

REVIEW PENINGKATAN NILAI EFISIENSI SEL SURYA PEROVSKITE

Aripin Triyanto^{1*}, Ali Imron Hamzah¹, Akhmad Sul Khan¹, Rodemtus nong romi¹, Wahyu Sepriyo¹

^{1,2,3,4,5}Fakultas Teknik, Teknik Elektro, Universitas Pamulang Tangerang Selatan, Indonesia

Email: ¹dosen01315@unpam.ac.id, ²Hamzahya777@gmail.com, ³Sulkhanakhmad168@gmail.com,

⁴roomyrodemtus@gmail.com, ⁵Wahyusepriyo@gmail.com

(*: dosen01315@unpam.ac.id)

Abstrak– Nama perovskite berasal dari Lev A. Perovskite yang adalah seorang ahli mineral Rusia, Dalam beberapa dekade terakhir. Sel surya perovskite (PSC) telah menarik perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir karena peningkatan efisiensi yang cepat dan fabrikasi berbiaya rendah. Efisiensi mendekati 25% telah dicapai PSC pada tahun 2021 dengan perkembangan pesat yang belum pernah terjadi sebelumnya. Dengan penggabungan SnO₂ sebagai ETL dengan penggunaan perovskite FAPbI₃ dan MAPBr₃ sebanyak 5 mol% sehingga dapat menghasilkan efisiensi sebesar 24,7% dengan peningkatan terbesar pada VOC dan faktor pengisian dayanya. Terlepas dari lompatan besar dalam efisiensi ini, perovskit masih diganggu oleh masalah seputar kinerja fotovoltaiiknya. Sebagian besar PSC canggih bergantung pada penggunaan logam mulia emas (Au) atau perak (Ag) sebagai elektroda lawan (CE), sementara Au mahal, Agsangat tidak stabil. CE memainkan peran penting dalam efisiensi dan stabilitas perangkat seluler danmemengaruhi biaya akhir perangkat atau modul. Tiga jenis bahan karbon termasuk karbon hitam, CNT dan graphene telah dipelajari sebagai karbon CE. Pasta karbon yang terutama mengandung karbon hitam adalah bahan CE yang paling banyak digunakan. Selain lapisan perovskit, HTL dan ETL, CE yang terbuat dari pasta karbon dioptimalkan secara detail seperti doping grafit dengan ukuran atau morfologi yang berbeda, rekayasa pelarut, inovasi metode pengendapan, dll. Hingga saat ini, efisiensi terbaik 17. 46% dicapai dari struktur konvensional dengan pasta karbon CE.

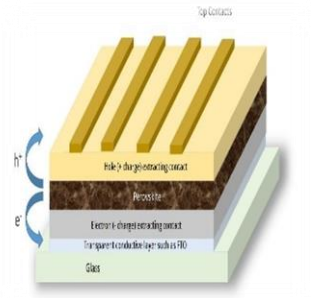
Kata Kunci: Sel surya perovskite, Karbon, Efisiensi

Abstract– The name perovskite comes from Lev A. Perovskite who was a Russian mineralogist, In recent decades. Perovskite solar cells (PSC) have attracted great attention in recent years due to their rapid efficiency improvements and low-cost fabrication. Perovskite solar cells (PSCs) have attracted great attention in recent years due to rapid efficiency improvements and low-cost fabrication. Efficiency close to 25% has been achieved by PSC in 2021 with unprecedented rapid development. By combining SnO₂ as ETL with the use of perovskite FAPbI₃ and MAPBr₃ as much as 5 mol% so as to produce an efficiency of 24.7% with the largest increase in VOC and charging factor. Perovskite solar cells (PSCs) have attracted great attention in recent years due to rapid efficiency improvements and low-cost fabrication. Most advanced PSCs rely on the use of precious metals gold (Au) or silver (Ag) as electrodes versus (CE), while Au is expensive, Ag is very unstable. CE plays an important role in the efficiency and stability of mobile devices and affects the final cost of the device or module. Three types of carbon materials including carbon black, CNTs and graphene have been studied as CE carbon. Carbon pastes that mainly contain carbon black are the most widely used CE ingredients. In addition to perovskite, HTL and ETL layers, CE made of carbon paste is optimized in detail such as graphite doping of different sizes or morphology, solvent engineering, innovation of settling methods, etc. To date, the best efficiency is 17. 46% is achieved from conventional structures with CE carbon paste.

Keywords: Perovskite solar cells, Carbon, Efficiency

1. PENDAHULUAN

Nama perovskite berasal dari Lev A. Perovskite yang adalah seorang ahli mineral Rusia, Dalam beberapa dekade terakhir, sel surya Perovskite telah berkembang pesat baik dari segi biaya produksi maupun efisiensinya [1], [2]. Perovskit halida logam pertama kali disintesis dan dilaporkan pada tahun 1970-an, dan berbentuk ABX₃, dimana A⁺ = Metilamonium (CH₃NH₃⁺ atau MA⁺) Formamidinium (HC(NH₂)₂⁺ atau FA⁺), Sesium (Cs⁺), Rubidium (Rb⁺); B²⁺ = Timbal (Pb²⁺) atau Timah (Sn²⁺); dan X⁻ = Klorin (Cl⁻), brom (Br⁻), atau Yodium (I⁻) [3], [4]. Pada 1990-an, Mitzi et al. mengembangkan lebih lanjut pemrosesan solusi yang lebih maju serta pemahaman tentang sifat struktural dan optoelektronik dari bahan hibrida ini. Perovskit berbasis halida hibrida organik-anorganik dipelajari secara luas pada 1990-an untuk aplikasi dalam teknologi transistor dan dioda pemancar cahaya, karena sifat optoelektroniknya yang sangat baik dan kemampuan proses larutan dari bahan-bahan ini [5]. Namun, bahan halida hibrida ini tidak mendapatkan minat yang luas sampai beberapa laporan pertama pada tahun 2009-2012 tentang aplikasi sel surya menggunakan MAPbI₃ [3], [6]

