



Peningkatan Efisiensi Sel Surya Perovskite melalui Optimasi Rasio Komposisi rGO dan Polimer Co-Additive

Rahma Yuniza Putri^{1*}, Rahmat Hidayat², Yahdi Bin Rus³, Maria Ulfa⁴

¹⁻⁴Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

Email: Rahmayunizaputri08@gmail.com¹, maria.Ulfa.1@brin.go.id⁴

*Penulis Korespondensi: Rahmayunizaputri08@gmail.com

Abstract. This research investigates the optimization of perovskite solar cells (PSCs) based on CsPbBr_3 by engineering the active layer interface using a binary composite of Reduced Graphene Oxide (rGO) and Polyethylene Glycol (PEG) polymer co-additive. The background of this study addresses the low long-term stability and high charge recombination challenges in PSCs despite their high potential as a next-generation photovoltaic technology. The fabrication method involved sequential solution deposition steps on Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) substrates, with rGO:PEG weight ratios varied at 2:1, 1:1, and 1:2. Photovoltaic testing under a sun simulator revealed that interface modification significantly boosts efficiency compared to the pristine control device. The experimental findings demonstrate that the balanced ratio of rGO:PEG (1:1) achieves the peak Power Conversion Efficiency (PCE) of 5.43%, driven by a massive surge in short-circuit current density (J_{sc}) to 9.78 mA/cm^2 . This study implies that precision stoichiometric control of rGO-polymer co-additives provides a powerful synergistic strategy to enhance charge extraction and maximize the performance of inorganic perovskite solar cells.

Keywords: Co-Additive; CsPbBr_3 ; Perovskite Solar Cells; Polyethylene Glycol; Reduced Graphene Oxide.

Abstrak. Penelitian ini mengkaji optimasi sel surya perovskite (PSCs) berbasis CsPbBr_3 melalui rekayasa antarmuka lapisan aktif menggunakan komposit biner Reduced Graphene Oxide (rGO) dan polimer co-additive Polyethylene Glycol (PEG). Latar belakang penelitian ini menjawab tantangan rendahnya stabilitas jangka panjang dan tingginya rekombinasi muatan pada PSCs meskipun memiliki potensi besar sebagai teknologi fotovoltai generasi baru. Metode fabrikasi dilakukan melalui tahapan deposisi larutan bertingkat di atas substrat Fluorine-doped Tin Oxide (FTO), dengan variasi rasio bobot rGO:PEG sebesar 2:1, 1:1, dan 1:2. Pengujian performa fotovoltai menggunakan Sun Simulator menunjukkan bahwa modifikasi antarmuka secara signifikan meningkatkan efisiensi dibanding perangkat kontrol tanpa aditif. Temuan penelitian membuktikan bahwa rasio seimbang rGO:PEG (1:1) menghasilkan puncaknya nilai Power Conversion Efficiency (PCE) tertinggi sebesar 5,43%, yang didorong oleh lonjakan ekstrem nilai kerapatan arus sirkuit pendek (J_{sc}) hingga $9,78 \text{ mA/cm}^2$. Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol stoikiometri yang presisi pada co-additive rGO-polimer menjadi strategi sinergis yang efektif untuk mempercepat ekstraksi muatan dan memaksimalkan kapasitas total sel surya perovskite anorganik.

Kata Kunci: Co-Additive; CsPbBr_3 ; Polyethylene Glycol; Reduced Graphene Oxide; Sel Surya Perovskite.

1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi global yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri menjadi tantangan utama pada abad ke-21. Ketergantungan terhadap sumber energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan, baik dari segi keterbatasan cadangan energi maupun dampak lingkungan yang dihasilkan, seperti emisi gas rumah kaca dan pemanasan global (International Energy Agency, 2023). Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan menjadi solusi strategis yang terus didorong secara global untuk menciptakan sistem energi yang berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi surya karena ketersediaannya yang melimpah, ramah lingkungan, dan mampu dikonversi secara langsung menjadi energi listrik melalui teknologi

sel surya (Li et al., 2024). Teknologi sel surya sendiri terus mengalami perkembangan pesat, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi konversi energi dan menekan biaya produksi. Sel surya berbasis silikon yang saat ini mendominasi pasar komersial telah mencapai efisiensi sekitar 20–26% (National Renewable Energy Laboratory, 2024). Namun, teknologi ini masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti biaya fabrikasi yang relatif tinggi, kebutuhan temperatur proses yang besar, serta proses produksi yang kompleks (Park, 2014). Sebagai alternatif, *perovskite solar cells* (PSCs) muncul sebagai teknologi generasi baru yang menjanjikan karena memiliki efisiensi tinggi, biaya produksi lebih rendah, dan metode fabrikasi yang sederhana melalui teknik larutan (Kojima et al., 2009).

