



# Peningkatan Performa Optik Sel Surya *Perovskite* $\text{MAPbI}_3$ dengan Kristal Fotonik *Nanotube*

Bagas Abdussalam<sup>1\*</sup>, Yuyu Rachmat Tayubi

<sup>1</sup>Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia

\*[bagasabdussalam301200@upi.edu](mailto:bagasabdussalam301200@upi.edu)

## Abstrak

Sel surya *perovskite* (*perovskite solar cell*, PSC) adalah salah satu sel surya generasi ketiga yang mampu bersaing dengan sel surya silikon. PSC menarik perhatian peneliti saat ini karena efisiensinya yang bagus, memiliki biaya fabrikasi yang rendah, serta celah pita energi (*band gap*) yang ideal. Peningkatan performa optik dapat menjadi salah satu opsi untuk meningkatkan efisiensi dari PSC. Penerapan struktur kristal fotonik (*photonic crystal*, PC) diketahui dapat menjadi solusi untuk meningkatkan performa optik dari PSC. Karakteristik dari struktur PC seperti penangkapan cahaya (*light-trapping*) dan efek *slow photon* berguna untuk mengurangi terjadinya rekombinasi muatan pembawa dan meningkatkan interaksi antara foton dan material. Dalam penelitian ini, optimasi desain PC *nanotube* yang diaplikasikan di lapisan transpor elektron (*electron transport layer*, ETL) pada PSC berbasis timbal iodida (*methylammonium lead-iodide*,  $\text{MAPbI}_3$ ) disimulasikan dengan metode *finite-difference time domain* (FDTD). Simulasi dilakukan pada berbagai variasi parameter optimasi seperti jari-jari, konstanta kisi, dan ketebalan PC *nanotube*. Hasil simulasi berupa variasi jari-jari, konstanta kisi, dan ketebalan *Photonic Crystal* dapat digunakan untuk menentukan desain optimal PC *nanotube* pada sel surya *perovskite*  $\text{MAPbI}_3$ .

Kata kunci: sel surya *perovskite*, kristal fotonik, simulasi, metode FDTD

## 1. Pendahuluan

Energi dalam kehidupan manusia berperan penting dalam perkembangan dan peningkatan ekonomi, otomasi, dan modernisasi. Kebutuhan energi setiap waktunya terus meningkat sedangkan ketersediaan energi yang digunakan saat ini terbatas karena kebanyakan masih menggunakan energi yang tidak berkelanjutan (Borges Neto dkk., 2010). Saat ini, sumber energi global saat ini bergantung pada energi fosil dan penggunaan energi fosil adalah salah satu penyebab utama meningkatnya densitas  $\text{CO}_2$ . Menurut sumber emisi karbon global, emisi karbon dioksida yang berasal dari batu bara, minyak, gas alam, semen, dan pembakaran gas masing-masing adalah 43%, 33%, 18%, 5.3%, dan 0.6% pada tahun 2012 (Borges Neto dkk., 2010; IEA, 2018).

Bumi tidak mampu menyerap kandungan  $\text{CO}_2$  sebanyak yang dihasilkan energi fosil dan menyebabkan terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim (Hosenuzzaman dkk., 2015). Hal ini merupakan sebuah tantangan bagi seluruh penduduk di dunia (Sommers, 1979).

Maka dari itu, sumber energi alternatif diperlukan sehingga manusia tidak lagi bergantung pada energi fosil. Energi terbarukan dapat menjadi sebuah solusi untuk sumber energi yang berkelanjutan. Penggunaan energi terbarukan memberikan manfaat-manfaat seperti pengurangan emisi polusi



udara juga gas rumah kaca (Nguyen, 2007). Energi terbarukan yang dimaksud disini diantaranya bioenergi, energi surya (fotovoltaik dan tenaga surya terkonsentrasi), energi angin, dan geotermal (Letcher, 2018).

Tujuan penelitian ini adalah meningkatkan performa optik sel surya perovskite. Tujuan tersebut dijelaskan lebih rinci pada poin-poin sebagai berikut :

- Memperoleh desain optimal kristal fotonik nanotube pada lapisan transpor elektron sel surya perovskite.
- Mengetahui dan membandingkan performa sel surya perovskite sebelum dan sesudah diaplikasikan kristal fotonik pada lapisan transpor elektron.