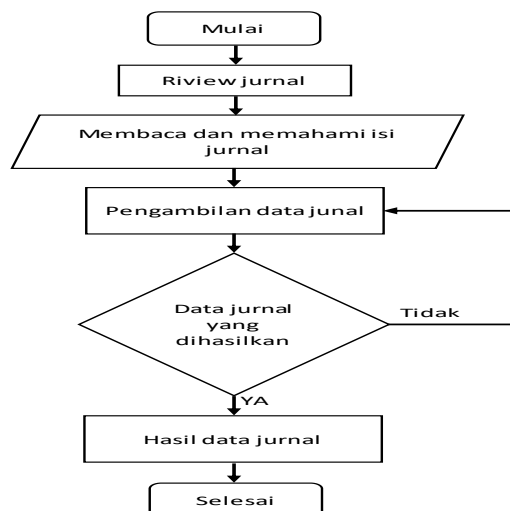


Gambar 1. Konfigurasi perangkat sel surya perovskite konvensional [7]

Sel surya perovskite halida logam organik-anorganik (PSC), biasanya diwakili oleh metilamonium timbal triiodida (MAPbI₃), dan telah melihat pencapaian besarnya sejak demonstrasi pertama PSC yakni pada tahun 2009 dengan pencapaian Efisiensi sebesar 3,8% [8], [9], kemudian tumbuh pada tahun 2011 dengan PCE sebesar 6,5% dalam struktur sel surya peka-pewarna, dan telah menerima perhatian besar sejak laporan terobosan ≈10% PCS solid-state efisien yang menunjukkan stabilitas 500 jam. Perkembangan tata letak perangkat dan film perovskite berkualitas tinggi akhirnya menghasilkan PCE lebih dari 22%. Per 31 Oktober 2017, PCE tertinggi 22,1% [10]. Dalam beberapa tahun terakhir, PSC fleksibel (F-PSC) telah membuat kemajuan besar dalam mengejar kelas ringan dengan efisiensi tinggi, menunjukkan kompetisi energiknya berbeda dengan teknologi fotovoltaik lainnya termasuk kadmium telluride (CdTe), tembaga indium gallium selenide (sel CIGS atau sel CI(G)S atau CIS dan fotovoltaik organik (OPV) [11], [12].

Stabilitas sel surya perovskite berkinerja terbaik hanya satu tahun dibandingkan dengan 25 tahun dalam sel silikon komersial [13]. Peningkatan lebih lanjut dan stabilisasi kinerja sel surya perovskite (PSC) sangat penting untuk mencapai kelayakan komersial fotovoltaik generasi berikutnya [14]. Sel surya perovskite (PSC) menunjukkan potensi besar untuk komersialisasi di masa depan karena efisiensi konversi daya (PCEs) pemasangannya dan kompatibilitasnya dengan pemrosesan solusi suhu rendah sederhana yang memiliki keunggulan biaya dan janji peningkatan perangkat [15]. Secara khusus, sel surya berbasis perovskite (PSC) mewakili teknologi film tipis serbaguna dan hemat biaya dengan efisiensi konversi daya bersertifikat (PCE) melebihi 23% hingga sampai saat ini [16], [17], [18].

2. METODE PENELITIAN

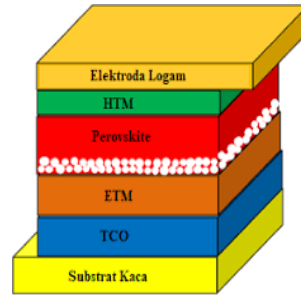


Gambar 2. Flowchart Riview Literatur

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

3.1 . Material/Bahan Sel surya perovskite

Sel surya perovskit tersusun atas lima lapisan, yaitu elektroda logam, *Hole transport material* (HTM), Perovskite, *Electron transport material* (ETM) seperti titanium dioksida, *Transparent Conducting Oxides* (TCO) dan substrat kaca [19].



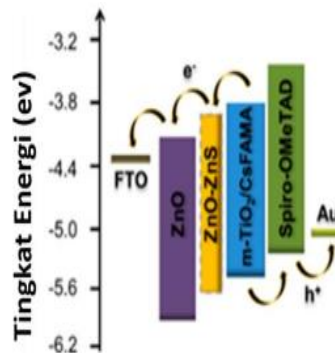
Gambar 3. Struktur sel surya perovskite [19]

1. Substrat kaca / TCO [38] [39] [2].
2. ETM (*Electron transport material*) / ETL (*Electron transport layer*)[40] [41] [24].
3. Perovskite [41] [21].
4. HTM (*Hole-Transporting Material*)[42] [43].
5. Electrode Logam

Elektroda logam di sini biasanya emas (Au), perak (Ag) atau logam yang sangat konduktif lainnya, tetapi lapisan logam terbentuk dalam lingkungan vakum untuk lapisan evaporasi termal dengan konsumsi energi tinggi, yang sangat menghambat produksi dan komersialisasi skala besar [44], [41], Adapun bahan karbon didemonstrasikan sebagai bahan elektroda kontak balik yang efektif untuk sel surya perovskite, sebagai solusi yang cocok untuk menggantikan logam mulia [24], [45].