Dalam kurun waktu kurang dari 15 tahun, efisiensi PSCs mengalami peningkatan yang sangat signifikan, yaitu dari sekitar 3,8% menjadi lebih dari 25% ((Jeong et al., 2021). Material perovskite memiliki berbagai keunggulan, seperti koefisien serapan cahaya yang tinggi, panjang difusi pembawa muatan yang besar, mobilitas muatan yang baik, serta fleksibilitas dalam rekayasa struktur material (Snaith, 2013). Karakteristik tersebut menjadikan material perovskite sangat potensial untuk diaplikasikan pada perangkat fotovoltaik berperforma tinggi. Meskipun demikian, pengembangan PSCs masih menghadapi tantangan utama berupa rendahnya stabilitas jangka panjang akibat sifat materialnya yang sangat sensitif terhadap faktor lingkungan seperti kelembaban, oksigen, panas, dan paparan cahaya (Grosu et al., 2020). Berbagai strategi telah dikembangkan untuk mengatasi kelemahan tersebut sekaligus meningkatkan efisiensi PSCs, salah satunya melalui rekayasa lapisan perovskite dengan penambahan material aditif (Park, 2014). Material berbasis karbon, khususnya Reduced Graphene Oxide (rGO), menjadi perhatian karena memiliki konduktivitas listrik tinggi, luas permukaan besar, serta stabilitas kimia yang baik (Cao et al., 2020). Penambahan rGO pada lapisan perovskite diketahui mampu meningkatkan mobilitas pembawa muatan, mengurangi rekombinasi elektron-hole, serta membantu memperbaiki kualitas morfologi lapisan perovskite (Li et al., 2024)(Liang et al., 2020). Selain rGO, penambahan polimer (seperti Polyethylene Glycol atau PEG) sebagai co-additive juga menunjukkan potensi besar dalam proses passivasi cacat dan meningkatkan kualitas kristalisasi perovskite (Wang et al., 2019).

Kombinasi antara rGO dan polimer sebagai co-additive dalam lapisan perovskite berpotensi menghasilkan efek sinergis yang menguntungkan. Di satu sisi rGO berperan meningkatkan transport muatan, sedangkan polimer berfungsi mengoptimalkan passivasi cacat pada batas butir kristal. Meskipun penelitian mengenai masing-masing aditif tunggal sudah banyak dilakukan, eksplorasi mengenai integrasi keduanya secara bersamaan sebagai co-additive masih sangat terbatas. Penelitian terdahulu mengindikasikan bahwa penggunaan rGO

sebagai aditif tunggal belum mampu memberikan kestabilan jangka panjang yang optimal, sedangkan penggunaan polimer secara mandiri cenderung hanya memperbaiki struktur tanpa memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan (Li et al., 2019). Terdapat kesenjangan penelitian (research gap) yang nyata dalam menentukan formulasi dan rasio komposisi terbaik antara rGO dan polimer co-additive untuk mendongkrak performa fotovoltaik PSCs secara optimal. Berdasarkan data pengukuran eksperimental terbaru, variasi komposisi ini terbukti memberikan pengaruh yang drastis terhadap parameter arus-tegangan perangkat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pengaruh penambahan rGO polimer co-additive pada lapisan perovskite serta menentukan optimasi rasio terbaiknya guna meningkatkan efisiensi sel surya perovskite.

2. KAJIAN TEORITIS

Sel Surya (Photovoltaik Cell)

Sel surya bekerja berdasarkan efek fotovoltaik, yaitu proses dimana energi cahaya (foton) yang mengenai bahan semikonduktor seperti silikon diserap dan mengangkat elektron dari pita valensi menuju pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron-hole. Proses eksitasi elektron ini hanya terjadi jika energi foton memenuhi atau melebihi energi band-gap material, sehingga foton dengan energi terlalu kecil tidak berkontribusi pada pembentukan arus listrik (Nelson, 2003).

