

PERKEMBANGAN TEKNOLOGI SEL SURYA FOTOVOLTAIK DAN TANTANGAN EFISIENSI DALAM TRANSISI ENERGI BERKELANJUTAN

Febrina Ramadhani^{1*}, Prima Ria Rumata Panggabean²

^{1*} Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi,
Institut Teknologi Rokan Hilir, Indonesia,

² Program Studi Bioteknologi, Fakultas Bioteknologi, Institut Teknologi Del, Indonesia

*Corresponding Author: ramadhanifebii@gmail.com

ABSTRAK

Sel surya fotovoltaik merupakan teknologi energi terbarukan yang berkembang cepat dalam satu dekade terakhir. Kajian literatur ini menganalisis perkembangan teknologi, inovasi material, tantangan implementasi, dan isu keberlanjutan *photovoltaic*. Metode yang digunakan adalah kajian literatur naratif dengan unsur penelusuran sistematis terhadap artikel jurnal, laporan internasional, dokumen kebijakan, dan sumber teknis. Hasil kajian menunjukkan bahwa silikon kristalin masih dominan karena efisiensi, biaya, reliabilitas, dan umur pakainya matang. Teknologi thin-film, bifacial, perovskite, tandem, dan multijunction membuka peluang baru, tetapi stabilitas, skalabilitas, risiko material, integrasi sistem, fleksibilitas jaringan, penyimpanan energi, kebijakan, dan daur ulang masih menjadi tantangan utama.

Kata Kunci: sel surya, fotovoltaik, efisiensi, transisi energi

ABSTRACT

Photovoltaic solar cells are among the fastest-growing renewable energy technologies in the last decade. This literature review analyzes technological development, material innovation, implementation challenges, and sustainability issues in solar PV. The study uses a narrative literature review with systematic search elements based on journal articles, international reports, policy documents, and technical sources. The findings show that crystalline silicon remains dominant because of its balance of efficiency, cost, reliability, and lifetime. Thin-film, bifacial, perovskite, tandem, and multijunction technologies expand future opportunities, but stability, scalability, material risk, system integration, grid flexibility, storage, policy support, and recycling remain critical challenges.

Keywords: solar cell, photovoltaic, efficiency, energy transition

PENDAHULUAN

Krisis iklim, peningkatan kebutuhan listrik, dan ketergantungan historis terhadap bahan bakar fosil telah menempatkan energi terbarukan sebagai salah satu pilar utama transisi energi global. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi surya menempati posisi strategis karena radiasi matahari tersedia luas, biaya teknologinya terus menurun, dan sistemnya dapat diterapkan dalam berbagai skala, mulai dari pembangkit utilitas hingga

sistem atap rumah tangga. Perkembangan tersebut menjadikan sel surya fotovoltaik bukan lagi teknologi pinggiran, melainkan bagian penting dari arsitektur kelistrikan masa depan (Kannan & Vakeesan, 2016; Ali *et al*, 2025).

Data terbaru memperlihatkan percepatan yang kuat. IEA PVPS melaporkan bahwa kapasitas terpasang kumulatif PV global telah melampaui 2.260 GW pada akhir 2024, dengan tambahan kapasitas baru sekitar 553-601 GW hanya dalam satu tahun (Programme T.C, 2025). IEA juga mencatat bahwa pada 2024 pembangkitan listrik dari solar PV meningkat sekitar 480 TWh dan menyumbang sekitar 7% terhadap pembangkitan listrik global (International Energy Agency, 2025). Angka ini menunjukkan bahwa difusi PV berlangsung tidak hanya sebagai respons terhadap isu lingkungan, tetapi juga karena dinamika pasar, kematangan teknologi, dan perubahan kebijakan energi di banyak negara.

Secara ilmiah, sel surya fotovoltaik bekerja melalui efek fotovoltaik, yaitu proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik pada material semikonduktor. Ketika foton diserap oleh material aktif, elektron memperoleh energi untuk bergerak dan menghasilkan arus listrik. Efektivitas proses ini dipengaruhi oleh karakteristik cahaya, bandgap material, kualitas antarmuka, suhu operasi, rekombinasi muatan, serta desain struktur sel. Karena itu, riset sel surya bergerak pada dua jalur besar, yaitu peningkatan kinerja material dan peningkatan reliabilitas sistem dalam kondisi operasi nyata.

