

Rekayasa Antarmuka ETL dan HTM Bebas Dopan untuk Sel Surya Perovskit Efisien dan Stabil

Syeva Arsyah Wahyu Alifqi^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: syeva.alifqi@mipa.idu.ac.id

ABSTRACT

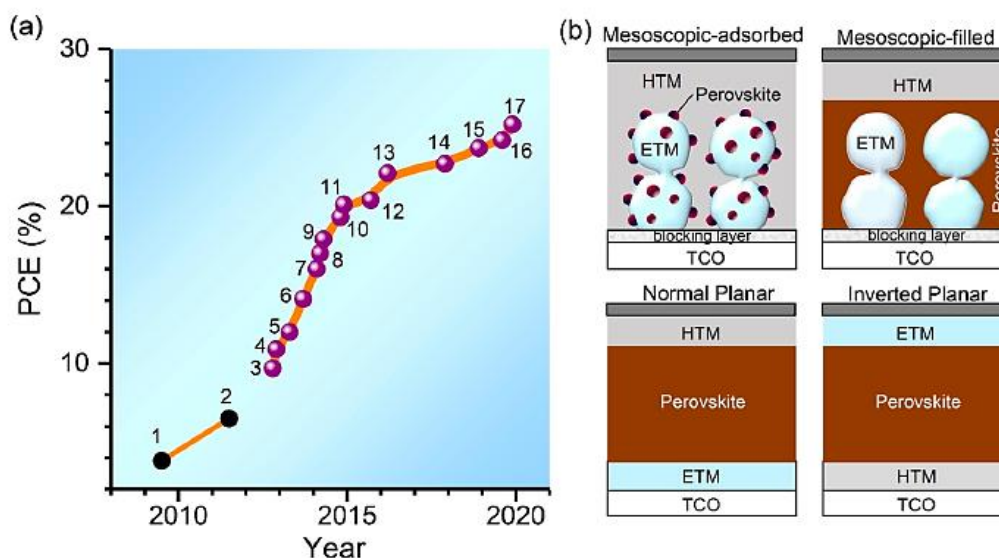
Perovskite solar cells (PSCs) have demonstrated remarkable power conversion efficiencies (PCEs), yet their path to commercialization is critically hindered by significant non-radiative recombination losses and long-term operational instability. These degradation pathways and efficiency losses are predominantly located at the interfaces between the perovskite absorber and the charge transport layers (ETL and HTM). The state-of-the-art often relies on high-temperature processed TiO₂ as the ETL and the expensive, hygroscopic dopant-reliant Spiro-OMeTAD as the HTM, which themselves are primary sources of instability. The research gap is the urgent need for stable, low-cost, and particularly dopant-free interfacial materials that can be processed at low temperatures. This literature review synthesizes and analyzes recent progress in interface engineering, focusing on low-temperature ETL alternatives (e.g., fullerene derivatives and ZnO) and the development of high-performance dopant-free HTMs. We conclude that replacing the problematic Spiro-OMeTAD with stable, dopant-free alternatives, such as the polymer P3HT or robust inorganic materials like NiO_x and CuGaO₂, is the most critical and effective strategy for realizing efficient, stable, and commercially viable perovskite photovoltaics.

Keywords: Perovskite Solar Cells, Interface Engineering, Hole Transport Material (HTM), Electron Transport Layer (ETL), Dopant-Free, Stability, P3HT, NiO_x

PENDAHULUAN

Sel surya perovskit (PSC) telah muncul sebagai salah satu teknologi fotovoltaik generasi baru yang paling menjanjikan dalam satu dekade terakhir. Keunggulan utamanya terletak pada efisiensi konversi daya (PCE) yang luar biasa, yang telah meningkat pesat dari 3.8% pada tahun 2009 menjadi nilai tersertifikasi yang kini melampaui 25.2%, menyaingi efisiensi sel surya komersial berbasis silikon. Kecepatan progres ini, ditambah dengan biaya material yang rendah dan kemudahan fabrikasi berbasis larutan (*solution-processed*), menjadikan PSC sebagai kandidat kuat untuk teknologi fotovoltaik berbiaya rendah di masa depan [1].

