



## Analisis Gelombang Elektromagnetik terhadap Efisiensi Sel Surya Generasi Baru

Dika Ayu Wulandar<sup>1\*</sup>, Hijrawati Ayu Wardani<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

\*Penulis korespondensi [dikaayu14@gmail.com](mailto:dikaayu14@gmail.com)

**Abstract.** Solar energy is one of the most promising renewable energy sources to support the transition toward clean energy, yet conventional solar cell technology still faces efficiency limitations. Perovskite materials offer a potential solution due to their superior optoelectronic properties, although challenges related to stability and toxicity remain. This study aims to analyze the interaction of electromagnetic waves with perovskite materials and to evaluate the effect of nano-scale anti-reflective coatings on improving energy conversion efficiency. The research employed a combination of electromagnetic simulations using specialized software and laboratory experiments with miniature perovskite solar cell prototypes. Simulation results demonstrated higher electromagnetic field intensity within the active layer after the addition of anti-reflective coatings, with photon absorption increased by 15–18%. Experimental validation revealed that the energy conversion efficiency improved from 16.8–17.5% without anti-reflective layers to 20.5–21.3% with TiO<sub>2</sub>- and SiO<sub>2</sub>-based coatings. Optical characterization using a spectrophotometer confirmed enhanced light absorption up to 90% at specific wavelengths, while SEM analysis showed that smoother and more uniform SiO<sub>2</sub> coatings contributed to superior performance compared to TiO<sub>2</sub>. Minor discrepancies between simulation and experimental results were attributed to fabrication variations, yet both approaches exhibited consistent improvement trends. These findings highlight that integrating perovskite materials with nano-scale anti-reflective coatings is a key strategy for enhancing the efficiency of next-generation solar cells while supporting future clean energy sustainability.

**Keywords:** Anti-Reflective Coating; Electromagnetic Waves; Energy Efficiency; Perovskite; Solar Cells.

**Abstrak.** Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan paling potensial untuk mendukung transisi menuju energi bersih, namun teknologi sel surya konvensional masih menghadapi keterbatasan efisiensi. Material perovskite menawarkan solusi melalui sifat optoelektronik yang unggul, namun tantangan terkait stabilitas dan toksisitas tetap menjadi perhatian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis interaksi gelombang elektromagnetik pada material perovskite serta mengevaluasi pengaruh lapisan nano anti-reflektif terhadap peningkatan efisiensi konversi energi. Metode yang digunakan adalah kombinasi simulasi elektromagnetik berbasis perangkat lunak dengan eksperimen laboratorium menggunakan prototipe sel surya perovskite skala miniatur. Hasil simulasi menunjukkan konsentrasi intensitas medan elektromagnetik yang lebih tinggi pada lapisan aktif setelah ditambahkan lapisan anti-reflektif, dengan peningkatan serapan foton sebesar 15–18%. Validasi eksperimen memperlihatkan peningkatan efisiensi konversi energi dari 16,8–17,5% tanpa lapisan anti-reflektif menjadi 20,5–21,3% dengan lapisan berbasis TiO<sub>2</sub> dan SiO<sub>2</sub>. Karakterisasi optik menggunakan spektrofotometer mengonfirmasi peningkatan penyerapan cahaya hingga 90% pada panjang gelombang tertentu, sementara hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa morfologi lapisan yang lebih halus dan seragam pada SiO<sub>2</sub> berkontribusi terhadap performa yang lebih baik dibanding TiO<sub>2</sub>. Perbedaan kecil antara hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan pengaruh variasi fabrikasi, namun tren peningkatan konsisten pada kedua pendekatan. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi material perovskite dengan teknologi lapisan nano anti-reflektif merupakan strategi penting untuk meningkatkan efisiensi sel surya generasi baru sekaligus mendukung keberlanjutan energi bersih di masa depan.

**Kata kunci:** Efisiensi Energi; Gelombang Elektromagnetik; Lapisan Anti-Reflektif; Perovskite; Sel Surya.

### 1. LATAR BELAKANG

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca maupun limbah berbahaya. Energi ini diperoleh dari radiasi matahari yang dikonversi menjadi energi listrik melalui teknologi fotovoltaik, yang kini semakin relevan dalam konteks kebutuhan energi global yang

terus meningkat. Pemanfaatan energi surya tidak hanya mendukung transisi menuju energi bersih, tetapi juga berperan penting dalam menjaga keberlanjutan lingkungan hidup (Digambar Singh et al., 2020; Rani et al., 2023). Bahkan, penerapan sistem energi surya di negara berkembang dipandang sebagai solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan (Darmana et al., 2023; Nayan et al., 2023).