Struktur dasar sel surya terdiri dari lapisan semikonduktor tipe-n dan tipe-p yang dipadu membentuk p-n junction sebagai pusat pembangkitan dan pemisahan muatan listrik (Cao et al., 2020). Pada bagian paling atas terdapat lapisan anti-reflektif (ARC) yang berfungsi mengurangi pemantulan cahaya sehingga foton yang masuk dan diserap semikonduktor meningkat. Lapisan ini sangat penting karena tanpa ARC lebih dari 30% cahaya dapat hilang akibat refleksi permukaan silikon (Green, 2019).

Struktur dan Sifat Material Perovskite

Material perovskite merupakan kelompok senyawa yang memiliki struktur kristal khas dengan rumus umum ABX_3 , di mana A dan B adalah kation dengan jari-jari ion berbeda, dan X adalah anion seperti oksigen atau halida. Dalam struktur ini, kation B berkoordinasi oktahedral (BX_6) dan terletak pada pusat unit sel, sedangkan kation A berada pada rongga yang tersusun oleh oktahedron BX_6 dan berkoordinasi 12 dengan anion X. Susunan tersebut membentuk struktur kerangka tiga dimensi yang memberikan kestabilan kristal serta fleksibilitas dalam pemilihan ion penyusunnya (W. Zhang et al., 2024).

Selain unggul dalam aspek optoelektronik, struktur ABX_3 memberikan perovskite sifat

feroelektrik dan dielektrik tinggi, terutama pada perovskite oksida seperti BaTiO_3 . Dalam material ini, distorsi simetri kristal menimbulkan pergeseran ion yang menghasilkan momen dipol spontan. Polarisasi ini dapat dipertahankan meskipun medan listrik eksternal dihilangkan, sehingga perovskite tipe ini banyak digunakan pada memori non-volatile, kapasitor energi tinggi, dan sensor piezoelektrik (Suragtkhuu et al., 2020).

Degradasi dan Stabilitas Sel Surya Perovskite

Sel surya perovskite menunjukkan efisiensi konversi energi yang tinggi, namun salah satu tantangan utama pengembangannya adalah degradasi material perovskite yang mempengaruhi stabilitas jangka panjang. Faktor degradasi paling dominan berasal dari kelembaban, oksigen, suhu, radiasi UV, dan bias tegangan operasional, yang menyebabkan kerusakan struktur kristal serta menurunkan performa perangkat. Paparan kelembaban menyebabkan pembentukan fasa perovskite hidrat seperti $\text{MAPbI}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, yang kemudian terdekomposisi menjadi PbI_2 dan volatil organik sehingga kinerja modul menurun drastis (Physics of Semiconductor Devices Physics of Semiconductor Devices, n.d.)

Selain faktor eksternal, degradasi dapat terjadi akibat instabilitas intrinsik material, seperti migrasi ion halida dan MA^+ dalam struktur ABX_3 yang menyebabkan hysteresis, penurunan Voc, dan hilangnya kesetimbangan muatan internal. Hal ini terjadi karena energi aktivasi migrasi ion dalam perovskite relatif rendah, sehingga ion mudah berpindah di bawah pengaruh medan listrik atau panas (Zhang et al., 2019).

Reduced Graphene Oxide (rGO)

Reduced Graphene Oxide (rGO) merupakan bentuk hasil reduksi dari graphene oksida (GO) yang mempertahankan struktur mirip graphene murni melalui penghilangan gugus fungsional yang mengandung oksigen. Komposisinya didominasi oleh karbon, dengan kandungan oksigen dan hidrogen dalam jumlah kecil yang bergantung pada metode reduksi yang digunakan. rGO biasanya tersedia dalam bentuk bubuk, meskipun dapat didispersikan dalam pelarut tertentu untuk aplikasi khusus. Keberadaan rGO sangat penting karena proses reduksi mampu mengembalikan banyak sifat unggulan graphene, seperti konduktivitas listrik yang tinggi dan kekuatan mekanik, menjadikannya bahan yang sangat potensial untuk berbagai aplikasi teknologi (Geim, A.K. et al 2007).