3.2 . Prinsip Kerja Sel surya perovskite

Prinsip kerja dari sel surya perovskite dimulai dari proses menangkap paparan energi sinar matahari oleh perovskite. lapisan perovskit akan menyerap foton dan elektron akan tereksitasi dari HOMO (highest occupied molecular orbital) ke LUMO (lowest un-occupied molecular orbital) sehingga tercipta eksiton (pasangan lubang dan elektron) [19][37]. FTO dan elektroda logam dikoneksikan dan menghasilkan photocurrent (arus listrik yang diinduksi dari efek fotovoltaiik [46][24].



Gambar 4. Skema Diagram Tingkat Energi Sel Surya Perovskite[19]

Sel surya tersensitisasi zat warna solid lebih dari dua dekade lalu, masih diakui sebagai yang paling dipilih sebagai lapisan perovskit karena celah pitanya yang sempit (1,48 eV), sehingga membuatnya cocok untuk penyerapan cahaya inframerah-dekat dan meningkatkan stabilitas termal [47] [14]. Sebagai sel surya, mereka mencapai efisiensi konversi daya bersertifikat sebesar 25,2 persen, sesuai dengan 80,5 persen batas termodinamika celah pitanya [44]. Dalam penelitian ini kami terutama berfokus pada kemajuan terbaru pada jenis film perovskit dan metode persiapannya, ETM yang paling sering dilaporkan seperti ZnO dan TiO₂, ETM yang muncul seperti SnO₂ dan bilayer dari ETM dan juga HTL yang berbeda seperti konvensional (Spiro-OMeTAD), polimer dan HTL anorganik [13].

3.3 Langkah peningkatan efisiensi Sel Surya Perovskit berbasis karbon

PSC berbasis karbon konvensional, kontak pada antarmuka perovskit/karbon buruk karena sifat lamela lapisan grafit, yang cenderung menghasilkan celah antara serpihan grafit dan perovskit. Untuk mengatasi masalah tersebut, Yang et al. merancang strategi rekayasa pelarut berdasarkan metode sekuensial dua langkah untuk mewujudkan lapisan penutup perovskit yang rata dan kompak yang dapat meningkatkan kontak dengan CE terutama yang terbuat dari serpihan grafit dan pasta karbon. Akhirnya, mereka memperoleh PCE tertinggi 14,38% dengan FF 0,65 dan PCE 10% untuk perangkat area 1 cm². Selain itu, melalui rekayasa koloid untuk membentuk lapisan perovskit yang sangat rata, mereka meningkatkan efisiensi PSC berbasis karbon hingga 14,58%. [11][22][23]

3.4 Efisiensi Sel surya perovskite

Efisiensi yang sangat tinggi untuk sel surya perovskit hibrida organik-anorganik (PSC) telah dicapai. Namun, stabilitas operasional mereka masih perlu ditingkatkan. Ketidakstabilan intrinsik perovskit halida yang disebabkan oleh adanya kation organik yang mudah menguap, serta degradasi perovskit hibrida yang disebabkan oleh permeasi yang merugikan dari air lingkungan (H₂O)/oksigen (O₂) dan difusi atau migrasi ion yang tidak diinginkan adalah alasan utama. Selain memperkuat perovskit itu sendiri, rekayasa antarmuka sekarang dianggap sebagai strategi yang valid untuk memperpanjang masa pakai perangkat dengan mencegah jalur degradasi yang tidak diinginkan [43][48]. Efisiensi tinggi dalam kombinasi dengan biaya bahan dan proses yang rendah adalah nilai jual sel ini dibandingkan silikon komersial atau sel surya organik dan anorganik lainnya [24].

Efisiensi umumnya diambil dari perbandingan antara energi yang masuk kesistem terhadap energi yang keluar dari sistem tersebut[49]. Hal ini berlaku pula untuk sel surya, akan tetapi sebelum merumuskan efisiensi, terlebih dahulu kita harus merumuskan power keluarannya, dihasilkan dari daerah kerja (*operating point*) sel surya yang dirumuskan dengan :

$$P_{out} = V_{mp} \times I_{mp} \text{ (Watt)}$$

(1)

Kemudian dirumuskan melalui persamaan:

$$FF = V_{mp} \cdot I_{mp} / V_{oc} \cdot I_{sc}$$

(2)

maka diperoleh hasil rumusan:

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \text{ (Watt)}$$

(3)

Setelah diketahui nilai P_{in} dan P_{out} maka dapat diketahui hasil nilai efisiensi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100\%$$

(4)

Dimana:

P_{in} : Daya Masukan (Watt)

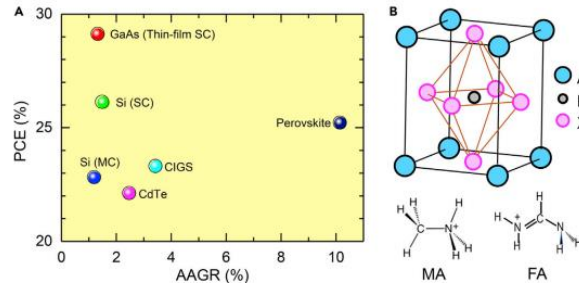
P_{out} : Daya Keluaran (Watt)

I_{mp} : Arus kerja –*operating point* (Amp)

V_{mp} : Tegangan kerja (Volt).