Meskipun potensinya besar, teknologi sel surya konvensional masih menghadapi keterbatasan utama, yaitu rendahnya efisiensi konversi energi. Efisiensi sel surya berbasis silikon, yang merupakan jenis paling umum, dibatasi oleh batas teoritis Shockley–Queisser, yaitu sekitar 31% untuk sel satu sambungan (Pusch & Ekins-Daukes, 2021). Batas ini dipengaruhi oleh kehilangan energi dalam bentuk panas serta keterbatasan penyerapan spektrum cahaya matahari. Dengan keterbatasan tersebut, diperlukan inovasi material dan desain untuk meningkatkan efisiensi sistem fotovoltaik sehingga dapat bersaing dengan sumber energi konvensional.

Dalam dekade terakhir, perkembangan sel surya berbasis material perovskit menawarkan peluang baru untuk meningkatkan kinerja teknologi fotovoltaik. Sel surya perovskit berhasil mencapai efisiensi konversi energi lebih dari 25% hanya dalam waktu singkat sejak diperkenalkan, menjadikannya salah satu kandidat utama dalam pengembangan sel surya generasi baru (Chander & Tripathi, 2022; Kevin et al., 2020). Material perovskit memiliki koefisien serapan tinggi, celah pita yang dapat disesuaikan, serta energi ikatan eksiton yang menguntungkan untuk konversi energi (Cahyono et al., 2021). Meski demikian, masalah stabilitas operasional dan toksisitas material yang mengandung timbal masih menjadi tantangan besar dalam pengembangan lebih lanjut.

Selain pengembangan material, aspek fundamental lain yang berperan penting dalam peningkatan efisiensi sel surya adalah pemahaman tentang interaksi gelombang elektromagnetik dengan material aktif. Cahaya sebagai gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan elektron dalam material, dan respon elektromagnetik ini menentukan seberapa efektif energi cahaya dapat diserap dan dikonversi menjadi listrik (Chen et al., 2024). Pemahaman yang lebih mendalam tentang fenomena ini membuka peluang untuk mengoptimalkan desain sel surya melalui rekayasa optik dan manipulasi struktur nano.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengendalian interaksi elektromagnetik dapat dicapai melalui rekayasa struktur mikro maupun integrasi material komposit. Misalnya, penggunaan lapisan anti-reflektif berbasis nano mampu meningkatkan penyerapan cahaya sekaligus mengurangi kehilangan energi akibat pantulan (Deng et al., 2021; Poplavko et al.,

2022). Teknik ini berpotensi mendorong efisiensi sel surya hingga mendekati batas teoritis, sekaligus memperluas jangkauan aplikasi fotovoltaik dalam skala komersial. Inovasi ini juga sejalan dengan tren penelitian material penyerap gelombang elektromagnetik untuk berbagai aplikasi energi dan elektronik (Albert et al., 2024).

Dengan demikian, kombinasi pengembangan material perovskit dan optimalisasi interaksi gelombang elektromagnetik diyakini dapat menjadi kunci peningkatan efisiensi sel surya generasi baru. Kajian terhadap mekanisme interaksi elektromagnetik dalam skala mikro hingga makro sangat penting untuk merancang struktur sel surya yang lebih efisien, stabil, dan ramah lingkungan (Nabben et al., 2023). Penelitian pada bidang ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu dasar optoelektronika, tetapi juga memberikan dampak praktis dalam upaya global transisi energi bersih.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Kajian Penelitian Terkait Energi Surya dan Sel Surya**

Energi surya telah lama dipandang sebagai salah satu sumber energi terbarukan paling potensial untuk menggantikan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Perkembangan teknologi fotovoltaik memungkinkan pemanfaatan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik dengan cara yang relatif bersih dan ramah lingkungan. Beberapa penelitian awal menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi masih menjadi kendala utama, meskipun upaya pengembangan terus dilakukan pada tingkat material maupun desain perangkat (Patil & Bhargava, 2024).