Meskipun efisiensi *single-junction* PSC telah berkembang pesat, *state-of-the-art* dari teknologi ini masih menghadapi tantangan signifikan yang menghambat komersialisasi skala besar. Masalah utamanya adalah (1) ketidakstabilan perangkat jangka panjang ketika terpapar faktor lingkungan seperti kelembaban, oksigen, radiasi UV, dan panas; (2) kerugian efisiensi akibat rekombinasi muatan non-radiatif yang tinggi; dan (3) munculnya histeresis pada kurva arus-tegangan (J-V). Berbagai studi telah mengidentifikasi bahwa kerugian rekombinasi dan jalur degradasi ini sebagian besar berasal dari antarmuka (*interfaces*) yang tidak ideal antara lapisan penyerap perovskit dan lapisan pengangkut muatan, yaitu *Electron Transport Layer* (ETL) dan *Hole Transport Layer* (HTM). Cacat (*defects*) pada permukaan dan batas butir (*grain boundaries*) perovskit bertindak sebagai "perangkap" muatan (*trap states*) yang memicu rekombinasi sebelum elektron dan lubang dapat diekstraksi secara efisien [1, 3]



Gambar 1. (a) Evolusi efisiensi sel surya perovskit dari tahun 2009 hingga 2020. (b) Skema berbagai arsitektur perangkat PSC, termasuk struktur Mesoskopik (teradsorpsi dan terisi), Planar Normal (n-i-p), dan Planar Terbalik (p-i-n).

Untuk memahami pentingnya rekayasa antarmuka, Gambar 1b menunjukkan arsitektur perangkat PSC yang umum digunakan. Sebuah perangkat PSC pada dasarnya adalah tumpukan lapisan tipis yang terdiri dari kontak transparan (TCO), ETL, lapisan perovskit (penyerap cahaya), HTM, dan elektroda logam. Arsitektur ini dapat berupa "planar normal" (n-i-p), di mana ETL (seringkali TiO_2) berada di bagian bawah, atau "planar terbalik" (p-i-n), di mana HTM (seringkali organik) berada di bagian bawah. Kinerja keseluruhan perangkat sangat bergantung pada kualitas dari dua antarmuka kritis: ETL/Perovskit dan Perovskit/HTM [1].

Dalam upaya mencapai *state-of-the-art* pada arsitektur n-i-p, TiO_2 telah menjadi material ETL standar. Namun, TiO_2 memiliki kelemahan yang signifikan: pemrosesannya memerlukan sintering suhu tinggi ($>450^\circ\text{C}$), yang menghalangi aplikasi pada substrat fleksibel dan sel tandem silikon; ia juga rentan terhadap degradasi di bawah paparan UV dan berkontribusi besar terhadap masalah histeresis J-V. Di sisi HTM, material standar Spiro-OMeTAD memiliki biaya produksi yang sangat tinggi dan, yang lebih penting, kinerjanya bergantung pada aditif dopan higroskopis (seperti Li-TFSI dan tBP). Aditif-aditif ini diketahui dapat menyerap kelembaban dan memicu degradasi lapisan perovskit, sehingga menjadi salah satu sumber utama ketidakstabilan perangkat [1-3].

Research gap (celah penelitian) yang jelas terletak pada kebutuhan mendesak untuk mengembangkan material ETL dan HTM yang stabil, murah, dan dapat diproses pada suhu rendah, yang mampu membentuk antarmuka "ideal" dengan perovskit. Secara khusus, pengembangan HTM *dopant-free* (bebas dopan) kini dipandang sebagai langkah fundamental untuk mencapai stabilitas jangka panjang yang dibutuhkan untuk komersialisasi [4].

Tujuan dari artikel review ini adalah untuk mengkaji dan mensintesis kemajuan terkini dalam rekayasa antarmuka untuk sel surya perovskit yang efisien dan stabil. Tinjauan pustaka ini akan secara khusus menganalisis tantangan dan keunggulan dari material ETL dan HTM utama yang dilaporkan dalam literatur. Ulasan ini akan difokuskan pada tiga bidang utama: (1) Peran material berbasis fullerene dan ZnO sebagai ETL alternatif suhu rendah; (2) Perkembangan pesat HTM bebas dopan, baik organik (seperti P3HT) maupun anorganik (seperti NiOx dan CuGaO_2), sebagai pengganti Spiro-OMeTAD; dan (3) Strategi pasivasi antarmuka menggunakan aditif atau material 2D/3D hibrid untuk mengurangi rekombinasi non-radiatif dan meningkatkan ketahanan perangkat [2,3].