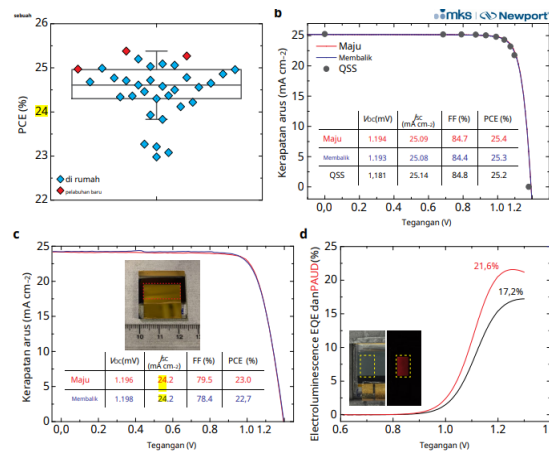
FF : Faktor pengisian-Fill-Factor
 V_{oc} : Tegangan kerja (Volt).
 I_{sc} : Arus rangkaian jenuh (*saturated circuit*)

untuk mencapai PCE bersertifikat tertinggi untuk berbagai teknologi fotovoltaik yang menunjukkan PCE lebih dari 20% [45].



Gambar 5. Laju Pertumbuhan Cepat Efisiensi Perovskite (PSC) [45]

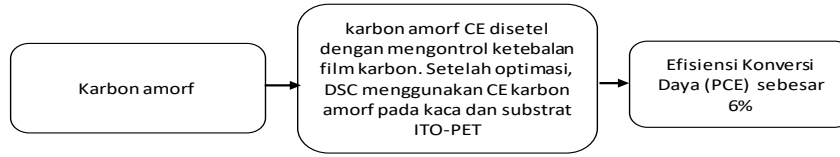
Karena kinerja dalam hal efisiensi dan stabilitas perangkat sel surya perovskit (PSC) telah mengalami kemajuan pesat dalam waktu singkat, peningkatan PSC menjadi masalah penting untuk aplikasi komersial besar-besaran, di mana biaya pembuatan perangkat menjadi penentu faktor untuk penggunaan yang tersebar luas [50][51]. Efisiensi pengumpulan muatan dalam perangkat juga diselidiki secara menyeluruh untuk memajukan pemahaman tentang pengaruh transisi fase pada variasi kinerja sel surya [52][53]. Di luar stabilitas intrinsik perovskit halida, stabilitas perangkat bersama dengan efisiensi perangkat dapat ditentukan secara kritis oleh antarmuka antara dua lapisan ekstraksi muatan sehubungan dengan lapisan perovskit dan dua elektroda[24].



Gambar 6. Hasil perangkat untuk PSC berperforma terbaik dengan 0,8 mol% MAPbBr₃

3.5 Blok diagram efisiensi elektroda karbon terhadap sel surya Perovskite

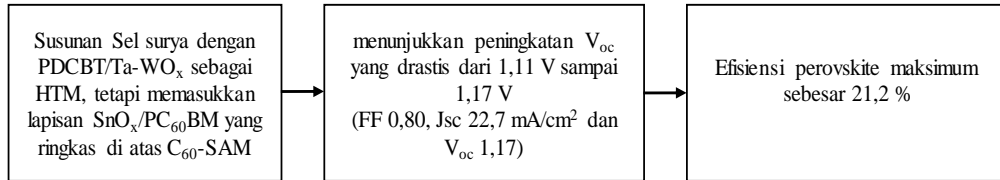
Untuk PSC berbasis karbon planar-heterojunction yang mengadopsi ni-doped rutil TiO₂ untuk meningkatkan konduktivitas dan menggeser tingkat Fermi fotoanoda secara positif. Oleh karena itu, kinerja total PSC berbasis karbon ditingkatkan. PSC planar yang dioptimalkan dengan doping Ni 0,01 M pada TiO₂ dan CuPc sebagai HTM menghasilkan PCE juara sebesar 17,46%, yang merupakan efisiensi tertinggi untuk PSC berbasis karbon yang dilaporkan sejauh ini.[11] [30]



Gambar 7. Diagram blok karbon amorf

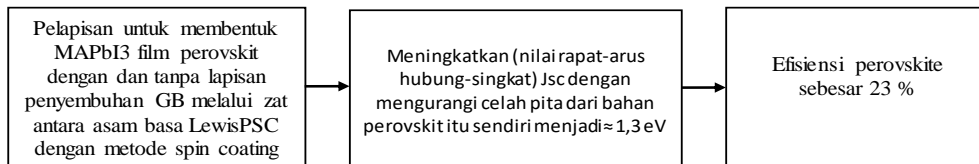
Anotube karbon berdingg ganda (DWCNTs) disiapkan menggunakan metode pencetakan semprot untuk digunakan sebagai CE dari DSC. Untuk mencapai aktivitas katalitik yang tinggi, ketebalan rata-rata lapisan DWCNT dikontrol pada 0,5 m dan diberi perlakuan termal pada suhu berbeda 120, 200, 250, dan 300 °C. Menurut analisis EIS, nilai R_{ct} diamati tumbuh dengan suhu perlakuan panas dari 120 hingga 300 °C. DWCNT CE yang diberi perlakuan termal pada suhu 300 °C menunjukkan aktivitas katalitik terbaik. PCE DSC yang menggunakan DWCTN CE mencapai 4,59%.

3.6. Blok diagram hasil efisiensi sel surya Perovskite



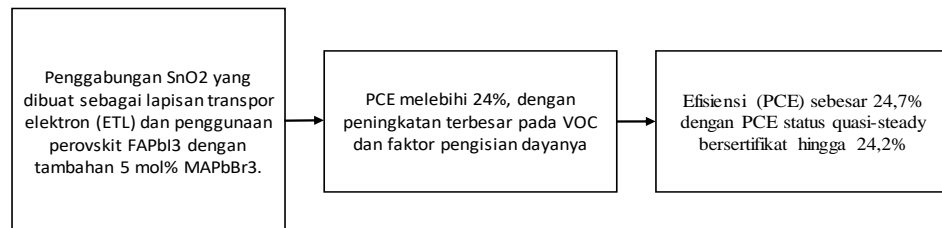
Gambar 8. Diagram hasil data jurnal pada tahun 2017 [22]

Didapatkan efisiensi sel surya perovskite dengan susunan sel surya perovskite PDCBT/Ta-WO_x, SnO_x/PC₆₀BM (C₆₀S AM) hingga menunjukkan peningkatan terhadap Voc yang drastis dari 1,11-1,17 V hingga mendapatkan hasil maksimum efisiensi sebesar 21,2 % [22].