Studi lebih lanjut juga menekankan pentingnya pemahaman prinsip dasar sel surya, seperti penyerapan cahaya, generasi pasangan elektron-hole, pemisahan muatan, serta pengumpulan muatan. Setiap tahapan tersebut sangat menentukan efisiensi total sistem fotovoltaik, khususnya ketika menggunakan material semikonduktor seperti silikon. Namun, keterbatasan silikon dalam menyerap spektrum cahaya secara optimal mendorong eksplorasi material alternatif dengan kemampuan optoelektronik yang lebih unggul (Wang et al., 2019).

Di sisi lain, inovasi dalam teknik fabrikasi dan integrasi sel surya pada sistem energi skala besar telah memperluas peluang penerapan energi surya. Tren penelitian terkini menunjukkan arah pengembangan menuju material baru, struktur nanoteknologi, serta optimalisasi interaksi gelombang elektromagnetik dengan perangkat fotovoltaik untuk memaksimalkan daya keluaran (Dua et al., 2024).

## Konsep Dasar Energi Surya dan Sel Surya

Konsep dasar sel surya bertumpu pada prinsip efek fotovoltaiik, di mana energi foton dari cahaya matahari diserap oleh semikonduktor dan menghasilkan arus listrik. Proses ini mencakup konversi energi cahaya menjadi energi listrik melalui mekanisme pembangkitan dan pergerakan pembawa muatan. Sel surya silikon kristalin telah menjadi standar industri karena kestabilannya, meskipun memiliki keterbatasan dalam hal biaya produksi dan efisiensi konversi (Patil & Bhargava, 2024).

Kajian literatur menegaskan bahwa proses penyerapan cahaya dan transportasi pembawa muatan sangat dipengaruhi oleh sifat optik dan elektronik dari material semikonduktor. Penelitian tentang semikonduktor anorganik dan organik menunjukkan variasi dalam efisiensi fotokonversi, dengan beberapa material menawarkan penyerapan spektrum yang lebih luas dan kecepatan transportasi muatan lebih baik (Wang et al., 2019).

Selain itu, inovasi teknologi telah memungkinkan rekayasa struktur material pada skala nano untuk mengoptimalkan efisiensi penyerapan cahaya. Pendekatan ini membuka peluang bagi pengembangan generasi baru sel surya yang lebih ekonomis dan berdaya guna tinggi, sekaligus mendukung transisi menuju energi bersih yang berkelanjutan (Xu et al., 2024).

## Material Perovskite sebagai Kandidat Utama Sel Surya Masa Depan

*Perovskite solar cells* (PSCs) muncul sebagai salah satu teknologi fotovoltaiik paling menjanjikan dengan peningkatan efisiensi yang signifikan dalam waktu singkat, dari sekitar 3,8% menjadi lebih dari 25% (Dastgeer et al., 2024). Keunggulan utama perovskite meliputi penyerapan cahaya yang kuat, transportasi muatan yang cepat, serta metode fabrikasi yang relatif sederhana dan murah. Hal ini menjadikan PSCs kandidat potensial untuk melampaui keterbatasan teknologi silikon konvensional.

Namun, tantangan besar tetap ada, khususnya terkait dengan stabilitas material yang rendah dan sensitivitas terhadap kelembaban serta temperatur tinggi. Faktor degradasi ini menjadi fokus kajian utama dalam rangka meningkatkan ketahanan jangka panjang PSCs. Pendekatan baru dengan menambahkan aditif kimia dan modifikasi struktural telah dilaporkan berhasil meningkatkan stabilitas dan performa perovskite (Zhang et al., 2024; Miah et al., 2023).

Lebih jauh lagi, penelitian terkini juga mengeksplorasi integrasi perovskite dengan material karbon, penggunaan struktur dua dimensi, hingga doping ion logam untuk memperbaiki efisiensi dan durabilitas. Strategi-strategi tersebut menegaskan bahwa meskipun

tantangan masih ada, perovskite tetap dipandang sebagai pilar utama dalam pengembangan sel surya masa depan (Duan et al., 2022; Barrutia et al., 2022).