METODE PENELITIAN

Kajian ini merupakan sebuah tinjauan pustaka terfokus (*focused literature review*) yang bertujuan untuk menganalisis dan mensintesis kemajuan terkini dalam bidang rekayasa antarmuka

(*interface engineering*) pada sel surya perovskit. Metode penelitian yang digunakan bukanlah eksperimen primer, melainkan studi literatur sistematis terhadap korpus penelitian yang telah ada.

Bahan utama yang digunakan dalam pengkajian ini adalah kumpulan dari 21 artikel ilmiah primer dan artikel review yang relevan, yang telah diterbitkan dalam jurnal-jurnal *peer-review* terkemuka (seperti *Nature*, *Science*, *Chemical Reviews*, dan *Advanced Materials*). Artikel-artikel ini, yang diterbitkan antara tahun 2017 dan 2023, secara spesifik membahas pengembangan, karakterisasi, dan penerapan material antarmuka pada sel surya perovskit. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan menganalisis secara mendalam temuan-temuan yang disajikan dalam 21 artikel tersebut. Data yang diekstraksi meliputi, namun tidak terbatas pada:

- Efisiensi Konversi Daya (PCE) perangkat.
- Parameter fotovoltaiik (V_{oc} , J_{sc} , FF).
- Data stabilitas perangkat (terhadap kelembaban, panas, dan cahaya).
- Karakterisasi material antarmuka (morfologi, sifat elektronik, dan struktur).
- Analisis rekombinasi muatan dan mekanisme degradasi.

Proses analisis data bersifat kualitatif-sintetis. Temuan-temuan dari berbagai artikel dikelompokkan berdasarkan tema utama yang telah diidentifikasi, yaitu (1) pengembangan *Electron Transport Layers* (ETL) alternatif seperti fullerene dan ZnO, (2) kemajuan *Hole Transport Materials* (HTM) bebas dopan (*dopant-free*), dan (3) strategi pasivasi cacat di antarmuka. Hasil dari sintesis ini kemudian disusun secara naratif untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai *state-of-the-art* di bidang rekayasa antarmuka, mengidentifikasi celah penelitian (*research gap*), dan memetakan prospek masa depan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan dalam pendahuluan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja dan stabilitas sel surya perovskit (PSC) secara fundamental ditentukan oleh kualitas antarmuka antara lapisan penyerap perovskit dan lapisan pengangkut muatan di kedua sisinya. Rekombinasi muatan non-radiatif, yang merupakan mekanisme kerugian efisiensi utama, diketahui sangat dominan terjadi pada antarmuka-antarmuka ini. Cacat (*defects*) di permukaan dan batas butir (*grain boundaries*) perovskit bertindak sebagai perangkap muatan (*trap states*), yang menghambat ekstraksi muatan dan secara langsung menurunkan tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) perangkat. Oleh karena itu, rekayasa antarmuka telah menjadi fokus penelitian paling krusial untuk menekan rekombinasi, mengurangi histeresis J-V, dan meningkatkan stabilitas perangkat secara bersamaan. Tinjauan ini akan membahas kemajuan-kemajuan kunci dalam rekayasa material di kedua sisi antarmuka: Lapisan Transport Elektron (ETL) dan Lapisan Transport Lubang (HTM).

Lapisan Transport Elektron (ETL) yang ideal harus memiliki mobilitas elektron yang tinggi, transparansi optik yang baik di seluruh spektrum yang relevan, dan pita konduksi (CB) yang selaras dengan lapisan perovskit untuk memfasilitasi transfer elektron yang efisien sekaligus memblokir lubang (*hole*).