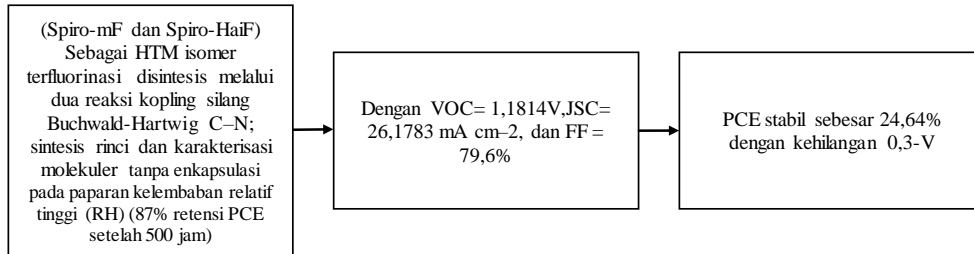
Gambar 9. Diagram hasil jurnal pada tahun 2018 [10]

Penjelasan pada tahun 2018 didapatkan efisiensi sel surya perovskite sebesar 23% dengan pelapisan yang dibuat untuk membentuk MAPL3/FAPBL3 dengan dan tanpa lapisan GB melalui zat antara asam basa lewis PSC dengan menggunakan metode spin coating sehingga dapat meningkatkan nilai rapat arus hubung singkat pada Jsc dengan mengurangi celah celah pita dari bahan perovskite sebesar 1,3eV [10].



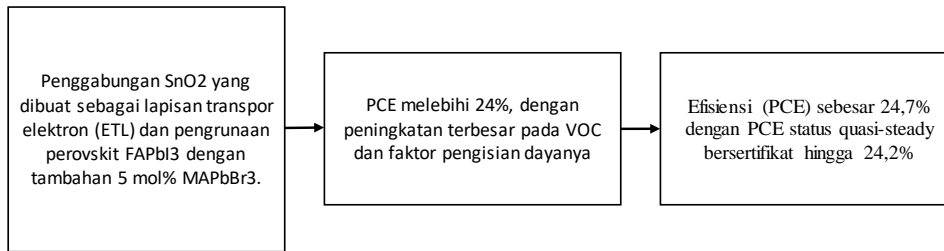
Gambar 10. Diagram hasil jurnal pada tahun 2019 [3]

Penjelasan tahun 2019 didapatkan efisiensi sel surya perovskite sebesar 24,02% dengan MACI sebagai aditif untuk perovskit FAPbI₃ melalui substitusi kationik [3].



Gambar 11. Diagram hasil jurnal pada tahun 2020 [14]

Tahun 2020 didapatkan efisiensi sel surya perovskite sebesar 24,64% dengan kehilangan 0,3eV. Dengan penggunaan spiro-mF dan Spiro-HaiF sebagai HTM isomer terfluorinasi disintesis melalui dua reaksi kopling silang Buchwald-Hartwig C-N; sintesis rinci dan karakterisasi molekuler tanpa enkapsulasi pada paparan kelembaban relatif tinggi (RH) (87% retensi PCE setelah 500 jam) dengan Dengan VOC= 1,1814V, JSC= 26,1783 mA cm⁻², dan FF = 79,6% [14].



Gambar 12. Diagram hasil jurnal pada tahun 2021 [44]

Penggabungan SnO₂ sebagai ETL dengan penggunaan perovskite FAPbI₃ dan MAPBr₃ sebanyak 5 mol% sehingga dapat menghasilkan efisiensi lebih dari 24% dengan peningkatan terbesar pada VOC dan faktor pengisian dayanya [44].

4. IMPLEMENTASI

Dalam beberapa tahun terakhir didapatkan data nilai efisiensi sel surya perovskite yang saya ambil dari beberapa jurnal literature, dan saya masukan kedalam tabel dibawah ini :

Tabel 1. Hasil Riview Jurnal Peningkatan Efisiensi Perovskite

| No | Nama | Judul | Tahun | Hasil Penelitian | PCE |
|----|---|--|-------|--|-------------|
| 1 | Yi Hou, Xiaoyan Du, Simon Scheiner, David P. McMeekin, Zhiping Wang, Ning Li, Manuela S. Killian, Haiwei Chen, Moses Richter, Ievgen Levchuk, Nadine Schrenker, Erdmann Spiecker, Tobias Stubhan, Norman A. Luechinger, Andreas Hirsch, Patrik Schmuki, Hans-Peter Steinrück, Rainer H. Fink, | A generic interface to reduce the efficiency-stability-cost gap of perovskite solar cells[22]. | 2017 | Menggunakan perangkat arsitektur planar biasa sederhana, Ta-WOxsel surya perovskite berbasis antarmuka yang diolah dan dikombinasikan dengan lebih dari 1000 jam stabilitas cahaya berdasarkan monolayer rakitan sendiri dengan menghilangkan dopan ionik tambahan | 21,2% [22]. |