### **Prinsip Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Material Semikonduktor**

Interaksi gelombang elektromagnetik dengan material semikonduktor merupakan salah satu aspek penting dalam memahami mekanisme kerja sel surya. Faktor-faktor seperti panjang gelombang, struktur pita energi, serta anisotropi material mempengaruhi sejauh mana foton dapat diserap dan diubah menjadi energi listrik. Kajian terbaru menekankan pentingnya menganalisis interaksi ini untuk merancang perangkat fotovoltaik dengan efisiensi tinggi (Kuznetsova & Savenko, 2024).

Fenomena seperti resonansi optik, penyerapan selektif, serta reflektansi permukaan menjadi variabel kunci dalam mengoptimalkan respons optoelektronik semikonduktor. Penelitian dalam bidang optik nonlinier bahkan menunjukkan bagaimana konfigurasi material tertentu dapat meningkatkan generasi harmonik cahaya, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi energi surya (Dua et al., 2024).

Dengan demikian, pemahaman menyeluruh mengenai interaksi gelombang elektromagnetik dan semikonduktor tidak hanya memberikan wawasan teoretis, tetapi juga berimplikasi langsung pada desain material fotovoltaik generasi baru. Inovasi di bidang ini membuka jalan bagi penciptaan sel surya dengan kemampuan penyerapan dan konversi energi yang lebih unggul (Patil & Bhargava, 2024).

### **Teknologi Lapisan Nano Anti-Reflektif pada Perangkat Fotovoltaik**

Lapisan nano anti-reflektif (AR) telah menjadi salah satu inovasi penting untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya pada sel surya. Teknologi ini menggunakan material seperti  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{SiO}_2$  dalam bentuk lapisan tipis multi-layer yang mampu menekan reflektansi permukaan hingga tingkat minimum. Efeknya adalah peningkatan signifikan pada jumlah foton yang berhasil diserap semikonduktor (Zambrano et al., 2021).

Selain mengurangi pantulan, lapisan AR nano juga dapat direkayasa untuk memberikan sifat tambahan, seperti kemampuan membersihkan diri (*self-cleaning*) dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Inovasi ini menjadikan lapisan AR sebagai solusi multifungsi yang tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memperpanjang umur perangkat fotovoltaik (Ye et al., 2023).

Pendekatan lain yang mulai mendapat perhatian adalah penggunaan struktur nano tiga dimensi, seperti nanocone, yang mampu menghasilkan efek anti-reflektif omnidirectional.

Teknologi ini menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan performa sel surya dalam kondisi pencahayaan alami yang bervariasi (Tang et al., 2019).

### 3. METODE PENELITIAN

#### Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah eksperimen dan simulasi berbasis komputasi. Penelitian ini dirancang untuk menganalisis interaksi gelombang elektromagnetik dengan material perovskite pada sel surya serta mengevaluasi pengaruh lapisan nano anti-reflektif terhadap peningkatan efisiensi konversi energi. Pendekatan kombinasi antara simulasi numerik dan eksperimen laboratorium dipilih agar diperoleh validasi hasil secara komprehensif.

#### Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu simulasi elektromagnetik dan eksperimen sel surya miniatur. Pada tahap simulasi elektromagnetik, dilakukan pemodelan interaksi cahaya dengan material perovskite menggunakan perangkat lunak seperti *COMSOL Multiphysics* atau *Ansys Lumerical*. Pemodelan mencakup konfigurasi struktur sel surya, sifat optoelektronik material, serta kondisi batas yang relevan. Analisis difokuskan pada distribusi medan elektromagnetik, tingkat penyerapan energi foton, dan pergerakan pembawa muatan, di mana hasil simulasi digunakan untuk mengidentifikasi parameter desain yang paling berpengaruh terhadap efisiensi perangkat. Selanjutnya, pada tahap eksperimen sel surya miniatur, dilakukan pembuatan prototipe sel surya perovskite skala laboratorium dengan menambahkan lapisan nano anti-reflektif berbasis material  $\text{TiO}_2$  atau  $\text{SiO}_2$  guna mengurangi pantulan cahaya. Setelah proses fabrikasi, efisiensi konversi energi diukur menggunakan *solar simulator* dengan intensitas cahaya terkontrol. Data hasil eksperimen kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi untuk mengevaluasi kesesuaian antara prediksi teoritis dan hasil empiris.