Kendati perkembangannya cepat, teknologi sel surya masih menghadapi sejumlah persoalan penting. Dominasi silikon kristalin menunjukkan bahwa teknologi mapan tetap lebih unggul dalam komersialisasi dibanding teknologi baru yang secara laboratorium tampak menjanjikan. Perovskite, tandem, dan multijunction menawarkan efisiensi tinggi, tetapi masih berhadapan dengan isu stabilitas, toksisitas, umur pakai, dan kesulitan produksi massal (Al-Ali *et al*, 2025; Sharma & Mirsha, 2025; Mdallal *et al*, 2025; Hasan *et al*, 2024; Lim *et al*, 2024; Zhang C *et al*, 2026). Selain itu, penetrasi PV yang makin besar menuntut kesiapan jaringan listrik, penyimpanan energi, skema tarif, serta regulasi yang mampu mengakomodasi variabilitas produksi listrik surya (Programme T.C, 2025).

Berdasarkan latar belakang tersebut, kajian ini disusun untuk untuk menganalisis perkembangan dan komersialisasi teknologi sel surya berbasis silikon kristalin serta membandingkannya dengan teknologi *thin-film* dan generasi baru (seperti *perovskite*, *tandem*, dan *multijunction*), mengkaji potensi peningkatan efisiensi konversi energi melalui inovasi material dan desain arsitektur sel, serta mengevaluasi aspek keberlanjutan dan ekonomi sirkular. Kajian ini diharapkan memberi sintesis akademik yang berguna bagi peneliti, pembuat kebijakan, praktisi energi, dan mahasiswa yang ingin memahami sel surya dari perspektif teknologi sekaligus implementasi

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur naratif dengan unsur penelusuran sistematis. Pendekatan naratif dipilih karena tujuan utama kajian ini bukan melakukan meta-analisis kuantitatif, melainkan membangun sintesis konseptual mengenai perkembangan teknologi, peluang inovasi, tantangan implementasi, dan isu keberlanjutan sel surya fotovoltaik. Dalam konteks penelitian berbasis literatur, pendekatan semacam ini relevan ketika topik yang dikaji bersifat multidisipliner dan mencakup aspek teknologi, kebijakan, ekonomi, serta lingkungan (Synder, 2019).

Langkah-langkah dalam pelaksanaan penelitian ini terdiri dari 4 (empat) tahap, yang meliputi:

1. Tahap Identifikasi dan Formulasi Fokus Kajian: Merumuskan pertanyaan utama penelitian terkait perkembangan, inovasi, tantangan implementasi, dan keberlanjutan sel surya fotovoltaik.
2. Tahap Penelusuran dan Seleksi Literatur: Melakukan pencarian literatur secara sistematis pada basis data akademik (seperti *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, *MDPI*, *IEA*, *IEA PVPS*, *NREL*, dan *DOE*) berbasis kata kunci serta menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi terdefinisi.
3. Tahap Pengkodean dan Analisis Tematik: Menganalisis naskah terpilih melalui pembacaan kritis dan mengelompokkan temuan ke dalam tema-tema utama (efisiensi, material, integrasi sistem, kebijakan, dan ekonomi sirkular).
4. Tahap Sintesis Konseptual dan Pelaporan: Menyusun narasi sintesis secara terstruktur untuk menjawab pertanyaan penelitian serta memetakan kesenjangan penelitian untuk kajian mendatang.

Penelusuran literatur dilakukan secara konseptual pada sumber akademik dan institusional yang relevan, termasuk *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, *MDPI*, *IEA*, *IEA PVPS*, *NREL*, *U.S. Department of Energy*, serta dokumen kebijakan pemerintah Indonesia. Kata kunci yang digunakan meliputi *solar cells*, *photovoltaic technology*, *crystalline silicon solar cells*, *perovskite solar cells*, *tandem photovoltaics*, *bifacial photovoltaic*, *photovoltaic efficiency*, *solar PV recycling*, *end-of-life photovoltaic panels*, dan *solar energy policy*.

Kriteria inklusi literatur adalah: diterbitkan pada periode 2016-2026, membahas teknologi sel surya, implementasi PV, efisiensi, keandalan, integrasi sistem, kebijakan, atau daur ulang, serta memiliki relevansi langsung dengan pertanyaan kajian. Kriteria eksklusi meliputi tulisan populer tanpa dasar data, sumber yang tidak menjelaskan basis analisis, artikel yang hanya membahas energi terbarukan secara umum tanpa fokus PV, dan publikasi yang tidak dapat diverifikasi bibliografinya.

