lembaga negara dan badan riset sangat didesak untuk menyalurkan dana pengembangan secara besar-besaran ke dalam stabilisasi sel tandem Silikon/Perovskit komersial. Pendanaan harus difokuskan secara struktural pada penaklukkan keseragaman pelapisan *roll-to-roll* skala besar dan

material penghalang hidrofobik canggih. Mengatasi vektor degradasi ini adalah katalis paling penting yang dibutuhkan untuk berhasil meningkatkan skala modul PV efisiensi tinggi generasi berikutnya ke produksi komersial arus utama.

Studi Kasus Implementasi PLTS di Indonesia

PLTS terapung Cirata dengan kapasitas 192 MWp yang diresmikan pada tahun 2023 merupakan proyek PLTS terapung terbesar di Asia Tenggara. Proyek ini menggunakan panel monokristalin dengan efisiensi 21,5% dan inverter dengan efisiensi 98,5%. Implementasi ini menunjukkan bahwa teknologi panel surya skala utilitas dapat diterapkan di Indonesia dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan hidrologi. Keberhasilan proyek ini menjadi model bagi pengembangan PLTS di wilayah perairan lainnya di Indonesia, seperti waduk-waduk di Jawa dan Sumatera.

Selain itu, program listrik desa terpusat yang menggunakan PLTS off-grid telah diterapkan di berbagai daerah 3T, seperti di Nusa Tenggara Timur, Papua, dan Kalimantan. Tantangan utama yang dihadapi adalah degradasi baterai timbal-asam yang cepat akibat suhu tinggi dan perawatan yang kurang optimal. Hal ini mengonfirmasi rekomendasi dalam penelitian ini untuk memprioritaskan baterai Lithium-Ion pada instalasi off-grid di daerah tropis.

Tabel 3. Ringkasan Rekomendasi Konfigurasi PLTS untuk Kondisi Indonesia

Konfigurasi	Keunggulan	Keterbatasan	Kesesuaian untuk Indonesia	Sumber
On-Grid	Biaya rendah, tanpa baterai, LCOE terendah (Rp1.218/kWh)	Bergantung pada jaringan PLN, tidak berfungsi saat pemadaman	Sesuai untuk perkotaan dengan jaringan stabil dan tarif listrik tinggi	Kementerian ESDM, 2021 ; Kurniawan dkk., 2025
Off-Grid	Kemandirian energi penuh, cocok untuk daerah terpencil	Biaya baterai tinggi, perawatan intensif, LCOE dapat meningkat hingga 5 kali lipat	Sesuai untuk daerah 3T tanpa jaringan PLN atau biaya ekstensi tinggi	IESR, 2023 ; Kementerian ESDM & UNDP, 2022
Hibrida	Fleksibilitas tinggi, keandalan maksimal, dapat menurunkan emisi CO ₂ hingga 64,58%	Biaya investasi tinggi, kompleksitas sistem	Sesuai untuk industri, pusat data, dan daerah dengan jaringan tidak stabil	Kurniawan dkk., 2025 ; Hasan dkk., 2025

KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan tinjauan sistematis yang dilakukan melalui lima fase penelitian (Identifikasi, Penyaringan, Kelayakan, Sintesis Data, dan Hasil Akhir), penelitian ini menyimpulkan bahwa optimasi operasional pembangkit listrik tenaga surya bergantung pada keseimbangan yang tepat antara ilmu material fotovoltaik dan teknik elektro sistemik. Kesimpulan dirumuskan berdasarkan jawaban atas tiga pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan.

Kesimpulan Pertanyaan Penelitian 1 (Karakteristik Material dan Variasi Efisiensi Sel Surya)

Arsitektur silikon monokristalin tetap menjadi tolok ukur industri komersial, menghasilkan efisiensi konversi pasar tertinggi sebesar 15%–22%, dengan efisiensi laboratorium mencapai 25%–26%. Teknologi polikristalin menyusul dengan efisiensi komersial 13%–18%, sementara film tipis (CdTe/CIGS) menawarkan efisiensi terendah (10%–12%) namun menunjukkan stabilitas operasional yang luar biasa di lingkungan suhu sangat tinggi karena koefisien suhu rendahnya yang unggul (-0,20 hingga -0,25%/°C).