Secara historis, titanium dioksida (TiO_2) telah menjadi material ETL standar untuk arsitektur n-i-p (planar normal) dan mesoskopik, yang menghasilkan banyak efisiensi rekor. Namun, TiO_2 memiliki kelemahan signifikan: ia memerlukan proses *sintering* pada suhu yang sangat tinggi ($>450^\circ C$). Kebutuhan suhu tinggi ini tidak hanya meningkatkan biaya produksi tetapi juga menghalangi penggunaannya pada substrat fleksibel dan, yang terpenting, tidak kompatibel dengan fabrikasi sel tandem perovskit/silikon. Selain itu, antarmuka TiO_2 /perovskit diketahui sebagai sumber utama histeresis J-V dan rentan terhadap degradasi di bawah paparan radiasi UV.

Keterbatasan ini mendorong penelitian intensif untuk mencari ETL alternatif yang dapat diproses pada suhu rendah. Seng oksida (ZnO) menarik perhatian karena dapat difabrikasi melalui metode larutan suhu rendah ($<150^\circ C$) dan memiliki mobilitas elektron yang secara inheren jauh lebih tinggi daripada TiO_2 . ZnO dapat difabrikasi dalam berbagai nanostruktur, termasuk film kompak, nanopartikel, dan nanorod. Akan tetapi, tantangan besar muncul dari stabilitas kimianya: permukaan ZnO yang bersifat basa terbukti dapat bereaksi dengan kation organik di dalam perovskit. Reaksi asam-basa di antarmuka ini memicu dekomposisi lapisan penyerap menjadi PbI_2 , terutama selama proses *annealing* termal, yang menghancurkan perangkat. Solusi yang berhasil

untuk masalah ini ditemukan melalui pasivasi antarmuka. Dengan melapisi permukaan ZnO (misalnya, nanorod) dengan lapisan penyangga (*buffer layer*) anorganik yang sangat tipis dan inert, seperti Al_2O_3 yang dideposisi melalui ALD, reaksi dekomposisi dapat sepenuhnya dicegah. Lapisan pasivasi ini menonaktifkan situs-situs reaktif di permukaan ZnO tanpa menghalangi transport elektron, sehingga menghasilkan perangkat yang stabil dengan efisiensi tinggi.

Untuk arsitektur p-i-n (planar terbalik), material berbasis fullerene dan turunannya, seperti PCBM ([6,6] - phenyl C_{61} - butyric acid methyl ester) dan C_{60} , telah menjadi standar industri. Keberhasilan mereka tidak hanya terletak pada pemrosesan suhu rendah dan keselarasan energi (LUMO) yang sangat baik untuk ekstraksi elektro, tetapi juga pada fungsi ganda mereka sebagai pasivator cacat. Telah ditunjukkan secara luas bahwa molekul fullerene memiliki kemampuan untuk berdifusi ke dalam batas butir (*grain boundaries*) dan menempati kekosongan (*vacancies*) di permukaan perovskit. Proses pasivasi ini secara efektif menetralkan *trap states* yang menyebabkan rekombinasi non-radiatif. Kemampuan pasivasi ganda inilah yang menjadi alasan utama mengapa perangkat berbasis fullerene secara konsisten menunjukkan histeresis J-V yang jauh lebih rendah (atau bahkan dapat dihilangkan) dibandingkan dengan perangkat berbasis TiO_2 .

Di sisi antarmuka lainnya, tantangan terbesar adalah mengganti material transport lubang (HTM) standar industri, yaitu Spiro-OMeTAD. Spiro-OMeTAD memiliki dua kelemahan fatal untuk komersialisasi: (1) harganya sangat mahal karena sintesis multi-langkah yang rumit, dan (2) kinerjanya yang tinggi sangat bergantung pada aditif dopan kimia. Aditif ini, seperti Li-TFSI dan tBP, bersifat higroskopis (menyerap kelembaban dari udara) dan korosif terhadap elektroda logam, yang ironisnya menjadi salah satu pemicu utama masuknya kelembaban dan degradasi perangkat. Oleh karena itu, *state-of-the-art* saat ini berfokus pada pengembangan HTM *dopant-free* (bebas dopan) yang stabil dan murah.