Integrasi rGO Pada Lapisan Perovskite

Integrasi reduced graphene oxide (rGO) ke dalam struktur lapisan perovskite dapat dilakukan dengan beberapa cara sebagai aditif dalam larutan prekursor perovskit, sebagai inter-layer antara perovskit dan lapisan transport muatan (ETL/HTL), atau sebagai lapisan konduktif/elektrode dan masing-masing peran ini memberikan manfaat berbeda bagi kualitas

film, transport muatan, dan stabilitas perangkat. Sebagai aditif, rGO dilaporkan memperlambat kinetika kristalisasi sehingga meningkatkan ukuran butir dan mengurangi cacat permukaan, yang menurunkan rekombinasi dan meningkatkan PCE (M. Zhang et al., 2020). Ketika ditempatkan sebagai interlayer atau ditambahkan ke ETL/HTL, rGO meningkatkan konduktivitas lateral dan ekstraksi hole/elektron karena jaringan π konjugasinya hasilnya pengurangan resistansi antarmuka serta perbaikan fill factor dan stabilitas termal (Suragtkhuu et al., 2020).

Polimer Co-Additive dalam Sel Surya Perovskite

Polimer co-additive merupakan material polimer fungsional yang ditambahkan dalam jumlah kecil ke dalam sistem perovskite, baik pada larutan prekursor maupun pada lapisan perovskite yang telah terbentuk, dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas film, performa optoelektronik, serta stabilitas perangkat. Berbeda dengan lapisan fungsional utama, co-additive tidak berperan sebagai lapisan aktif utama, tetapi berfungsi sebagai modifikator struktur dan antarmuka yang mempengaruhi proses kristalisasi dan dinamika muatan dalam sel surya perovskite (Zhao et al., 2017).

3. METODE PENELITIAN

Tahap awal penelitian dimulai dengan pemotongan dan pencucian substrat kaca *Fluorine-doped Tin Oxide* (FTO). Sisi konduktif substrat diidentifikasi terlebih dahulu menggunakan multimeter digital berdasarkan nilai resistansinya. Substrat FTO berukuran awal $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dipotong menggunakan alat *glass cutting* dengan parameter skala mikrometer sekrup yang diatur pada posisi 6,5. Proses pembelahan kaca dibantu menggunakan tang khusus kaca secara perlahan guna mencegah keretakan. Setelah itu, sisa garis penanda dibersihkan menggunakan aseton. Substrat kemudian di-*etching* menggunakan laser pada bagian tengah sepanjang 1 cm untuk menghilangkan lapisan konduktif, lalu dipotong kembali membentuk pola berukuran $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Sisi konduktif pada masing-masing potongan diberi penomoran di bagian kiri sebagai penanda. Tahap pencucian dilakukan dengan menyusun substrat pada kotak pembersih. Substrat digosok menggunakan sikat gigi dan larutan sabun (5 ml sabun dalam 100 ml air) hingga bebas dari kontaminan fisik, lalu disonikasi dalam wadah sonikator berisi 3000 ml air selama 15 menit. Setelah proses sabun selesai, substrat dipindahkan ke kotak pembersih baru berisi *Deionized* (DI) *Water* untuk disonikasi kembali selama 15 menit pada suhu di bawah 30°C . Langkah akhir pencucian dilakukan dengan merendam substrat dalam etanol, mengganti air sonikator dengan yang baru, dan menjalankan proses sonikasi selama 10 menit. Etanol sisa disaring kembali menggunakan *syringe filter* ke dalam vial penampung, sedangkan

substrat FTO dikeringkan menggunakan gas nitrogen (N_2) dan disimpan di dalam oven sebelum digunakan.

Sintesis lapisan transpor elektron (SnO_2) dilakukan dengan menimbang 0,1125 gram $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ yang kemudian dilarutkan ke dalam 5 ml Isopropanol (IPA). Campuran tersebut diaduk menggunakan pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*) dengan kecepatan 400 rpm pada suhu $80^\circ C$ selama 1 jam, lalu didiamkan selama 24 jam. Untuk prekursor perovskite $CsPbBr_3$, larutan pertama dibuat dengan melarutkan 0,3670 gram *Lead (II) Bromide* ($PbBr_2$) ke dalam 1 ml *Dimethylformamide* (DMF) diikuti dengan proses *annealing* pada suhu $90^\circ C$ hingga larut sempurna. Larutan kedua disiapkan dengan melarutkan 0,5 gram *Cesium Bromide* ($CsBr$) ke dalam 2 ml *DI Water* menggunakan pengaduk magnetik pada suhu ruang tanpa pemanasan. Sementara itu, larutan *co-additive* rGO-polimer disintesis secara terpisah melalui beberapa tahapan awal. Sebanyak 1 mg bubuk rGO dilarutkan ke dalam 2 ml *Chlorobenzene* (CB) menggunakan tiga botol vial terpisah. Larutan rGO tersebut disonikasi selama 2 jam, dilanjutkan dengan proses sentrifugasi pada kecepatan 10.000 rpm selama 15 menit. Supernatan hasil sentrifugasi kemudian disaring menggunakan *syringe filter nylon* ke dalam vial baru. Untuk mempelajari pengaruh komposisi aditif, supernatan rGO murni tersebut dicampur dengan polimer *Polyethylene Glycol* (PEG) hingga membentuk tiga variasi rasio bobot komposit biner yang berbeda, yaitu rGO:PEG dengan perbandingan rasio 2:1, 1:1, dan 1:2. Seluruh variasi larutan campuran rGO-PEG tersebut kemudian diaduk kembali menggunakan *magnetic stirrer* hingga diperoleh kondisi larutan yang sepenuhnya homogen sebelum siap dideposisikan.