## 2. Metode

Sistem yang ditinjau pada penelitian ini adalah PC yang diaplikasikan pada struktur PSC. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, PC memiliki kemiripan dengan semikonduktor dalam konsep pita energi. Pada semikonduktor, terdapat konsep band gap sedangkan pada PC terdapat konsep PBG. Yang membedakan diantara keduanya adalah jenis partikel yang terlibat. Partikel yang terlibat pada semikonduktor adalah elektron sedangkan partikel yang terlibat pada PC adalah foton. Maka dari itu, persamaan Maxwell digunakan untuk memahami konsep PC alih-alih menggunakan persamaan Schrödinger. Salah satu metode perhitungan numerik untuk menyelesaikan persamaan Maxwell adalah metode *finite-difference time domain* (FDTD).

Metode FDTD pertama kali dikenalkan oleh Yee pada tahun 1966 (Yee, 1996). Metode ini digunakan untuk mengalkulasikan medan listrik dan medan magnet sebagai fungsi waktu.

### - **Simulator yang digunakan dalam penelitian ini : Lumerical FDTD**

Lumerical FDTD adalah perangkat lunak simulasi dan pemodelan berbagai material, pemrosesan, dan perangkat-perangkat nanofotonik seperti sel surya. Lumerical FDTD merupakan bagian dari produk Ansys Lumerical. Pada prinsipnya, Lumerical FDTD dapat menyelesaikan persamaan Maxwell dengan berbagai masukan (*input*) yang diberikan seperti panjang gelombang elektromagnetik dari sumber cahaya, material yang digunakan pada sel surya, serta desain struktur sel surya. Keluaran (*output*) yang dihasilkan merupakan sifat-sifat optik dari sel surya seperti kemampuan absorpsi sel,  $J_{sc}$ , dan distribusi rapat energi gelombang elektromagnetik.

### - **Desain dan Simulasi**

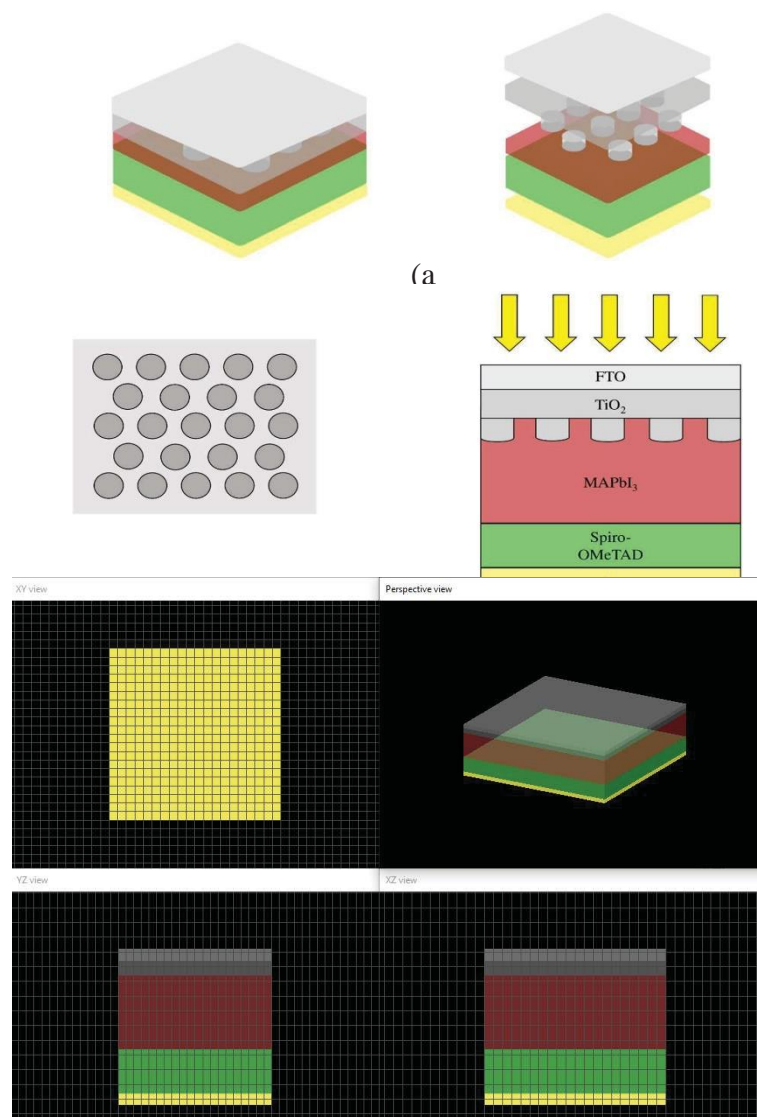
Desain skematik PSC pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar dibawah. Secara lengkap, pemilihan material beserta dimensinya pada tiap lapisan disajikan pada Tabel dibawah.