Sebuah terobosan besar di bidang ini adalah penggunaan kembali polimer konjugasi klasik, Poly(3-hexylthiophene) (P3HT), sebagai HTM bebas dopan. P3HT tidak hanya jauh lebih murah daripada Spiro-OMeTAD, tetapi juga secara alami bersifat hidrofobik (menolak air), yang secara drastis meningkatkan ketahanan perangkat terhadap kelembaban. Tantangan utama P3HT murni adalah keselarasan energinya yang kurang ideal dan mobilitas lubang yang rendah. Namun, sebuah studi kunci oleh Jung et al. (2019) memecahkan masalah ini melalui rekayasa antarmuka yang cerdas. Mereka memperkenalkan "arsitektur halida berlapis ganda" (DHA) pada permukaan perovskite, lapisan halida *wide-bandgap* tipis yang ditumbuhkan *in-situ*. Lapisan DHA ini memberikan dua manfaat krusial: pertama, ia mempasivasi permukaan perovskit di bawahnya, mengurangi rekombinasi dan meningkatkan V_{oc} . Kedua, ia menyediakan permukaan yang ideal untuk mempromosikan penataan-diri (*self-assembly*) dan kristalisasi P3HT, yang sangat penting untuk mencapai mobilitas lubang yang tinggi. Hasilnya adalah perangkat berbasis P3HT bebas dopan yang stabil dengan efisiensi tersertifikasi yang sangat tinggi, membuktikan bahwa alternatif bebas dopan dapat mengungguli standar industri.

Selain polimer, HTM anorganik bebas dopan juga menawarkan jalur menuju stabilitas tertinggi. Nikel Oksida (NiOx) telah banyak diteliti karena transparansi optiknya yang tinggi, keselarasan pita energi yang baik, dan stabilitas kimia/termal yang luar biasa. Perangkat p-i-n yang menggunakan NiOx sebagai HTM telah menunjukkan efisiensi tersertifikasi yang tinggi pada area perangkat yang luas, menunjukkan potensinya untuk aplikasi skala besar yang stabil. Demikian pula, material delafossite p-type seperti Copper Gallium Oxide (CuGaO_2) telah menunjukkan kinerja yang kuat dengan stabilitas yang sangat baik di udara ambien. Tren ini diperkuat oleh pengembangan molekul-molekul kecil organik baru yang dirancang khusus untuk memiliki konduktivitas tinggi tanpa perlu dopan, yang telah mendorong efisiensi sel p-i-n ke tingkat yang sangat kompetitif.

Dari pembahasan di atas, jelas bahwa antarmuka yang ideal harus multifungsi: mentranspor muatan dan mempasivasi cacat. Strategi canggih kini menggabungkan fungsi-fungsi ini. Pendekatan yang sangat sukses adalah menciptakan heterostruktur hibrid 2D/3D. Dalam metode ini, lapisan perovskit 2D yang secara alami jauh lebih stabil dan hidrofobik (seperti tipe Dion-Jacobson atau yang menggunakan spacer PEAI) sengaja ditumbuhkan sebagai lapisan ultra-tipis di atas atau di batas butir lapisan perovskit 3D utama. Lapisan 2D ini bertindak sebagai "perisai" yang secara fisik memblokir masuknya kelembaban dan secara elektronik mempasivasi *trap states* di

permukaan 3D, yang secara dramatis meningkatkan V_{oc} dan stabilitas operasional, bahkan dalam kondisi *damp heat* (85°C/85% RH).

Konsep unik seperti perovskit "hollow" (berongga) juga menunjukkan potensi besar. Dengan menambahkan molekul besar seperti *ethylenediammonium* (en), kekosongan (vacancies) kation logam (Pb/Sn) secara sengaja diciptakan di dalam kisi kristal. Menariknya, struktur "hollow" ini menunjukkan stabilitas kimia yang jauh lebih tinggi dibandingkan struktur 3D konvensional. Pengembangan antarmuka yang kuat dan stabil inilah yang pada akhirnya memungkinkan integrasi PSC ke dalam arsitektur paling kompleks: sel tandem perovskit/silikon. Untuk mencapai efisiensi rekor (tersertifikasi >25.7%), sel perovskit harus dideposisi secara konformal di atas permukaan silikon bertekstur. Keberhasilan dalam menciptakan HTM (seperti NiO_x) dan ETL (seperti SnO₂) yang stabil dan dapat melapisi topografi kasar ini adalah kunci untuk mewujudkan sel tandem berkinerja tinggi.