Proses fabrikasi perangkat dilakukan melalui beberapa tahapan deposisi bertingkat. Substrat FTO yang telah bersih diolah menggunakan UV-ozone selama 15 menit. Larutan SnO_2 sebanyak 200 μl dideposisikan di atas FTO menggunakan teknik *spin coating* dengan kecepatan 3000 rpm (akselerasi 1000) selama 30 detik, lalu di-*annealing* pada suhu $180^\circ C$ selama 1 jam. Setelah mendingin, lapisan kembali di-UV-ozone selama 15 menit. Larutan $PbBr_2$ dan substrat dipanaskan terlebih dahulu (*preheat*) pada suhu $90^\circ C$ selama 5 menit. Lapisan $PbBr_2$ dideposisikan sebanyak 90 μl melalui *spin coating* pada kecepatan 2000 rpm (akselerasi 1000) selama 30 detik, dilanjutkan dengan *annealing* pada suhu $90^\circ C$ selama 30 menit. Selanjutnya, larutan $CsBr$ dan substrat di-*preheat* pada suhu $40^\circ C$ selama 5 menit, lalu disemprotkan sebanyak 200 μl menggunakan parameter *spin* yang sama (2000 rpm, akselerasi 1000, 30 detik), diikuti dengan proses *annealing* suhu tinggi pada $250^\circ C$ selama 5 menit untuk membentuk fase kristal perovskite $CsPbBr_3$. Sisa prekursor yang tidak bereaksi dibersihkan

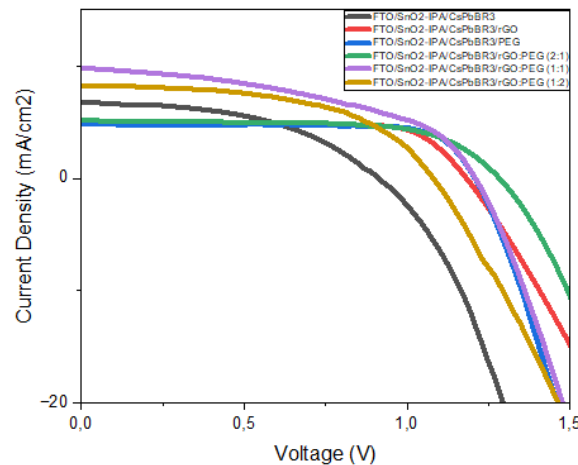
dengan meneteskan 200 μl IPA melalui teknik *spin* dua tahap (tahap pertama pada 1000 rpm selama 12 detik dengan akselerasi 500; tahap kedua pada 2000 rpm selama 12 detik dengan akselerasi 1000). Di atas lapisan perovskite aktif tersebut, larutan komposit biner rGO-polimer (PEG) diteteskan sebanyak 200 μl dan dilapisi menggunakan *spin coater* pada kecepatan 2000 rpm (akselerasi 1000) selama 30 detik, kemudian di-*annealing* pada suhu 100°C selama 10 menit. Tahap akhir fabrikasi sel surya diselesaikan dengan mengaplikasikan lapisan karbon sebagai elektroda lawan menggunakan metode *Carbon Dynamo*, diikuti dengan proses *annealing* penutup pada suhu 120°C selama 15 menit. Karakterisasi performa fotovoltaiik dari seluruh sampel sel surya perovskite diuji menggunakan *Sun Simulator* untuk mengukur kurva rapat arus-tegangan (J - V) baik dalam kondisi gelap (*dark*) maupun di bawah paparan cahaya lampu simulator. Pengukuran dilanjutkan dengan analisis Spektroskopi Impedansi Elektrokimia (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*/EIS) guna mengevaluasi dinamika transfer muatan dan resistansi internal pada antarmuka sel surya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