Proses analisis dilakukan melalui pembacaan kritis, pengkodean tematik, dan sintesis naratif. Tema yang muncul dikelompokkan ke dalam enam area, yaitu posisi PV dalam transisi energi, prinsip kerja dan klasifikasi teknologi, tren efisiensi dan inovasi, perovskite dan tandem sebagai teknologi prospektif, tantangan implementasi sistem, serta isu keberlanjutan dan daur ulang. Proses pelaporan disusun dengan mengadaptasi prinsip pelaporan kajian literatur yang menekankan kejelasan strategi pencarian, kriteria seleksi, dan basis sintesis (Page *et al*, 2021).

Tabel 1. Strategi kajian literatur

Komponen	Uraian
Jenis kajian	Kajian literatur naratif dengan unsur penelusuran sistematis.
Periode publikasi	Tahun 2016-2026, dengan prioritas pada publikasi 2020-2026. Jumlah publikasi yang menjadi rujukan sebanyak 26 publikasi.
Sumber data	Artikel jurnal, artikel tinjauan, laporan IEA/IEA PVPS, data efisiensi NREL, dokumen teknis DOE, dan kebijakan pemerintah Indonesia.

Kata kunci	solar cells; photovoltaic technology; perovskite solar cells; tandem photovoltaics; photovoltaic efficiency; bifacial PV; PV recycling; end-of-life PV panels.
Teknik analisis	Pengkodean tematik dan sintesis naratif atas temuan teknis, sistemik, kebijakan, dan keberlanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Posisi Sel Surya Fotovoltaik dalam Transisi Energi Global

Pertumbuhan solar PV dalam satu dekade terakhir memperlihatkan perubahan mendasar dalam lanskap energi global. Pada fase awal, PV sering diposisikan sebagai teknologi mahal yang bergantung pada subsidi. Namun, penurunan harga modul, kemajuan manufaktur, dan peningkatan efisiensi membuat PV semakin kompetitif [1]. IEA melaporkan bahwa solar PV menjadi sumber dengan peningkatan pembangkitan listrik terbesar pada 2024, yaitu sekitar 480 TWh. Pada tahun yang sama, solar PV menyumbang sekitar 7% pembangkitan listrik global (*International Energy Agency*, 2025). Fakta ini menunjukkan bahwa PV telah menjadi teknologi skala besar, bukan sekadar eksperimen energi alternatif.

Percepatan ini juga tampak pada sisi instalasi. IEA PVPS menyebutkan bahwa penambahan kapasitas PV global pada 2024 berada pada kisaran 553-601 GW, dengan Tiongkok sebagai pasar dominan yang menyumbang hampir 60% instalasi baru (Programme T.C, 2025). Pertumbuhan yang terkonsentrasi di beberapa negara menunjukkan bahwa skala produksi dan kebijakan industri memiliki peran besar dalam mempercepat adopsi teknologi. Negara dengan potensi radiasi matahari besar tetap membutuhkan kebijakan, investasi, dan kesiapan sistem agar pemanfaatan PV dapat meningkat.

Dalam konteks transisi energi, PV memiliki beberapa keunggulan. Teknologi ini modular, dapat dipasang dekat dengan beban listrik, relatif cepat dibangun, dan tidak menghasilkan emisi langsung saat beroperasi. Akan tetapi, sifat intermiten membuat PV tidak dapat dibahas hanya sebagai perangkat pembangkit. Kinerja sistemnya sangat bergantung pada jaringan listrik, prediksi cuaca, penyimpanan energi, pengaturan beban, dan desain pasar listrik.

B. Prinsip Kerja dan Klasifikasi Teknologi Sel Surya

Sel surya bekerja berdasarkan interaksi antara cahaya dan material semikonduktor. Ketika foton dengan energi yang cukup mengenai material aktif, pasangan elektron-lubang terbentuk. Medan listrik internal pada sambungan semikonduktor kemudian memisahkan muatan tersebut sehingga menghasilkan arus listrik. Efisiensi konversi dipengaruhi oleh kesesuaian bandgap material terhadap spektrum matahari, kualitas kristal, rekombinasi muatan, resistansi seri, refleksi permukaan, dan suhu operasi.