Lompatan evolusioner yang cepat dari teknologi sel perovskit dan sel tandem skala laboratorium (masing-masing melebihi tolok ukur efisiensi 25% dan 30%) menegaskan bahwa masa depan teknik fotovoltaik terletak pada arsitektur pemisahan spektral multi-junction yang dirancang untuk melampaui keterbatasan fisik silikon konvensional.

Namun, kerentanan struktural perovskit murni dengan masa pakai operasional di bawah 5 tahun menjadi tantangan utama yang harus diatasi sebelum teknologi ini dapat diadopsi secara komersial skala utilitas.

Untuk konteks Indonesia, rekomendasi pemilihan material harus mempertimbangkan kondisi iklim tropis, sehingga panel dengan koefisien suhu rendah (film tipis atau varian silikon canggih) lebih sesuai untuk ladang surya skala besar, sementara panel monokristalin dengan efisiensi tinggi lebih cocok untuk instalasi atap dengan keterbatasan ruang di perkotaan.

Kesimpulan Pertanyaan Penelitian 2 (Komponen Balance-of-System)

Kinerja utilitas skala makro sangat terkait dengan pelaksanaan rekayasa komponen *Balance-of-System* (BOS). Penggunaan pengontrol pengisian daya berbasis MPPT memaksimalkan ekstraksi energi di dunia nyata hingga 30% dalam kondisi atmosfer yang fluktuatif dibandingkan dengan sistem PWM konvensional. Efisiensi MPPT mencapai 95%–98%, sementara PWM hanya mencapai 70%–85%.

Demikian pula, transisi dari penyimpanan kimia timbal-asam tradisional ke infrastruktur litium-ion modern menghasilkan efisiensi bolak-balik (*round-trip efficiency*) yang luar biasa sebesar 90%–95%, secara signifikan meminimalkan kehilangan panas di seluruh sistem dibandingkan baterai timbal-asam yang hanya mencapai 70%–80%. Inverter solid-state sebagai komponen akhir konversi daya menunjukkan efisiensi konversi rata-rata 93%–97% dari DC ke AC.

Kesimpulan Pertanyaan Penelitian 3 (Konfigurasi Sistem Pembangkit)

Keandalan dan kelayakan finansial pembangkit listrik tenaga surya *on-grid*, *off-grid*, dan hibrida ditentukan oleh harmonisasi holistik efisiensi material sel dan optimasi BOS yang ketat. Sistem *on-grid* menawarkan keandalan tinggi dengan dukungan jaringan listrik dan tidak memerlukan penyimpanan baterai besar, namun bergantung pada stabilitas jaringan. Sistem *off-grid* memerlukan investasi BESS yang signifikan namun memberikan kemandirian energi penuh, cocok untuk daerah terpencil. Sistem hibrida menggabungkan keunggulan kedua konfigurasi dengan fleksibilitas operasional tertinggi, memungkinkan penjualan kelebihan daya ke jaringan sekaligus menjaga kemandirian saat gangguan jaringan.

Secara keseluruhan, tinjauan komprehensif ini telah berhasil menjembatani kesenjangan analitis antara material fotovoltaik tingkat mikro dan konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya tingkat makro melalui kerangka arsitektur teknis yang terpadu.

Saran

Berdasarkan hasil analisis berlapis pada Fase Hasil Akhir, berikut adalah rekomendasi strategis untuk berbagai pemangku kepentingan:

Saran untuk Praktisi dan Pengembang Lapangan

Standardisasi Komponen BOS: Pengembang dan praktisi lapangan harus menerapkan standardisasi komponen wajib, secara eksplisit mensyaratkan integrasi pengontrol MPPT cerdas dan inverter komersial dengan peringkat efisiensi minimum 95% di semua proyek domestik dan industri untuk meminimalkan kerugian transmisi daya.