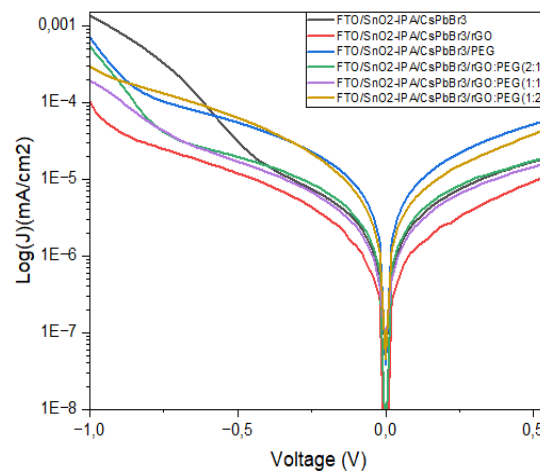
Kinerja fotovoltaiik dari perangkat sel surya perovskite (CsPbBr_3) diuji menggunakan *Sun Simulator* untuk memperoleh kurva rapat arus terhadap tegangan (J - V) di bawah paparan cahaya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1, seluruh parameter fotovoltaiik seperti tegangan *open-circuit* (V_{oc}), densitas arus *short-circuit* (J_{sc}), dan *fill factor* (FF) mengalami perubahan yang signifikan seiring dengan variasi komposisi aditif yang diberikan. Sampel kontrol tanpa aditif menunjukkan performa konversi energi yang paling rendah. Namun, melalui rekayasa lapisan aktif menggunakan kombinasi *co-additive* komposit biner *Reduced Graphene Oxide* (rGO) dan polimer *Polyethylene Glycol* (PEG), nilai efisiensi konversi daya (*Power Conversion Efficiency*/PCE) perangkat mengalami peningkatan. Optimasi penggabungan aditif ini mencapai puncaknya pada variasi rasio rGO:PEG (1:1), yang berhasil menghasilkan lonjakan efisiensi tertinggi hingga mencapai 5,43%.

Untuk mengevaluasi lebih lanjut mengenai dinamika transportasi muatan, mekanisme kebocoran arus, serta kualitas antarmuka di dalam struktur perangkat tanpa pengaruh foton, dilakukan pengukuran karakteristik J - V dalam kondisi gelap (*dark current*), yang ditunjukkan pada Gambar 2. Profil kurva pada Gambar 2 merepresentasikan perilaku penyearahan (*rectifying behavior*) yang ideal dari sebuah dioda *p-n junction*. Seluruh sampel dicirikan oleh aliran rapat arus (J) yang sangat rendah pada rentang tegangan maju yang kecil (*low forward bias*) antara 0 V hingga mendekati tegangan ambangnya (*turn-on voltage*), sebelum akhirnya

mengalami lonjakan arus secara eksponensial setelah melewati batas tegangan tersebut.



Gambar 1. Kurva J-V PSCs dibawah cahaya sun simulator.



Gambar 2. Kurva J-V dalam kondisi gelap dari PSCs.

Tabel 1. Kurva Arus-Fotovoltaik J-V Dari PSCs.

Device	PCE(%)	FF(%)	VOC(V)	JSC(mA/cm ⁻²)
FTO/SnO2-IPA/CsPbBr3	2.15	64.79	1.069	3.10
FTO/SnO2-IPA/CsPbBr3/rGO	4.38	77.44	1.18	4.79
FTO/SnO2-IPA/CsPbBr3/PEG	4.46	77.07	1.21	4.80
FTO/SnO2-IPA/CsPbBr3/rGO:PEG(2:1)	4.38	66.73	1.28	5.12
FTO/SnO2-IPA/CsPbBr3/rGO:PEG(1:1)	5.43	45.91	1.21	9.78
FTO/SnO2-IPA/CsPbBr3/rGO:PEG(1:2)	4.78	53.58	1.08	8.27

Berdasarkan data karakteristik fotovoltaik ($J - V$) yang terlihat pada Tabel 1, secara garis besar terlihat adanya tren peningkatan kinerja yang signifikan pada perovskite solar cells (PSCs) berbasis CsPbBr₃ setelah dilakukan rekayasa antarmuka. Perangkat kontrol tanpa modifikasi menunjukkan performa paling rendah akibat tingginya rekombinasi muatan dan keterbatasan ekstraksi elektron pada antarmuka bawaan. Sebaliknya, pengenalan modifikasi

baik berupa komponen tunggal maupun komposit biner dari reduced Graphene Oxide (rGO) dan Polyethylene Glycol (PEG) berhasil mendongkrak efisiensi konversi daya (PCE) secara substansial. Tren ini mengindikasikan bahwa manipulasi antarmuka merupakan langkah krusial dalam mengoptimalkan parameter fotovoltaiik perangkat.