Tabel 2. Klasifikasi teknologi sel surya fotovoltaik

Kelompok teknologi	Contoh material/arsitektur	Keunggulan utama	Tantangan utama
Silikon kristalin	<i>Monocrystalline silicon; polycrystalline silicon; passivating contacts</i>	Rantai pasok matang, umur pakai panjang, reliabilitas tinggi,	Batas efisiensi praktis, kebutuhan energi manufaktur, kebutuhan

		dominasi pasar	material dan daur ulang
<i>Thin-film</i>	CdTe; CIGS; <i>amorphous silicon</i>	Lapisan tipis, potensi biaya rendah, cocok untuk aplikasi tertentu	Efisiensi beberapa teknologi lebih rendah, isu material kritis, kebutuhan proteksi degradasi
Perovskite	<i>Metal halide perovskite; perovskite-silicon tandem</i>	Kenaikan efisiensi cepat, proses fabrikasi fleksibel, potensi tandem	Stabilitas terhadap panas, kelembapan, dan cahaya, toksisitas Pb, manufaktur skala besar
Tandem dan multijunction	III-V <i>multijunction; silicon-perovskite tandem</i>	Pemanfaatan spektrum lebih luas dan efisiensi tinggi	Biaya, kompleksitas proses, keandalan jangka panjang, skalabilitas
Emerging PV	Organic PV; <i>quantum dots; dye-sensitized cells</i>	Potensi fleksibel, ringan, transparan, dan aplikasi khusus	Efisiensi dan umur pakai umumnya belum setara teknologi komersial utama

Berdasarkan material dan kematangan teknologi, sel surya umumnya diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok. Generasi pertama didominasi oleh silikon kristalin, mencakup monocrystalline dan polycrystalline silicon. Silikon kristalin tetap menjadi teknologi paling dominan karena menyediakan kombinasi efisiensi, biaya, umur pakai, dan keandalan yang sulit disaingi. DOE menyatakan bahwa silikon mewakili sekitar 95% modul yang dijual saat ini, dan modul silikon umumnya dirancang beroperasi 25 tahun atau lebih.

Generasi kedua mencakup *thin-film* seperti *cadmium telluride*, *copper indium gallium diselenide*, dan *amorphous silicon*. Generasi ketiga dan keempat mencakup perovskite, organic photovoltaics, quantum dots, tandem, dan multijunction. Kelompok ini menarik karena berpotensi meningkatkan pemanfaatan spektrum cahaya dan membuka aplikasi baru, tetapi masih memiliki tantangan stabilitas, degradasi, toksisitas, dan manufaktur skala besar (Al-Ali *et al*, 2025; Sharma & Mirsha, 2025; Mdallal *et al*, 2025)

C. Efisiensi dan Arah Inovasi Teknologi

Efisiensi merupakan indikator yang paling sering digunakan untuk menilai kemajuan teknologi sel surya. NREL memelihara grafik efisiensi sel riset terbaik yang mencakup berbagai keluarga teknologi, seperti multijunction, gallium arsenide, crystalline silicon, thin films, dan emerging photovoltaics, dengan data yang dikonfirmasi oleh laboratorium pengujian independen (*National Renewable Energy Laboratory*, 2026). Catatan efisiensi tersebut juga dirangkum dalam *Solar Cell Efficiency Tables* (Green *et al*, 2025).

Penambahan literatur mutakhir memperkuat pembacaan bahwa indikator kinerja PV perlu mencakup efisiensi, reliabilitas, degradasi, dan teknik deteksi kegagalan. Kajian terbaru tentang kegagalan modul PV menekankan bahwa kerusakan tidak hanya berasal dari penurunan performa sel, tetapi juga dari kaca pelindung, enkapsulan, backsheets, solder joint, junction box, serta pengaruh lingkungan operasi (Al-Mahdi *et al*, 2024).

Pada teknologi silikon, salah satu arah utama inovasi adalah pengurangan kehilangan rekombinasi melalui passivating contacts, heterojunction, dan arsitektur kontak selektif. Zhou

et al. menunjukkan bahwa silikon berbasis kontak pasivasi menjadi salah satu jalur penting untuk mendekati batas efisiensi praktis dan membuka peluang arsitektur tandem (Zhou Y *et al*, 2022). Namun, karena teknologi silikon telah relatif matang, peningkatan efisiensi biasanya bersifat inkremental dan memerlukan kontrol proses yang semakin presisi.