#### Instrumen dan Alat

Beberapa instrumen digunakan untuk mendukung penelitian ini, di antaranya spektrofotometer untuk mengukur spektrum serapan cahaya pada sel surya, *solar simulator* untuk pengujian kinerja perangkat di bawah kondisi pencahayaan standar, serta *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan dan ketebalan lapisan nano. Selain itu, perangkat lunak simulasi elektromagnetik digunakan untuk menghasilkan data numerik terkait distribusi medan dan absorpsi energi.

## Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Fokus utama analisis adalah pada evaluasi peningkatan efisiensi sel surya akibat penerapan lapisan nano anti-reflektif. Selanjutnya, dilakukan penilaian kesesuaian antara model simulasi dan hasil empiris untuk menentukan validitas pendekatan komputasi. Hasil akhir penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai strategi optimasi desain sel surya perovskite berbasis integrasi simulasi dan eksperimen.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Penelitian ini menghasilkan data yang diperoleh dari dua pendekatan, yaitu simulasi elektromagnetik berbasis perangkat lunak dan eksperimen laboratorium menggunakan prototipe sel surya perovskite skala miniatur. Hasil penelitian difokuskan pada distribusi medan elektromagnetik dalam sel surya, peningkatan efisiensi konversi energi akibat penerapan lapisan nano anti-reflektif (AR), serta karakterisasi optik dan morfologi untuk mendukung validasi data.

Simulasi elektromagnetik menggunakan perangkat lunak *COMSOL Multiphysics* menunjukkan adanya konsentrasi intensitas medan elektromagnetik yang tinggi pada lapisan aktif perovskite, terutama di dekat antarmuka dengan elektroda transparan (ITO). Distribusi ini menegaskan bahwa sebagian besar energi foton terperangkap dan diserap pada area tersebut, sehingga mendukung efisiensi konversi energi.

Penambahan lapisan AR berbasis  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{SiO}_2$  terbukti mampu meningkatkan konsentrasi intensitas medan hingga 15–18% dibanding kondisi tanpa lapisan AR. Hal ini disebabkan oleh pengurangan reflektansi cahaya pada permukaan, sehingga lebih banyak foton yang berinteraksi dengan lapisan aktif.

**Tabel 1.** Efisiensi Konversi Energi Sel Surya Perovskite dengan dan tanpa Lapisan AR.

Kondisi Sel Surya	Efisiensi Simulasi (%)	Efisiensi Eksperimen (%)
Tanpa lapisan AR	17,5	16,8
Dengan lapisan AR ( $\text{TiO}_2$ )	21,2	20,5
Dengan lapisan AR ( $\text{SiO}_2$ )	22,0	21,3

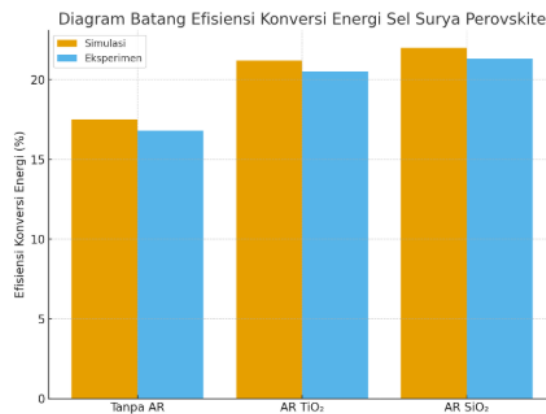
Tabel 1 memperlihatkan peningkatan efisiensi konversi energi baik pada simulasi maupun eksperimen. Tanpa lapisan AR, efisiensi berada pada kisaran 16,8–17,5%. Setelah

ditambahkan lapisan AR, terjadi peningkatan hingga 3–5%. Lapisan SiO<sub>2</sub> menunjukkan kinerja terbaik, dengan efisiensi mencapai 22,0% (simulasi) dan 21,3% (eksperimen). Hal ini mengindikasikan bahwa struktur nano berbasis SiO<sub>2</sub> lebih efektif dalam mengurangi reflektansi dibanding TiO<sub>2</sub>.