| | | | | | |
|---|--|---|------|---|-------------|
| | Marcus Halik, Henry J. Snaith, Christoph J. Brabec | | | | |
| 2 | Qi Jiang, Zema Chu, Pengyang Wang, Xiaolei Yang, Heng Liu, Ye Wang, Zhigang Yin, Jinliang Wu, Xingwang Zhang, and Jingbi You. | Planar-Structure Perovskite Solar Cells with Efficiency beyond 21%. | 2017 | Menghasilkan sel surya yang stabil dan efisiensi tinggi, sementara sisa PbI ₂ yang terlalu banyak dapat menyebabkan histeresis serius dan juga stabilitas yang buruk. | 21,6% [9] |
| 3 | M.Khalaji Assadia, S. Bakhoda, R. Saidur, H. Hanaei. | Renewable and Sustainable Energy Review. | 2017 | konversi daya kondisi tunak. | 21,2% [1] |
| 4 | Sang Il Seok, Michael Grätzel, and Nam-Gyu Park. | Methodologies toward Highly Efficient Perovskite Solar Cells. | 2018 | Meningkatkan Nilai Jsc | 23% [10] |
| 5 | J. J. Yoo, S. Wieghold, M. Sponseller, M. Chua, S. N. Bertram, N. T. P. Hartono, J. Tresback, E. Hansen, J. Correa Baena, V. Bulovic, T. Buonassisi, S. S. Shin and M. G. Bawendi. | Energy & Environmental Science [6]. | 2019 | kombinasi unik dari alkyl amonium bromida linier dan CF secara efektif untuk mempasifkan cacat antarmuka, meminimalkan pendinginan carier. | 22,6% [6] |
| 6 | Zhaolai Chen, Bekir Turedi, Abdullah Alsalloum, Chen Yang, Xiaopeng Zheng, Issam Gereige, Ahmed AlSaggaf, Omar F. Mohammed, and Osman M. Bakr. | Single-Crystal MAPbI ₃ Perovskite Solar Cells Exceeding 21% Power Conversion Efficiency. | 2019 | Metilamonium timbal triiodida kristal tunggal setebal dua puluh mikron (MAPbI ₃) perovskit) yang ditanam pada kontak selektif-muatan menggunakan metode pertumbuhan kristal suhu terbalik solusi ruang terbatas | 21,09% [12] |
| 7 | X. Lin, D. Cui, X. Luo, C. Zhang, Q. Han, Y. Wang and L. Han | Energy & Environmental Science. | 2020 | Peningkatan kualitas perovskite dan transportasi muatan lapisan, cacat pasif dan antarmuka modifikasi, dll. | 22,3% [41] |

| | | | | | |
|---|---|---|------|--|------------|
| 8 | Jason J. Yoo, Gabkyung Seo, Matthew R. Chua, Tae Gwan Park, Yongli Lu, Fabian Rotermond, Young-Ki Kim, Chan Su Moon, Nam Joong Jeon, Juan-Pablo Correa Baena, Vladimir Bulović, Seong Sik Shin, Mounji G. Bawendi, danJangwon Seo | Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. | 2021 | Penggabungan SnO ₂ yang dibuat sebagai lapisan transpor elektron (ETL) dan penggunaan perovskit FAPbI ₃ dengan tambahan 5 mol% MAPbBr ₃ | 24,7% [44] |
|---|---|---|------|--|------------|

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Table 2. Ringkasan efisiensi yang diperoleh dari berbagai sel surya perovskit dari tahun 2017 s/d 2021

| Tahun | FTO (fluorine-doped tin oxide) | ETL (electron transport layer) | Perovskite | HTM (Hole-Transporting Material) | Efisiensi % |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|-------------|
| 2017 | | | MAPbI ₃ | PDCBT/Ta-WOx | 21.2 [22] |
| 2017 | | | CH ₃ NH ₃ PbI ₃ | LBSO | 21.2 [1] |
| 2018 | | | MAPbI ₃ | CH ₃ NH ₃ I | 23 [10] |
| 2019 | | | MAPbI ₃ | C ₆ H ₁₅ NO ₃ | 21,09 [12] |
| 2020 | | | FAPbI ₃ | Spiro-OMeTAD | 24,64 [14] |
| 2021 | | SnO ₂ | FAPbI ₃ | | 24,7 [44] |

Table 3. Ringkasan efisiensi Elektroda Karbon

| Bahan | Luas permukaan [m ² g ⁻¹] | Substrat | Efisiensi [%] |
|-----------------|--|------------------|---------------|
| Logam Al | | MoO ₃ | 11.42 [11] |
| Logam Ni | | NiOx | 12,1 [11] |
| Karbon | | TiO ₂ | 17,46 [30] |
| Karbon Amorf | | ITO-PET | 6[1] |
| Karbon Grafit | 29.33 | Kaca FTO | 9,03 [3] |
| Serat Karbon | 156 | Kaca FTO | 6,74 [3] |
| Karbon Nanotube | | DWCTN | 4,59 [2] |

5. KESIMPULAN

Material Pembentukan sel surya perovskit itu sendiri terdiri dari Elektroda Logam, *Hole transport material* (HTM), Perovskite, *Electron transport material* (ETM) seperti titanium dioksida, *Transparent Conducting Oxides* (TCO) dan substrat kaca. Prinsip kerja dari sel surya perovskite itu sendiri diawali dengan proses menangkap paparan energi sinar matahari oleh