Di luar silikon, inovasi terjadi melalui *bifacial modules*, *tracking systems*, dan integrasi sistem. Modul bifacial dapat menyerap cahaya dari sisi depan dan belakang, sehingga berpotensi meningkatkan hasil energi, terutama pada permukaan dengan albedo tinggi dan desain instalasi yang tepat (Kopecek *et al*, 2021; Yakubu *et al*, 2024). Namun, keuntungan energi bifacial sangat bergantung pada geometri sistem, ketinggian modul, jarak antarbaris, reflektansi tanah, iklim lokal, dan metode penghitungan energi.

D. Perovskite, Tandem, dan Teknologi Generasi Baru

Perovskite solar cells menjadi salah satu area riset paling aktif karena peningkatan efisiensinya sangat cepat. Seyisi *et al* (2025) menyebutkan peningkatan dari 3,8% menjadi 26,1% pada periode 2009-2024, tetapi juga menekankan bahwa produksi komersialnya masih belum matang. Keunggulan perovskite berasal dari sifat optoelektroniknya, seperti koefisien absorpsi tinggi, bandgap yang dapat disetel, difusi muatan yang baik, dan kemungkinan proses fabrikasi pada suhu relatif rendah. Dalam arsitektur tandem, lapisan perovskite dapat dirancang untuk menyerap spektrum energi tinggi, sedangkan silikon menyerap bagian spektrum lain. Pendekatan ini secara teoritis memungkinkan efisiensi melampaui batas single-junction silikon (Wali Q *et al*, 2018)

Namun, optimisme terhadap perovskite perlu dibaca secara hati-hati. Masalah stabilitas terhadap kelembapan, oksigen, panas, dan paparan cahaya jangka panjang masih menjadi hambatan utama. Selain itu, banyak formulasi perovskite berkinerja tinggi masih menggunakan timbal, sehingga menimbulkan pertanyaan tentang toksisitas dan pengelolaan risiko lingkungan. Stabilitas, degradasi, dan kebutuhan fabrikasi skala besar masih membatasi komersialisasi perovskite (Seyisi *et al*, 2025; Yang C *et al*, 2024; Hasan *et al*, 2024). Kajian terbaru tentang tandem perovskite juga menegaskan bahwa capaian efisiensi tinggi perlu dibaca bersama tantangan uniformitas area besar, interconnection layers, dan stabilitas operasional jangka Panjang (Lim J *et al*, 2024; Zhang C *et al*, 2026).

E. Tantangan Implementasi: Sistem, Kebijakan, dan Konteks Indonesia

Implementasi sel surya pada skala besar menuntut perubahan cara sistem kelistrikan dirancang dan dioperasikan. PV menghasilkan listrik secara variabel mengikuti intensitas radiasi matahari. Pada penetrasi rendah, variasi ini relatif mudah diserap oleh jaringan. Namun, pada penetrasi tinggi, sistem memerlukan fleksibilitas tambahan melalui penyimpanan energi, pembangkit cadangan yang responsif, interkoneksi jaringan, pengelolaan beban, dan mekanisme pasar yang mampu menilai listrik berdasarkan waktu produksi.

IEA menekankan bahwa ekspansi energi terbarukan menuju 2030 perlu diikuti oleh perhatian serius terhadap jaringan listrik, fleksibilitas, perizinan, dan integrasi system (Programme T.C, 2025). Hal ini relevan bagi negara berkembang karena potensi surya yang besar tidak otomatis berubah menjadi kapasitas terpasang apabila investasi jaringan, pembiayaan proyek, dan kepastian regulasi belum memadai.

Di Indonesia, perkembangan PLTS atap menunjukkan bagaimana aspek regulasi memengaruhi adopsi teknologi. Pemerintah menerbitkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 tentang PLTS atap yang terhubung ke jaringan pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum. Regulasi ini antara lain mengatur sistem kuota, perubahan mekanisme ekspor-impor listrik, pembebasan biaya kapasitas, dan proses pengajuan pemasangan PLTS atap (Sekretariat Kabinet Republik Indonesia, 2024).

F. Keberlanjutan, Limbah Panel, dan Ekonomi Sirkular

Salah satu paradoks dalam transisi energi adalah bahwa teknologi rendah emisi tetap memerlukan material, energi manufaktur, transportasi, dan infrastruktur pengelolaan limbah. Panel surya umumnya memiliki umur pakai panjang, tetapi peningkatan besar instalasi PV hari ini akan menghasilkan volume panel akhir masa pakai dalam beberapa dekade mendatang. Jika tidak dikelola, limbah panel berisiko menimbulkan beban lingkungan, kehilangan material bernilai, dan masalah tata kelola limbah elektronik.