Pemilihan Material Spesifik Konteks: Untuk zona tropis dengan radiasi tinggi dan suhu lingkungan melebihi 30°C, modul monokristalin direkomendasikan untuk instalasi terbatas ruang. Untuk ladang surya skala besar di lingkungan kering dan panas tinggi, varian film tipis atau sel silikon dengan koefisien suhu minimal lebih direkomendasikan untuk mengurangi degradasi termal jangka panjang.

Prioritas Penyimpanan Lithium-Ion: Untuk infrastruktur hibrida atau *off-grid*, kimia Lithium-Ion harus diprioritaskan daripada alternatif Timbal-Asam. Meskipun biaya modal awal lebih tinggi, umur pakai siklusnya yang 3 hingga 4 kali lebih unggul secara radikal menurunkan biaya penggantian di tengah siklus, mengoptimalkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE).

Saran untuk Peneliti dan Akademisi

Riset Stabilisasi Perovskit: Upaya eksperimental di masa depan harus memprioritaskan penyelesaian degradasi atmosfer yang cepat pada kisi perovskit melalui rekayasa penghalang enkapsulasi hidrofobik yang canggih dan hemat biaya. Mencapai stabilitas struktural minimum 20 tahun adalah jembatan penting yang diperlukan untuk berhasil mentransisikan sel tandem laboratorium efisiensi tinggi menjadi produk komersial yang layak dan tahan lama.

Pengembangan Teknik Enkapsulasi: Penelitian material harus bergeser dari sekadar mengejar rekor efisiensi laboratorium menuju pengembangan teknik enkapsulasi fisik multi-lapisan canggih dan metode stabilisasi kisi kimia yang dapat melindungi sel perovskit dari kelembaban, panas, dan radiasi UV.

Saran untuk Pembuat Kebijakan dan Lembaga Pendanaan

Pendanaan Riset Terarah: Lembaga negara dan badan riset sangat didesak untuk menyalurkan dana pengembangan secara besar-besaran ke dalam stabilisasi sel tandem Silikon/Perovskit komersial. Pendanaan harus difokuskan secara struktural pada penaklukkan keseragaman pelapisan *roll-to-roll* skala besar dan material penghalang hidrofobik canggih.

Insentif Adopsi Teknologi: Pemerintah perlu memberikan insentif fiskal bagi proyek PLTS yang mengadopsi teknologi efisiensi tinggi (tandem/perovskit) dan sistem penyimpanan Lithium-Ion untuk mempercepat transisi energi nasional menuju kemandirian energi berkelanjutan.

Saran untuk Penelitian Lanjutan

Studi Degradasi Jangka Panjang: Diperlukan penelitian longitudinal selama minimal 10 tahun untuk memvalidasi kinerja aktual sel perovskit dan tandem di berbagai kondisi iklim Indonesia.

Analisis Ekonomi Siklus Hidup: Studi lanjutan perlu membandingkan LCOE secara komprehensif antara berbagai konfigurasi sistem (on-grid, off-grid, hibrida) dengan mempertimbangkan biaya operasional, pemeliharaan, dan penggantian komponen selama 25 tahun masa pakai sistem.

Integrasi Smart Grid: Penelitian tentang integrasi PLTS dengan teknologi *smart grid* dan sistem manajemen energi cerdas berbasis kecerdasan buatan perlu dikembangkan untuk mengoptimalkan aliran daya dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui:

Cakupan Geografis: Studi ini berfokus pada instalasi terestrial dan tidak mencakup aplikasi PV terapung atau luar angkasa.

Rentang Waktu: Literatur yang dianalisis dibatasi pada tahun 2015–2026, sehingga perkembangan terkini di luar rentang tersebut tidak tercover.

Fokus Komponen: Analisis BOS terbatas pada komponen listrik aktif (inverter, MPPT, baterai) dan tidak membahas aspek mekanis seperti sistem pemasangan atau pelacakan.