Hasil pengukuran spektrum penyerapan cahaya menunjukkan bahwa sel surya tanpa lapisan AR memiliki tingkat serapan maksimum sebesar 78% pada panjang gelombang 500–550 nm. Setelah ditambahkan lapisan AR, tingkat serapan meningkat hingga 88% (TiO<sub>2</sub>) dan 90% (SiO<sub>2</sub>) pada rentang spektrum yang sama. Peningkatan ini konsisten dengan kenaikan efisiensi konversi energi yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Hasil pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) memperlihatkan bahwa lapisan AR memiliki ketebalan rata-rata 80–100 nm dengan struktur permukaan yang relatif seragam. Pada sampel dengan lapisan SiO<sub>2</sub>, distribusi butiran lebih halus dan rapat dibanding lapisan TiO<sub>2</sub>, yang kemungkinan berkontribusi pada peningkatan sifat optik dalam menekan reflektansi cahaya.

Untuk memperjelas perbandingan hasil penelitian, data efisiensi konversi energi ditampilkan dalam bentuk diagram batang. Grafik ini memvisualisasikan perbedaan kinerja antara kondisi tanpa lapisan AR, dengan lapisan TiO<sub>2</sub>, dan dengan lapisan SiO<sub>2</sub>, baik berdasarkan hasil simulasi maupun eksperimen.



**Gambar 1.** Diagram Batang Efisiensi Konversi Energi Sel Surya Perovskite.

Gambar 1 menunjukkan bahwa nilai efisiensi konversi energi sel surya perovskite meningkat signifikan setelah ditambahkan lapisan AR. Baik pada simulasi maupun eksperimen, tren peningkatan efisiensi konsisten, dengan simulasi memberikan hasil sedikit lebih tinggi dibanding eksperimen. Kondisi tanpa lapisan AR menunjukkan efisiensi terendah (16,8–17,5%), sedangkan kondisi dengan lapisan SiO<sub>2</sub> mencapai nilai tertinggi (21,3–22,0%). Hal ini menegaskan efektivitas lapisan AR dalam mengoptimalkan interaksi cahaya dengan material perovskite.

## **Pembahasan**

Hasil penelitian membuktikan bahwa penerapan lapisan nano AR dapat meningkatkan efisiensi sel surya perovskite secara signifikan. Mekanisme utama peningkatan ini adalah pengurangan reflektansi cahaya pada permukaan, sehingga lebih banyak foton masuk ke lapisan aktif perovskite dan berkontribusi pada pembangkitan pasangan elektron-hole.

Distribusi medan elektromagnetik dari simulasi mendukung temuan ini, di mana intensitas medan meningkat pada area antarmuka setelah penambahan lapisan AR. Hal ini memperkuat bahwa lapisan nano tidak hanya bersifat pelindung, tetapi juga berfungsi sebagai elemen optik yang memperbaiki kinerja sel surya.

Karakterisasi optik menggunakan spektrofotometer memperlihatkan peningkatan penyerapan cahaya sebesar 10–12% setelah penambahan lapisan AR, sejalan dengan peningkatan efisiensi konversi energi pada Tabel 1. Sementara itu, hasil SEM menegaskan bahwa morfologi lapisan berperan dalam kinerja optik: lapisan SiO<sub>2</sub> dengan struktur halus lebih efektif dibanding TiO<sub>2</sub>.

Perbedaan kecil antara hasil simulasi dan eksperimen (sekitar 0,5–0,7%) kemungkinan dipengaruhi oleh variasi pada proses fabrikasi, ketebalan lapisan, dan kondisi lingkungan saat pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun simulasi mampu memberikan prediksi yang akurat, faktor teknis di lapangan tetap berperan dalam menentukan hasil akhir.

Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi pentingnya integrasi material perovskite dengan teknologi lapisan nano AR untuk mendorong efisiensi sel surya generasi baru. Temuan ini relevan bagi pengembangan desain optoelektronik dan mendukung upaya global dalam transisi menuju energi bersih.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **Kesimpulan**

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan lapisan nano anti-reflektif (AR) pada sel surya perovskite mampu meningkatkan efisiensi konversi energi secara signifikan. Hasil simulasi dan eksperimen sama-sama memperlihatkan peningkatan efisiensi sekitar 3–5% dibandingkan kondisi tanpa lapisan AR. Lapisan berbasis SiO<sub>2</sub> terbukti memberikan kinerja paling optimal dengan efisiensi mencapai 21,3% pada eksperimen dan 22,0% pada simulasi, lebih tinggi daripada lapisan TiO<sub>2</sub>. Selain itu, distribusi medan elektromagnetik dari hasil simulasi memperlihatkan peningkatan intensitas pada lapisan aktif, mendukung hasil empiris bahwa lapisan AR efektif dalam mengurangi pantulan dan meningkatkan serapan cahaya.