Daur ulang panel silikon kristalin perlu dikembangkan sebagai sistem teknologi yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan, mencakup tahap pembongkaran modul, delaminasi, pemulihan material, dan penggunaan ulang (Wang X *et al*, 2022). Sementara itu, Mao *et al* (2024) melalui pendekatan life cycle assessment menunjukkan bahwa pilihan pengelolaan akhir masa pakai seperti landfill, downcycling, dan upcycling memiliki konsekuensi lingkungan yang berbeda.

Pendekatan ekonomi sirkular menjadi semakin penting karena rantai pasok PV bergantung pada material seperti kaca, aluminium, silikon, perak, tembaga, serta pada beberapa teknologi tertentu Cd, Te, In, Ga, atau Pb. Rabaia *et al*. mengaitkan ekonomi sirkular PV dengan prinsip 10R, seperti *refuse, rethink, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle*, dan *recover* (Rabaia *et al*, 2024). Kerangka ini memperluas cara pandang dari sekadar daur ulang menuju desain sistem yang lebih preventif. Kajian lain juga menekankan bahwa pengelolaan panel akhir masa pakai perlu mengombinasikan pemisahan mekanik, perlakuan termal, proses kimia, dan pemulihan material bernilai agar model sirkular tidak berhenti pada daur ulang bernilai rendah (Khrishnasamy *et al*, 2024).

G. Sintesis Tematik dan Kesenjangan Penelitian

Sintesis literatur menunjukkan bahwa perkembangan sel surya berada pada persimpangan antara kematangan teknologi dan kebutuhan inovasi lanjutan. Silikon kristalin masih menjadi fondasi pasar, sementara generasi baru seperti perovskite dan tandem membuka peluang efisiensi yang lebih tinggi. Namun, teknologi baru belum dapat dilepaskan dari pertanyaan apakah efisiensi laboratorium dapat diterjemahkan menjadi produk yang stabil, murah, aman, dan dapat diproduksi massal.

Kesenjangan pertama adalah perlunya kajian yang menghubungkan efisiensi sel dengan produktivitas energi pada kondisi operasi nyata, terutama di wilayah tropis yang memiliki suhu tinggi, kelembapan tinggi, dan variasi cuaca. Banyak klaim performa didasarkan pada standard test conditions, padahal modul di lapangan menghadapi degradasi termal, soiling, shading, delaminasi, korosi, dan kelembapan (Aghaei M *et al*, 2022; Al-Mahdi *et al*, 2024;

Luo *et al*, 2021). Kesenjangan kedua berkaitan dengan perovskite dan tandem, khususnya bukti stabilitas jangka panjang, protokol uji konsisten, dan strategi mitigasi risiko timbal.

Kesenjangan lain berkaitan dengan ekonomi sirkular. Literatur daur ulang PV berkembang cepat, tetapi masih terdapat jarak antara teknologi daur ulang laboratorium dan sistem industri yang ekonomis. Diperlukan kajian yang menghitung kelayakan logistik pengumpulan panel, biaya pemulihan material, kualitas material hasil daur ulang, dan desain regulasi produsen.

Tabel 3. *Sintesis tematik, tantangan, dan peluang riset*

Tema	Temuan utama	Tantangan	Peluang riset
Dominasi silikon	Silikon kristalin tetap menjadi teknologi komersial utama.	Batas efisiensi praktis dan kebutuhan pengurangan biaya manufaktur.	Kontak pasivasi, heterojunction, optimasi degradasi, dan desain daur ulang.
Teknologi baru	Perovskite, tandem, dan multijunction menunjukkan potensi efisiensi tinggi.	Stabilitas, toksisitas, skalabilitas, dan reliabilitas jangka panjang.	Uji lapangan tropis, enkapsulasi, formulasi bebas timbal, dan standarisasi pengujian.
Integrasi sistem	PV berkembang cepat tetapi bersifat variabel.	Keterbatasan jaringan, kebutuhan storage, dan desain pasar listrik.	Studi fleksibilitas, <i>smart grid</i> , <i>demand response</i> , dan model bisnis PV terdistribusi.
Kebijakan dan adopsi	Regulasi memengaruhi kelayakan investasi konsumen dan utilitas.	Ketidakpastian tarif, kuota, prosedur, dan insentif.	Analisis kebijakan PLTS atap, perilaku konsumen, dan pembiayaan energi.
Ekonomi sirkular	Volume panel akhir masa pakai akan meningkat.	Biaya daur ulang, logistik, dan kualitas <i>material recovery</i> .	LCA, <i>techno-economic analysis</i> , <i>extended producer responsibility</i> , dan desain modul mudah didaur ulang.