KESIMPULAN

Kajian ini telah menganalisis dan mensintesis kemajuan-kemajuan kunci dalam rekayasa antarmuka sel surya perovskit, yang bertujuan untuk mengatasi dua masalah fundamental yang menghambat komersialisasi: rekombinasi muatan non-radiatif dan instabilitas perangkat jangka panjang. Temuan utama dari tinjauan ini adalah bahwa pergeseran paradigma dari material antarmuka yang hanya "memadai" secara energetik menjadi material yang "multifungsi" secara aktif, merupakan jawaban atas tantangan tersebut.

Hasil analisis menegaskan bahwa antarmuka antara perovskit dan lapisan pengangkut muatan adalah titik paling kritis yang menentukan kinerja dan masa pakai perangkat. Pada sisi transport elektron (ETL), material standar TiO₂ teridentifikasi sebagai sumber utama histeresis dan instabilitas UV, serta memerlukan pemrosesan suhu tinggi yang tidak praktis. Material alternatif suhu rendah seperti ZnO, meskipun memiliki mobilitas elektron yang superior, terbukti memiliki masalah stabilitas kimia yang fatal di antarmukanya, yang dapat mengurai lapisan perovskit. Solusi untuk ETL terletak pada material yang tidak hanya efisien tetapi juga bersifat pasif secara kimia (seperti ZnO yang dipasivasi Al₂O₃) atau material yang secara aktif mempasivasi cacat, seperti fullerene (PCBM), yang terbukti sangat krusial dalam menghilangkan histeresis J-V [1,2,10].

Temuan yang lebih signifikan didapatkan pada sisi transport lubang (HTM). Sintesis dari literatur ini mengukuhkan bahwa HTM standar, Spiro-OMeTAD, yang bergantung pada aditif dopan higroskopis (penyerap kelembaban) seperti Li-TFSI, merupakan salah satu kontributor utama ketidakstabilan perangkat. Jawaban atas masalah stabilitas ini, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai temuan, adalah pengembangan HTM *dopant-free* (bebas dopan). Terobosan kunci menunjukkan bahwa polimer hidrofobik berbiaya rendah seperti P3HT, ketika dikombinasikan dengan rekayasa antarmuka yang tepat (seperti arsitektur DHA), dapat mencapai efisiensi dan stabilitas operasional yang melampaui Spiro-OMeTAD yang didoping. Lebih lanjut, material HTM anorganik yang stabil seperti NiO_x dan CuGaO₂ juga menunjukkan kelayakan yang tinggi untuk perangkat berbiaya rendah dan tahan lama [2,7].

Sebagai kesimpulan, rekayasa antarmuka telah berevolusi. Tujuannya bukan lagi sekadar menciptakan keselarasan energi, melainkan menciptakan antarmuka multifungsi yang secara simultan mempasivasi cacat, stabil secara kimiawi, dan (dalam kasus HTM) menghilangkan kebutuhan akan aditif dopan yang merusak. Kemajuan dalam menciptakan antarmuka yang stabil dan dapat diproses pada suhu rendah inilah yang pada akhirnya menjadi fondasi yang memungkinkan realisasi arsitektur perangkat generasi berikutnya yang paling kompleks, seperti sel tandem perovskit/silikon bertekstur yang sangat efisien [1,4].

SARAN

Berdasarkan temuan-temuan yang telah dianalisis, penelitian di masa depan disarankan untuk beralih secara tegas dari material antarmuka standar yang didoping, seperti Spiro-OMeTAD, menuju optimalisasi material *dopant-free* (bebas dopan) yang stabil secara inheren. Keberhasilan HTM polimerik seperti P3HT dan HTM anorganik seperti NiO_x menunjukkan bahwa ini adalah jalur yang paling praktis untuk mencapai stabilitas jangka panjang. Secara teoretis, studi lebih

lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme fundamental yang meningkatkan kinerja antarmuka ini, seperti penataan-diri (*self-assembly*) P3HT pada lapisan *double-layered halide* (DHA). Demikian pula, pada sisi ETL, penggunaan material reaktif seperti ZnO murni sebaiknya dihindari, dan fokus harus diberikan pada pengembangan lapisan pasivasi yang stabil (misalnya, Al₂O₃-coated ZnO) atau material yang secara aktif mempasivasi cacat seperti fullerene. Terakhir, untuk aplikasi praktis, strategi antarmuka yang paling menjanjikan ini, termasuk heterostruktur hibrid 2D/3D, harus segera divalidasi menggunakan metode deposisi yang dapat diskalakan agar kompatibel dengan arsitektur canggih seperti sel tandem perovskit/silikon bertekstur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Y. Kim, J.-W. Lee, H. S. Jung, H. Shin, and N.-G. Park, "High-Efficiency Perovskite Solar Cells," *Chem. Rev.*, vol. 120, no. 15, pp. 7867–7918, 2020. doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00107
- [2] P. Zhang *et al.*, "Perovskite solar cells with ZnO electron transporting materials," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, pp. 1–13, 2017.
- [3] L.-L. Deng, S.-Y. Xie, and F. Gao, "Fullerene-based Materials for Photovoltaic Applications: Towards Efficient, Hysteresis-free, and Stable Perovskite Solar Cells," *Adv. Electron. Mater.*, vol. 4, no. 10, p. 1700435, 2018. doi: 10.1002/aelm.201700435.
- [4] E. H. Jung *et al.*, "Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene)," *Nature*, vol. 567, pp. 511–515, Mar. 2019. doi: 10.1038/s41586-019-1036-3.
- [5] H. Zhang, H. Wang, W. Chen, and A. K. Y. Jen, "CuGaO₂: A Promising Inorganic Hole-Transporting Material for Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells," *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 10, p. 1604984, 2017. doi: 10.1002/adma.201604984.
- [6] Y. Wang *et al.*, "Thermodynamically stabilized α -CsPbI₃-based perovskite solar cells with efficiencies > 18%," *Science*, vol. 365, no. 6453, pp. 591–595, Aug. 2019. doi: 10.1126/science.aav8680.
- [7] D. Lu, G. Lv, Z. Xu, Y. Dong, X. Ji, and Y. Liu, "Thiophene-based Two-Dimensional Dion-Jacobson Perovskite Solar Cells with over 15% Efficiency," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 142, no. 26, pp. 11414–11421, Jun. 2020. doi: 10.1021/jacs.0c04403.
- [8] W. Ke *et al.*, "Ethylenediammonium-Based 'Hollow' Pb/Sn Perovskites with Ideal Band Gap Yield Solar Cells with Higher Efficiency and Stability," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 141, no. 21, pp. 8627–8637, May 2019. doi: 10.1021/jacs.9b03662.
- [9] Y. Hou *et al.*, "Efficient tandem solar cells with solution-processed perovskite on textured crystalline silicon," *Science*, vol. 367, no. 6482, pp. 1135–1140, Mar. 2020. doi: 10.1126/science.aaz3691.
- [10] F. Sahli *et al.*, "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency," *Nat. Mater.*, vol. 17, pp. 820–826, Jul. 2018. doi: 10.1038/s41563-018-0115-4.
- [11] K. A. Bush *et al.*, "23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability," *Nat. Energy*, vol. 2, p. 17009, Feb. 2017. doi: 10.1038/NENERGY.2017.9.
- [12] P. Tockhorn *et al.*, "Nano-optical designs for high-efficiency monolithic perovskite-silicon tandem solar cells," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 17, no. 11, hlm. 1145–1152, Nov. 2022. doi: 10.1038/s41565-022-01228-8.
- [13] R. Lin *et al.*, "Small-Molecule-Hole-Transport-Materials-for->26%-Efficient-Inverted-Perovskite-Solar-Cells," *Adv. Mater.*, p. 2307525, 2023. doi: 10.1002/adma.202307525.
- [14] K. Rakstys *et al.*, "Triazatruxene-based Hole Transporting Materials for Highly Efficient Perovskite Solar Cells," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 137, no. 51, hlm. 16172–16175, Des. 2015. doi: 10.1021/jacs.5b11076.
- [15] N.-G. Park, "Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology," *Mater. Today*, vol. 18, no. 2, hlm. 65–72, Mar. 2015. doi: 10.1016/j.mattod.2014.07.007.
- [16] M. Wang *et al.*, "Lead-Free Perovskite Materials for Solar Cells," *Nano-Micro Lett.*, vol. 13, no. 1, hlm. 62, 2021. doi: 10.1007/s40820-020-00578-z.