Karakterisasi tambahan melalui spektrofotometer menunjukkan peningkatan serapan cahaya hingga 90% pada panjang gelombang tertentu, sedangkan hasil SEM mengonfirmasi bahwa morfologi lapisan yang lebih halus dan seragam pada SiO<sub>2</sub> berkontribusi pada peningkatan efisiensi. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi material perovskite dengan rekayasa optik berbasis lapisan nano AR merupakan strategi penting untuk meningkatkan kinerja sel surya generasi baru sekaligus mendukung transisi energi bersih yang berkelanjutan.

## Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas eksplorasi jenis material lapisan nano anti-reflektif selain TiO<sub>2</sub> dan SiO<sub>2</sub>, misalnya material komposit atau struktur nano 3D (nanocone, nanorods) yang berpotensi memberikan peningkatan efisiensi lebih tinggi. Selain itu, diperlukan optimasi lebih lanjut pada teknik deposisi lapisan untuk menghasilkan ketebalan dan morfologi yang lebih seragam, sehingga perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen dapat diminimalkan.

Selain aspek material, penelitian masa depan juga perlu memperhatikan masalah stabilitas jangka panjang dari sel surya perovskite. Studi mengenai ketahanan lapisan AR terhadap kelembaban, panas, dan kondisi lingkungan ekstrem akan sangat penting untuk memastikan keandalan perangkat dalam skala industri. Integrasi penelitian simulasi dan eksperimen secara berkelanjutan juga menjadi strategi efektif dalam mempercepat pengembangan teknologi sel surya generasi baru yang efisien, stabil, dan ramah lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Albert, A. A., Parthasarathy, V., & Kumar, P. S. (2024). Review on recent progress in epoxy-based composite materials for electromagnetic interference (EMI) shielding applications. *Polymer Composites*, 45(3), 1956–1984. <https://doi.org/10.1002/pc.27928>
- Barrutia, I., Seminario-Córdova, R., & Martínez-Rojas, V. (2022). Carbon-based perovskite solar cells: The future photovoltaic technology. *Green Energy and Technology*, 33–44. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97862-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97862-4_3)
- Cahyono, Y., Ramadhanti, S., Rasmianti, Dewi, Y. N. K., & Asrori, M. Z. (2021). Effect of annealing hold time on thickness and optical properties of barium titanate solar cell material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1816(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1816/1/012062>
- Chander, S., & Tripathi, S. K. (2022). Efficient metal oxide-based flexible perovskite solar cells. In *Smart and flexible energy devices* (pp. 227–240). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003186755-13>