Pemilihan material TiO<sub>2</sub> untuk ETL dan MAPbI<sub>3</sub> untuk Perovskite. Pemilihan material pada lapisan reflektor, HTL, dan TCL yang dipilih masing-masing adalah emas (Au), *N,N*-di-*p*-metoxyphenylamine (Spiro-OMeTAD), dan *Fluorine-doped Tin Oxide* (FTO) yang merupakan standar pada PSC (Choi dkk., 2019; Jeyakumar dkk., 2019; Shahverdi dkk., 2019).

Lapisan	Material	Dimensi
TCL	FTO	Ketebalan 80 nm



ETL	TiO <sub>2</sub>	Ketebalan 100 nm
PC	InAs	Ketebalan 62,5–500 nm Jari-Jari 112,5 nm Konstanta Kisi 250 nm
Perovskite	MAPbI <sub>3</sub>	Ketebalan 500 nm
HTL	Spiro-OMeTAD	Ketebalan 300 nm
Reflektor	Au	Ketebalan 80 nm



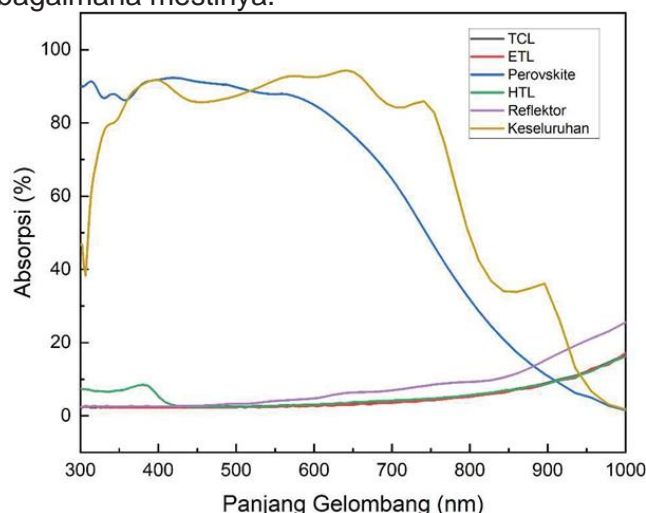


**Gambar 1 (a).** Desain skematik dalam perspektif tiga dimensi  
PSC yang terdiri atas lima lapisan utama dan struktur PC,  
**Gambar 2 (b).** topologi PC nanotube,  
**Gambar 3 (c).** diagram skematik PSC dengan sumber cahaya  
masuk melalui lapisan teratas (FTO), dan (d) desain PSC pada  
Lumerical FDTD.

Sebagai variabel *input* pada Lumerical FDTD, data tiap material pada lapisan-lapisan PSC diperoleh dari berbagai sumber. Data material Au diperoleh dari data (Palik, 2008), data MAPbI<sub>3</sub> diperoleh dari data (Green dkk., 2015), Spiro-OMeTAD dari (Filipič dkk., 2015), TiO<sub>2</sub> dari (Raoult dkk., 2019), dan FTO dari (Abdullahi dkk., 2014). Rentang panjang gelombang sumber cahaya yang digunakan pada penelitian ini adalah 300–1000 nm yang mana termasuk diantaranya rentang cahaya tampak dan sedikit dari rentang cahaya ultraviolet dan inframerah. Rentang ini digunakan berdasarkan respon sel surya terhadap spektrum cahaya matahari (Field, 1997).