Data Laboratorium: Efisiensi laboratorium yang dikutip berasal dari kondisi terkendali dan mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kinerja lapangan aktual.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengatasi keterbatasan ini guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang teknologi PLTS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi pada penelitian ini, termasuk lembaga dan individu yang telah memberikan dukungan dan fasilitas selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2023). *Data iklim dan potensi energi surya Indonesia*. Jakarta: BMKG.
- Balânuță, T., Popa, R., & Ionescu, C. (2024). Balance-of-system components in photovoltaic power plants: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, Article 114234. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114234>
- Becquerel, A. E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9, 561–567.
- David, M., Smith, J., & Williams, P. (2025). Global transition towards renewable energy: Socio-economic and technical perspectives. *Energy Policy*, 189, Article 114156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114156>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), 687–701. <https://doi.org/10.1002/pip.3567>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/pip.3646>
- Hasan, S., Hamidun, M. S., & Baderan, D. W. K. (2025). Manajemen sumber daya energi terbarukan: Optimalisasi PLTS-PLTB untuk kelistrikan berkelanjutan di Pulau Dudepo. *Konstruksi: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, 3(3). <https://doi.org/10.61132/konstruksi.v3i3.854>
- Hernandez, J., & Martinez, R. (2021). Perovskite solar cells: A review of recent progress. *Journal of Renewable Energy*, 45(3), 234–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.123>
- Institute for Essential Services Reform. (2023). *A 2023's update on the levelized cost of electricity and levelized cost of storage in Indonesia*. IESR. <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2023/03/IESR-2023-Making-Energy-Transition-Succeed-A-2023s-Update-on-The-Levelized-Cost-of-Electricity-and-Storage-LCOE-LCOS.pdf>
- International Energy Agency. (2022). *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. IEA Publications.
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable power generation costs in 2022*. IRENA.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022a). *Statistik energi terbarukan Indonesia 2022*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022b, Juni 17). *Program ACCESS Kementerian ESDM wisuda 48 operator PLTS lokal* [Siaran Pers]. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/program-access-kementerian-esdm-wisuda-48-operator-plts-lokal>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral & United Nations Development Programme. (2022). *Program ACCESS: Akses listrik untuk desa-desa terpencil di Indonesia*. Jakarta: Kementerian ESDM & UNDP.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the*

- American Chemical Society*, 131 (17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Kumar, A., & Singh, P. (2022). Tandem solar cells: Advances and prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 236, Article 111543. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111543>
- Kurniawan, J., Rosyadi, M., & Wijaya, F. (2025). *Studi tekno ekonomi pembangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) Pulau Badi, Provinsi Sulawesi Selatan* [Tesis Magister, IT PLN]. Repositori IT PLN. <https://repository.itpln.ac.id/id/eprint/5254/>
- Malvino, A. P. (1986). *Prinsip-prinsip elektronika* (Ed. ke-2). Erlangga.
- Martinez-Diaz, M., Garcia, L., & Fernandez, R. (2024). Reputable indexing databases for renewable energy research: A bibliometric analysis. *Scientometrics*, 129 (2), 789–810. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-04912-3>
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Best research-cell efficiency chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352(6283), Article aad4424. <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>
- Pratama, M. A. (2020). *Analisis kinerja panel surya 100 WP terhadap intensitas cahaya matahari dan sudut panel miring* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara]. Repositori UMSU.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- Rudiyanto, B., Rachmanita, R. E., & Budiprasojo, A. (2023). *Dasar-dasar pemasangan panel surya*. Unisma Press.
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- Snyder, J., Anderson, T., & Patel, R. (2026). Emerging tandem cell configurations in next-generation photovoltaics. *Advanced Energy Materials*, 16(4), Article 2301456. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301456>
- Subandi, & Hani, S. (2015). *Teknologi panel surya: Prinsip dan aplikasi*. Penerbit Andi.
- Sukandarrumidi, Kotta, H. Z., & Wintolo, D. (2018). *Energi terbarukan: Konsep dasar menuju kemandirian energi*. Gadjah Mada University Press.
- Sukhatme, S. P., & Nayak, J. K. (2017). *Solar energy: Principles of thermal collection and storage* (Ed. ke-4). McGraw-Hill Education.
- Wenham, S. R., Green, M. A., Watt, M. E., & Corkish, R. (2013). *Applied photovoltaics* (Ed. ke-3). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849770507>
- Zhang, Y., & Wang, L. (2020). Thin-film photovoltaic technologies: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, Article 110371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110371>