- Chen, G., Zhang, T., & Wang, Y. (2024). Bridging mechanisms between micro and macro. In *Electromagnetic wave absorbing materials: Fundamentals and applications* (pp. 117–143). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119699316.ch5>
- Darmana, I., Berliana, S., Erliwati, & Salvayer, A. R. (2023). Solar power plant planning study in campus III building of Bung Hatta University. *AIP Conference Proceedings*, 2691, 050005. <https://doi.org/10.1063/5.0117629>
- Dastgeer, G., Nisar, S., Zulfiqar, M. W., Eom, J., Imran, M., & Akbar, K. (2024). A review on recent progress and challenges in high-efficiency perovskite solar cells. *Nano Energy*, 132, 110401. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110401>
- Deng, J., Bai, Z., Zhao, B., Guo, X., Zhao, H., Xu, H., & Park, C. B. (2021). Opportunities and challenges in microwave absorption of nickel–carbon composites. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(37), 20795–20834. <https://doi.org/10.1039/d1cp03522c>
- Digambar Singh, A., Yog Raj Sood, B., & Deepak, C. (2020). Recent techno-economic potential and development of solar energy sector in India. *IETE Technical Review*, 37(3), 246–257. <https://doi.org/10.1080/02564602.2019.1596043>
- Dua, H. K., Kant, N., & Thakur, V. (2024). Comparative analysis of second-harmonic generation at two different interfaces in Kretschmann configuration. *Journal of Optics (India)*, 53(5), 4091–4095. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01397-2>
- Duan, J., Peng, L., Yu, H., & Xu, L. (2022). Research progress on the stability and efficiency of the two-dimensional halide perovskite solar cells. *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*, 39(5), 1890–1906. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211118.001>
- Kevin, L., Poespawati, N. R., Kartasmita, R. A., Isa, M. J. A., Abuzairi, T., & Retno, W. P. (2020). Most efficient perovskite precursors molarity for perovskite solar cell. In *2020 7th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETAS51660.2020.9484209>
- Kuznetsova, I. A., & Savenko, O. V. (2024). Interaction of an electromagnetic H-wave with an “insulator–semiconductor–insulator” nanostructure in the view of semiconductor band structure anisotropy. *Optics and Spectroscopy*, 132(2), 162–169. <https://doi.org/10.1134/S0030400X24020127>
- Miah, M. H., Rahman, M. B., Nur-E-Alam, M., Das, N., Soin, N. B., Hatta, S. F. W. M., & Islam, M. A. (2023). Understanding the degradation factors, mechanism and initiatives for highly efficient perovskite solar cells. *ChemNanoMat*, 9(3), e202200471. <https://doi.org/10.1002/cnma.202200471>
- Nabben, D., Kuttruff, J., Stolz, L., Ryabov, A., & Baum, P. (2023). Attosecond electron microscopy of sub-cycle optical dynamics. *Nature*, 619(7968), 63–67. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06074-9>
- Nayan, P. N., Ahammed, A. K., Rahman, A., Johora, F. T., Reza, A. W., & Arefin, M. S. (2023). Impact analysis of rooftop solar photovoltaic systems in academic buildings. In *Lecture notes in networks and systems* (Vol. 852, pp. 325–337). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-50330-6\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50330-6_32)
- Patil, S. V., & Bhargava, K. (2024). Semiconductors for solar cells. In *Handbook of semiconductors: Fundamentals to emerging applications* (pp. 207–221). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003450146-16>

- Poplavko, Y. M., Didenko, Y. V., & Tatarчук, D. D. (2022). Microwave parameters of components of shielding composites. Part 2: Mechanisms of microwave absorption. *Radioelectronics and Communications Systems*, 65(12), 641–653. <https://doi.org/10.3103/S0735272723010041>
- Pusch, A., & Ekins-Daukes, N. J. (2021). Classifying advanced concepts to assess device requirements for high efficiency solar cells. In *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)* (pp. 49–50). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NUSOD52207.2021.9541417>
- Rani, P., Taya, R., & Reddy, V. P. (2023). A review on solar energy and different electricity generations. In *2023 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)* (pp. 231–234). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEEIC59336.2023.10451552>
- Tang, L., Tsui, K.-H., Leung, S.-F., Zhang, Q., Kam, M., Wang, H.-P., He, J.-H., & Fan, Z. (2019). Large-scale, adhesive-free and omnidirectional 3D nanocone anti-reflection films for high performance photovoltaics. *Journal of Semiconductors*, 40(4), 042601. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/40/4/042601>
- Wang, F., Liu, X.-K., & Gao, F. (2019). Fundamentals of solar cells and light-emitting diodes. In *Advanced nanomaterials for solar cells and light emitting diodes* (pp. 1–35). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813647-8.00001-1>
- Xu, L., Wang, S., Pu, M., Guo, Y., Li, X., & Luo, X. (2024). Recent major advancements in perovskite solar cells. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 26(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ad33a6>
- Ye, P., Peng, J., Xu, F., Geng, H., Zhu, Y., & Wang, H. (2023). Design of core–shell SiO<sub>2</sub> nanoparticles to create anti-reflection and anti-fouling coatings for solar cells. *Progress in Organic Coatings*, 184, 107827. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107827>
- Zambrano, D. F., Villarroel, R., Espinoza-González, R., Carvajal, N., Rosenkranz, A., Montaña-Figueroa, A. G., Arellano-Jiménez, M. J., Quevedo-Lopez, M., Valenzuela, P., & Gacitúa, W. (2021). Mechanical and microstructural properties of broadband anti-reflective TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> coatings for photovoltaic applications fabricated by magnetron sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 220, 110841. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110841>
- Zhang, J., She, Y., Zhu, Y., Su, H., Zheng, X., Yao, Y., Li, D., & Liu, S. (2024). Enhancing performance and stability of perovskite solar cells with a novel formamidine group additive. *Small*, 20(40), 2402557. <https://doi.org/10.1002/sml.202402557>