Pada modifikasi komponen tunggal, penambahan rGO atau PEG secara terpisah memberikan kontribusi spesifik yang setara dengan peningkatan PCE di kisaran 4,3% hingga 4,4%. Keberadaan rGO secara tunggal mampu mengoptimalkan transfer muatan berkat konduktivitas elektriknya yang tinggi, sehingga menghasilkan nilai Fill Factor (FF) puncak di antara seluruh sampel. Di sisi lain, penggunaan PEG secara mandiri bertindak sebagai agen pasivasi cacat yang efektif melalui gugus fungsinya, yang berkontribusi pada peningkatan tegangan sirkuit terbuka (V_{OC}) dan kerapatan arus sirkuit pendek (J_{SC}). Pengaruh positif dari masing-masing bahan tunggal ini meletakkan dasar bagi pengembangan sistem komposit biner guna mendapatkan efek sinergis yang lebih tinggi.

Sinergi optimum dari penggabungan kedua bahan tersebut secara jelas ditunjukkan oleh perangkat dengan rasio komposit seimbang rGO:PEG (1:1), yang berhasil mencatatkan nilai PCE tertinggi sebesar 5,43%. Peningkatan masif ini digerakkan oleh lonjakan ekstrem pada nilai J_{SC} hingga mencapai titik maksimum sebesar 9,78 mA/cm². Fenomena ini membuktikan adanya interaksi mutualistik yang kuat, di mana PEG berperan memperbaiki kualitas kristalinitas film sekaligus meminimalkan jebakan muatan, sementara rGO menyediakan jalur konduktif supercepat untuk mengekstraksi arus yang melimpah tersebut. Kendati demikian, lonjakan arus yang masif pada rasio seimbang ini dibarengi dengan penurunan nilai FF yang cukup tajam, yang mengindikasikan adanya peningkatan resistansi internal atau ketidakseragaman lokal pada lapisan komposit tersebut.

Lebih lanjut, tren data juga menunjukkan adanya efek pembatasan kinerja ketika rasio komposit biner tidak seimbang. Pada kondisi dominasi rGO dengan rasio (2:1), perangkat memang berhasil mencapai nilai V_{OC} tertinggi sebesar 1,28 V melalui penyelarasan tingkat energi yang optimal, namun perolehan arusnya cenderung terbatas. Sebaliknya, ketika kandungan polimer PEG dibuat berlebih seperti pada rasio (1:2), performa keseluruhan perangkat justru mengalami degradasi. Penurunan ini disebabkan oleh sifat alami PEG yang isolatif, di mana konsentrasi yang terlalu tinggi menciptakan penghalang elektrik yang menghambat transportasi muatan antarmuka. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rekayasa antarmuka menggunakan komposit biner rGO:PEG sangat bergantung pada kontrol stoikiometri yang presisi, di mana rasio seimbang (1:1) terbukti menjadi strategi paling efektif

untuk memaksimalkan kapasitas pengumpulan arus dan efisiensi total sel surya CsPbBr_3 .

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa rekayasa antarmuka pada sel surya perovskite (PSCs) berbasis CsPbBr_3 menggunakan komposit biner rGO dan polimer PEG mampu meningkatkan efisiensi konversi daya secara signifikan dibandingkan dengan perangkat kontrol tanpa modifikasi. Hasil optimasi menunjukkan bahwa performa fotovoltaiik sangat bergantung pada kontrol stoikiometri aditif yang presisi, di mana rasio seimbang rGO:PEG (1:1) menjadi formulasi terbaik yang menghasilkan nilai PCE puncak sebesar 5,43% dengan lonjakan arus sirkuit pendek (J_{sc}) mencapai $9,78 \text{ mA/cm}^2$. Efek sinergis ini terjadi karena polimer PEG berperan optimal dalam mempasivasi cacat kristal, sedangkan rGO menyediakan jalur konduktif supercepat untuk ekstraksi muatan. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan berupa penurunan nilai Fill Factor (FF) yang cukup tajam pada rasio optimal tersebut, yang mengindikasikan munculnya resistansi internal atau ketidakseragaman lokal pada lapisan komposit. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk berfokus pada optimasi teknik deposisi agar distribusi lapisan komposit biner rGO:PEG lebih homogen guna menekan resistansi internal, serta melakukan pengujian stabilitas jangka panjang (long-term stability) di bawah paparan kelembaban dan panas untuk mengevaluasi ketahanan struktural menyeluruh dari sel surya yang dimodifikasi ini.