perovskite, kemudian lapisan perovskit akan menyerap foton dan elektron akan tereksitasi dari HOMO (highest occupied molecular orbital) ke LUMO (lowest un-occupied molecular orbital) sehingga tercipta eksiton (pasangan lubang dan elektron). Elektron bebas kemudian akan dikirim menuju lapisan ETM dan dikumpulkan pada lapisan Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) sedangkan lubang menuju ke lapisan HTM (*Hole-Transporting Material*) kemudian dikumpulkan pada elektroda logam. FTO dan elektroda logam dikoneksikan dan menghasilkan photocurrent (arus listrik yang diinduksi dari efek fotovoltaik). Efisiensi mendekati 25% telah dicapai PSC pada tahun 2021 dengan perkembangan pesat yang belum pernah terjadi sebelumnya. Dengan keunggulan pada rendahnya kehilangan Voc dan efisiensi pendaran yang tinggi, penggabungan SnO₂ ini juga menunjukkan faktor pengisian yang tinggi hingga 84,8%. Faktor pengisian yang begitu tinggi adalah hasil dari peningkatan mobilitas pembawa di lapisan aktif perovskit dan pengumpulan muatan yang lebih baik dengan SnO₂ ETL yang dikembangkan dengan kerugian parasit minimum dari resistensi shunt dan seri. Namun, komersialisasi PSC akan membutuhkan pengembangan perangkat efisiensi tinggi secara sinergis di area yang luas bersama dengan stabilitas operasi jangka panjang sebagai teknologi Photovoltaik yang kompetitif. Dari perkembangan tahun-tahun sebelumnya bisa dipastikan perkembangan efisiensi perovskite untuk kedepannya akan jauh lebih baik lagi serta dengan stabilitas bahan yang dapat dikomersialisasikan dengan skala yang lebih besar lagi.

REFERENCES

- M. K. Assadi, S. Bakhoda, R. Saidur, and H. Hanaei, "Recent progress in perovskite solar cells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. May, pp. 2812–2822, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.088.
- L. E. Mundt et al., "Quantitative Local Loss Analysis of Blade-Coated Perovskite Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 2, pp. 452–459, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2888835.
- F. Zhang and K. Zhu, "Additive Engineering for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells," vol. 1902579, pp. 1–26, 2019, doi: 10.1002/aenm.201902579.
- J. Chen, C. Dong, H. Idriss, O. F. Mohammed, and O. M. Bakr, "Metal Halide Perovskites for Solar-to-Chemical Fuel Conversion," *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 13, 2020, doi: 10.1002/aenm.201902433.
- N. K. Elumalai, M. A. Mahmud, D. Wang, and A. Uddin, "Perovskite solar cells: Progress and advancements," *Energies*, vol. 9, no. 11, 2016, doi: 10.3390/en9110861.
- A. Manuscript, "Energy & Environmental Science," pp. 0–22, 2019, doi: 10.1039/C9EE00751B.
- R. Wei, "Modelling of Perovskite Solar Cells (Tesis de Maestría)," Thesis, p. 81, 2018.
- L. Meng, J. You, and Y. Yang, "Addressing the stability issue of perovskite solar cells for commercial applications," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-07255-1.
- Q. Jiang et al., "Planar-Structure Perovskite Solar Cells with Efficiency beyond 21%," *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 46, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1002/adma.201703852.
- S. Il Seok, M. Grätzel, and N. G. Park, "Methodologies toward Highly Efficient Perovskite Solar Cells," *Small*, vol. 14, no. 20, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1002/smll.201704177.
- J. Feng, X. Zhu, Z. Yang, X. Zhang, J. Niu, and Z. Wang, "Record Efficiency Stable Flexible Perovskite Solar Cell Using Effective Additive Assistant Strategy," vol. 1801418, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1002/adma.201801418.
- Z. Chen et al., "Single-Crystal MAPbI₃ Perovskite Solar Cells Exceeding 21% Power Conversion Efficiency," *ACS Energy Lett.*, vol. 4, no. 6, pp. 1258–1259, 2019, doi: 10.1021/acsenergylett.9b00847.
- S. Nair, S. B. Patel, and J. V. Gohel, "Recent trends in efficiency-stability improvement in perovskite solar cells," *Mater. Today Energy*, vol. 17, p. 100449, 2020, doi: 10.1016/j.mtener.2020.100449.
- M. Jeong et al., "Stable perovskite solar cells with efficiency exceeding 24.8% and 0.3-V voltage loss," *Science* (80-.), vol. 369, no. 6511, pp. 1615–1620, 2020, doi: 10.1126/science.abb7167.
- W. Q. Wu et al., "Bilateral alkylamine for suppressing charge recombination and improving stability in blade-coated perovskite solar cells," *Sci. Adv.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1126/sciadv.aav8925.
- F. Matteocci et al., "Fabrication and Morphological Characterization of High-Efficiency Blade-Coated Perovskite Solar Modules," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 28, pp. 25195–25204, 2019, doi: 10.1021/acsaami.9b05730.
- D. Wang et al., "Improvement on the performance of perovskite solar cells by doctor-blade coating under ambient condition with hole-transporting material optimization," *J. Energy Chem.*, vol. 38, no. xxxx, pp. 207–213, 2019, doi: 10.1016/j.jechem.2019.03.023.
- C. Li et al., "Monoammonium Porphyrin for Blade-Coating Stable Large-Area Perovskite Solar Cells with >18% Efficiency," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 141, no. 15, pp. 6345–6351, 2019, doi: 10.1021/jacs.9b01305.
- I. Yurestira, A. P. Aji, M. F. Desfri, A. S. Rini, and Y. Rati, "Potential of ZnO/ZnS as electron transport materials on Perovskite Solar Cells," *J. Aceh Phys. Soc.*, vol. 10, no. 2, pp. 41–47, 2021, doi:

- 10.24815/jacps.v10i2.18383.
- N. G. Park, "Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology," *Mater. Today*, vol. 18, no. 2, pp. 65–72, 2015, doi: 10.1016/j.mattod.2014.07.007.
- H. S. Jung, G. S. Han, N. Park, and M. J. Ko, "Flexible Perovskite Solar Cells," *Joule*, vol. 3, no. 8, pp. 1850–1880, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.07.023.
- Y. Hou et al., "A generic interface to reduce the efficiency-stability-cost gap of perovskite solar cells," vol. 5561, no. November, pp. 1–10, 2017.
- P. Chen, Y. Bai, S. Wang, M. Lyu, J. H. Yun, and L. Wang, "In Situ Growth of 2D Perovskite Capping Layer for Stable and Efficient Perovskite Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 17, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1002/adfm.201706923.
- 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.
- F. Yusupandi, "Sayap Kupu-kupu Menginspirasi Lahirnya Sel Surya yang Lebih Efisien," no. Cd, pp. 1–5, 2018.
- Q. Meng et al., "Effect of temperature on the performance of perovskite solar cells," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 32, no. 10, pp. 12784–12792, 2021, doi: 10.1007/s10854-020-03029-y.
- I. Mesquita, L. Andrade, and A. Mendes, "Temperature Impact on Perovskite Solar Cells Under Operation," *ChemSusChem*, vol. 12, no. 10, pp. 2186–2194, 2019, doi: 10.1002/cssc.201802899.
- P. Roy, N. K. Sinha, and A. Khare, "An investigation on the impact of temperature variation over the performance of tin-based perovskite solar cell: A numerical simulation approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, no. xxxx, pp. 2022–2026, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.281.
- M. P. U. Haris, S. Kazim, and S. Ahmad, "Low-Temperature-Processed Perovskite Solar Cells Fabricated from Presynthesized CsFAPbI₃ Powder," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 4, no. 3, pp. 2600–2606, 2021, doi: 10.1021/acsaem.0c03160.
- Q. Luo et al., "All-Carbon-Electrode-Based Endurable Flexible Perovskite Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 11, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1002/adfm.201706777.
- L. Liang, Y. Cai, X. Li, M. K. Nazeeruddin, and P. Gao, "All that glitters is not gold: Recent progress of alternative counter electrodes for perovskite solar cells," *Nano Energy*, vol. 52, pp. 211–238, 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.07.049.
- Z. Wu et al., "Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells via Modification of Energy Levels at the Perovskite/Carbon Electrode Interface," *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 11, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1002/adma.201804284.
- L. Gao et al., "Several economical and eco-friendly bio-carbon electrodes for highly efficient perovskite solar cells," *Carbon N. Y.*, vol. 162, pp. 267–272, 2020, doi: 10.1016/j.carbon.2020.02.049.
- G. H. Kim and D. S. Kim, "Development of perovskite solar cells with >25% conversion efficiency," *Joule*, vol. 5, no. 5, pp. 1033–1035, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.04.008.
- M. Wu, M. Sun, H. Zhou, J. Y. Ma, and T. Ma, "Carbon Counter Electrodes in Dye-Sensitized and Perovskite Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, no. 7, pp. 1–34, 2020, doi: 10.1002/adfm.201906451.
- N. G. Park and K. Zhu, "Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules," *Nat. Rev. Mater.*, vol. 5, no. 5, pp. 333–350, 2020, doi: 10.1038/s41578-019-0176-2.
- Y. K. Ren et al., "Temperature-assisted rapid nucleation: A facile method to optimize the film morphology for perovskite solar cells," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 38, pp. 20327–20333, 2017, doi: 10.1039/c7ta06334b.
- J. F. Warman and D. Dahlan, "Sintesis Lapisan Titanium Dioxide dengan Doping Ganda Copper-Silver untuk Aplikasi Fotoanoda Dye Sensitized Solar Cell," *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 3, pp. 415–420, 2020, doi: 10.25077/jfu.9.3.415-420.2020.
- Z. Bi et al., "Defect tolerant perovskite solar cells from blade coated non-toxic solvents," *J. Mater. Chem. A*, vol. 6, no. 39, pp. 19085–19093, 2018, doi: 10.1039/c8ta06771f.
- T. Kim, J. Lim, and S. Song, "Recent progress and challenges of electron transport layers in organic/inorganic perovskite solar cells," *Energies*, vol. 13, no. 21, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/en13215572.
- X. Lin et al., "Efficiency progress of inverted perovskite solar cells," *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 11, pp. 3823–3847, 2020, doi: 10.1039/d0ee02017f.
- H. D. Pham, T. C. J. Yang, S. M. Jain, G. J. Wilson, and P. Sonar, "Development of Dopant-Free Organic Hole Transporting Materials for Perovskite Solar Cells," *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 13, 2020, doi: 10.1002/aenm.201903326.
- Z. Yang et al., "Review on Practical Interface Engineering of Perovskite Solar Cells: From Efficiency to Stability," *Sol. RRL*, vol. 4, no. 2, 2020, doi: 10.1002/solr.201900257.
- J. J. Yoo et al., "Efficient perovskite solar cells via improved carrier management," *Nature*, vol. 590, no. 7847, pp. 587–593, 2021, doi: 10.1038/s41586-021-03285-w.
- C. Ma and N. G. Park, "A Realistic Methodology for 30% Efficient Perovskite Solar Cells," *Chem*, vol. 6, no. 6, pp. 1254–1264, 2020, doi: 10.1016/j.chempr.2020.04.013.
- Y. Makasudede, "Bab 2 tinjauan pustaka," pp. 8–45, 1953.



- E. Aktas et al., "Understanding the perovskite/self-assembled selective contact interface for ultra-stable and highly efficient p-i-n perovskite solar cells," *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no. 7, pp. 3976–3985, 2021, doi: 10.1039/d0ee03807e.
- S. Castro-Hermosa et al., "Efficient fully blade-coated perovskite solar cells in air with nanometer-thick bathocuproine buffer layer," *Nano Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 1034–1042, 2021, doi: 10.1007/s12274-020-3147-4.