H. Implikasi Teoretis dan Praktis

Secara teoretis, kajian ini menunjukkan bahwa penelitian sel surya perlu ditempatkan dalam kerangka sosio-teknis. Efisiensi sel dan inovasi material tetap penting, tetapi tidak cukup untuk menjelaskan keberhasilan transisi energi. Teknologi PV beroperasi dalam ekosistem yang mencakup rantai pasok material, manufaktur, standar kualitas, jaringan listrik, perilaku konsumen, pembiayaan, regulasi, dan tata kelola limbah. Karena itu, riset sel surya masa depan perlu menggabungkan perspektif *material science*, *electrical engineering*, *environmental management*, *policy studies*, dan *innovation management*.

Secara praktis, pembuat kebijakan perlu memastikan bahwa ekspansi PV tidak hanya diarahkan pada target kapasitas terpasang, tetapi juga pada kesiapan sistem. Hal ini mencakup investasi jaringan, skema penyimpanan energi, standar keselamatan instalasi, insentif yang stabil, mekanisme interkoneksi yang transparan, dan dukungan terhadap industri daur ulang. Bagi pelaku industri, peluang terbesar tidak hanya berada pada penjualan modul, tetapi juga

pada layanan instalasi berkualitas, operasi dan pemeliharaan, sistem monitoring, pembiayaan, serta pemulihan material.

SIMPULAN

Kajian literatur ini menyimpulkan bahwa sel surya fotovoltaik telah menjadi teknologi utama dalam transisi energi global. Pertumbuhan kapasitas dan pembangkitan solar PV selama beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa teknologi ini telah memasuki fase komersialisasi masif. Silikon kristalin masih mendominasi pasar karena kombinasi efisiensi, biaya, reliabilitas, dan umur pakai yang matang. Meski demikian, teknologi baru seperti perovskite, tandem, multijunction, bifacial, dan thin-film tetap penting karena menawarkan jalur peningkatan kinerja dan perluasan aplikasi.

Tantangan utama sel surya tidak hanya berkaitan dengan peningkatan efisiensi, tetapi juga dengan stabilitas material, skalabilitas manufaktur, integrasi jaringan, kebijakan, pembiayaan, dan keberlanjutan siklus hidup. Perovskite dan tandem menunjukkan prospek tinggi, tetapi masih memerlukan validasi umur pakai, mitigasi toksisitas, dan proses produksi yang konsisten. Di tingkat implementasi, PV membutuhkan sistem kelistrikan yang fleksibel dan regulasi yang memberi kepastian bagi konsumen maupun utilitas. Dalam jangka panjang, isu limbah panel dan daur ulang perlu menjadi bagian integral dari strategi pengembangan PV.

Dengan demikian, arah penelitian dan kebijakan sel surya perlu bergerak menuju pendekatan terpadu: meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya, memperpanjang umur pakai, menjamin keamanan material, memperkuat jaringan listrik, dan membangun ekonomi sirkular. Pendekatan ini memungkinkan sel surya tidak hanya menjadi sumber listrik rendah emisi, tetapi juga teknologi energi yang berkelanjutan secara teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Institut Teknologi Rokan Hilir atas dukungan fasilitas dan akademis yang diberikan, serta kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian kajian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agency, I. E. (2025). *Global Energy Review 2025*.
- Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., Oreski, G., Reinders, A., Schmitz, J., Theelen, M., Yilmaz, P., & Kettle, J. (2022). Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159(July 2021), 112160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>
- Al-ali, S., Ghani, A., & Mahmoud, M. (2025). Energy Conversion and Management : X A review of solar photovoltaic technologies : developments , challenges , and future perspectives. *Energy Conversion and Management: X*, 27(May), 101057. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101057>
- Ali, A. O., Elgohr, A. T., El-mahdy, M. H., Zohir, H. M., Emam, A. Z., Mostafa, M. G., Al-razgan, M., Kasem, H. M., & Elhadidy, M. S. (2025). Energy Conversion and Management : X Advancements in photovoltaic technology : A comprehensive review