DAFTAR REFERENSI

- Cao, Y., Wu, D., Zhu, P., Shan, D., Zeng, X., & Xu, J. (2020). *Down-Shifting and Anti-Reflection Effect of CsPbBr_3 Quantum Dots / Multicrystalline Silicon Hybrid Structures for Enhanced Photovoltaic Properties*.
- Grosu, Y., Anagnostopoulos, A., Elena, M., Ding, Y., & Faik, A. (2020). Solar Energy Materials and Solar Cells Inhibiting hot corrosion of molten Li_2CO_3 - Na_2CO_3 - K_2CO_3 salt through graphitization of construction materials for concentrated solar power. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215(May), 110650. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110650>
- International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. OECD Publishing, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Jeong, J., Kim, M., Seo, J., Lu, H., Ahlawat, P., Mishra, A., Yang, Y., Hope, M. A., Eickemeyer, F. T., Kim, M., Yoon, Y. J., Choi, I. W., Darwich, B. P., Choi, S. J., Jo, Y., Lee, J. H., Walker, B., Zakeeruddin, S. M., Emsley, L., ... Kim, J. Y. (2021). *Pseudo-halide anion engineering for*. 592(April).
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). *Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic*. 6050–6051.
- Li, H., He, J., Wang, X., Liu, Q., Luo, X., Wang, M., Liu, J., Liu, C., & Liu, Y. (2024).

- Synthesis of Size-Adjustable CsPbBr₃ Perovskite Quantum Dots for Potential Photoelectric Catalysis Applications. *Materials*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ma17071607>
- Liang, L., Zhang, Z., Song, F., Zhang, W., Li, H., Gu, J., Liu, Q., & Zhang, D. (2020). Ultralight , fl exible carbon hybrid aerogels from bacterial cellulose for strong microwave absorption. *Carbon*, 162, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.045>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. NREL Publications. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Park, N. (2014). Perovskite solar cells : an emerging photovoltaic technology. *Biochemical Pharmacology*, 00(00), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>
- Physics of Semiconductor Devices Physics of Semiconductor Devices*. (n.d.).
- Snaith, H. J. (2013). *Perovskites : The Emergence of a New Era for Low-Cost , High-*. <https://doi.org/10.1021/jz4020162>
- Suragtkhuu, S., Tserendavag, O., Vandandoo, U., Bati, A. S. R., Bat-erdene, M., Shapter, J. G., Batmunkh, M., & Davaasambuu, S. (2020). *E ffi ciency and stability enhancement of perovskite solar cells using reduced graphene oxide derived*. 9133–9139. <https://doi.org/10.1039/d0ra01423k>
- Wang, G., Dong, W., Gurung, A., Chen, K., Wu, F., He, Q., Pathak, R., & Qiao, Q. (2019). Improving photovoltaic performance of carbon-based CsPbBr₃ perovskite solar cells by interfacial engineering using P3HT interlayer. *Journal of Power Sources*, 432(October 2018), 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.05.075>
- Zhang, M., Cui, X., Wang, Y., Wang, B., Ye, M., Wang, W., Ma, C., & Lin, Z. (2020). Nano Energy Simple route to interconnected , hierarchically structured , porous Zn₂SnO₄ nanospheres as electron transport layer for efficient perovskite solar cells. *Nano Energy*, 71(February), 104620. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104620>
- Zhang, W., Xu, M., Feng, Y., Mao, Z., & Yan, Z. (2024). The Effect of Procrastination on Physical Exercise among College Students—The Chain Effect of Exercise Commitment and Action Control. *International Journal of Mental Health Promotion*, 26(8), 611–622. <https://doi.org/10.32604/ijmh.2024.052730>