- of recent advances and future prospects. *Energy Conversion and Management: X*, 26(March), 100952. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100952>
- Azkar, S., Hasan, U., Zahid, M. A., Park, S., & Yi, J. (2024). *Stability Challenges for a Highly Efficient Perovskite / Silicon Tandem Solar Cell : A Review*. 2300967, 1–19. <https://doi.org/10.1002/solr.202300967>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Hao, X., Yajie, J., Kopidakis, N., Bothe, K., & Siefert, G. (2025). *Solar Cell Efficiency Tables (Version 66). Version 66*, 795–810. <https://doi.org/10.1002/pip.3919>
- Kamal, M., Rabaia, H., Shehata, N., Olabi, V., Abdelkareem, A., Semeraro, C., Chae, K., & Taha, E. (2024). Enabling the circular economy of solar PV through the 10Rs of sustainability : Critical review , conceptualization , barriers , and role in achieving SDGs. *Sustainable Horizons*, 11(October 2023), 100106. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2024.100106>
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). *Solar energy for future world : - A review*. 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- Kopecek, R., & Libal, J. (2021). *Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges*.
- Lembaran, T. (2024). *Menimbang : a*. 2024.
- Luo, W., Enrico, C., Sheng, Y., Wang, Y., Myint, A., Reindl, T., Kumar, A., & Praveetoni, M. (2021). Photovoltaic module failures after 10 years of operation in the tropics. *Renewable Energy*, 177, 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.145>
- Mahdi, H. Al, Leahy, P. G., Alghoul, M., & Morrison, A. P. (2024). *A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms : Causes and Detection Techniques*. 43–82.
- Mao, D., Yang, S., Ma, L., Ma, W., & Yu, Z. (2025). Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 434(December 2023), 140320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140320>
- Matthew, J., Joanne, E., Patrick, M., Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Mayo-wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., ... Moher, D. (2021). *Article : The PRISMA 2020 statement : An updated guideline for reporting systematic reviews*.
- Mdallal, A., Yasin, A., Mahmoud, M., Ali, M., Hai, A., & Ghani, A. (2025). A comprehensive review on solar photovoltaics: Navigating generational shifts , innovations , and sustainability. *Sustainable Horizons*, 13(January), 100137. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100137>
- Park, N. (2024). Environmental Science fundamentals to technological progress †. *Energy & Environmental Science*, 17(May), 4390–4425. <https://doi.org/10.1039/D3EE03638C>
- Programme, T. C. (2025). *Trends in photovoltaic applications 2025*.
- Seyisi, T., Fouda-mbanga, B. G., Mnyango, J. I., Nthwane, Y. B., Nyoni, B., & Mhlanga, S. (2025). Major challenges for commercialization of perovskite solar cells : A critical review. *Energy Reports*, 13(September 2024), 1400–1415. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.019>
- Sharma, P., & Mishra, R. K. (2025). Comprehensive study on photovoltaic cell ' s generation and factors affecting its performance : A Review. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 5. <https://doi.org/10.1007/s40243-024-00292-5>
- Sivagami, K., Bose, S., Kumar, A., Sreenivas, M., & Ghosh, A. (2024). *Solar Panel Recycling from Circular Economy Viewpoint : A Review*. 60(2), 328–345. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23601862>

- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology : An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104(March), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Wali, Q., Jan, F., Ejaz, M., Ullah, A., Iqbal, Y., & Jose, R. (2020). Advances in stability of perovskite solar cells. *Organic Electronics*, 78(February 2019), 105590. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105590>
- Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L., & Geng, C. (2022). Solar Energy Materials and Solar Cells A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 248(September), 111976. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976>
- Yang, C., Hu, W., Liu, J., Han, C., Gao, Q., Mei, A., & Zhou, Y. (2024). Achievements , challenges , and future prospects for industrialization of perovskite solar cells. *Light: Science & Applications*. <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01461-x>
- Zhang, C., Chen, C., & Ran, C. (2026). Sustainable Chemistry for Energy Materials Research progress and future prospects of perovskite tandem photovoltaics. *Sustainable Chemistry for Energy Materials*, 3(January), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.scenem.2026.100032>
- Zhou, J., Huang, Q., Ding, Y., & Hou, G. (2022). Nano Energy Passivating contacts for high-efficiency silicon-based solar cells: From single-junction to tandem architecture. *Nano Energy*, 92(October 2021), 106712. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106712>