### 3. Hasil dan Pembahasan

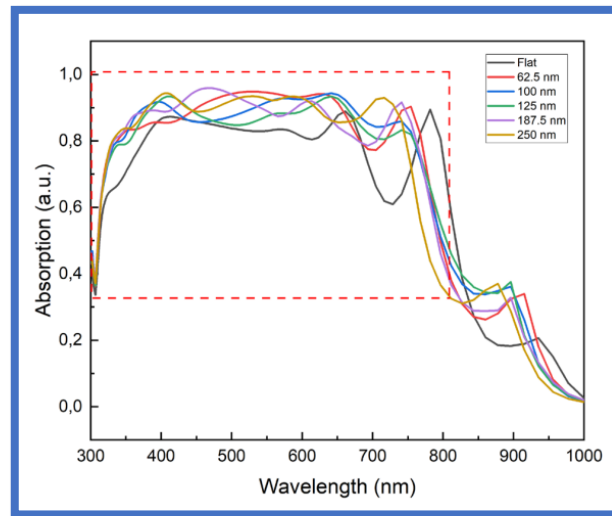
Perovskite menyerap sebagian besar foton datang, sedangkan lapisan lainnya hanya menyerap sedikit foton tersebut. Lapisan ini menyerap lebih dari 80% cahaya yang datang pada 300–630 nm, dengan serapan maksimum mencapai 92% pada panjang gelombang 409–429 nm. Kemampuan absorpsinya kemudian menurun terutama ketika panjang gelombang lebih besar dari 800 nm. Hal ini karena foton dengan panjang gelombang lebih besar dari 800 nm memiliki energi yang kurang dari band gap MAPbI<sub>3</sub> (<1,55 eV) (Sahoo dkk., 2018). Namun, besarnya kontribusi absorpsi MAPbI<sub>3</sub> terhadap struktur PSC dibandingkan lapisan lain menunjukkan bahwa fungsi lapisan perovskite sebagai lapisan perovskite berfungsi sebagaimana mestinya.



**Gambar 4.** Kurva absorpsi terhadap panjang gelombang pada tiap lapisan di PSC. Terlihat bahwa lapisan perovskite (MAPbI<sub>3</sub>) berkontribusi paling besar dalam penyerapan cahaya datang.



**- Performa Absorpsi Variasi Ketebalan**



**Gambar 5.** Performa Absorpsi Variasi Ketebalan Peningkatan absorpsi bervariasi seiring peningkatan ketebalan Photonic crystal (PC). Absorpsi tertinggi didapat ketika struktur memiliki ketebalan 187,5 nm.

**Tabel 1.** Variasi Ketebalan dan Peningkatan Absorpsi

Ketebalan PC (nm)	Peningkatan Absorpsi (%)	Puncak Absorpsi
Flat	0	0.894
62.5	8.54	0.948
100	8.78	0.943
125	7.37	0.934
187.5	9.22	0.959
250	8.92	0.943

Di penelitian ini terbukti semakin besar ketebalan, semakin besar nilai  $J_{sc}$  karena foton yang ditangkap oleh kristal fotonik semakin banyak. Persamaan matematis untuk mencari nilai  $J_{sc}$  adalah :

$$J_{sc} = \frac{e}{hc} \int_{\lambda_0}^{\lambda} \lambda Abs(\lambda) I_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

Dengan :

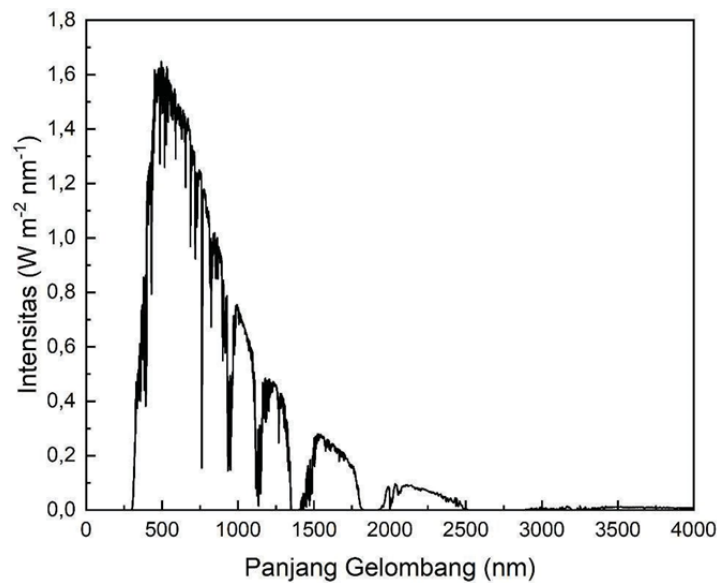
$e$  = Nilai muatan elektron.

$h$  = Konstanta planck.

$c$  = Kecepatan cahaya di vakum.

$\lambda$  &  $\lambda_0$  = Rentang panjang gelombang cahaya yang digunakan pada simulasi (300 – 1000 nm).

$I_{AM1,5}(\lambda)$  = Spektrum radiasi matahari 1,5 AM.



**Gambar 6.** Kurva intensitas radiasi matahari 1,5 AM yang bervariasi pada rentang panjang gelombang 0–4000 nm (Gueymard, 2004).

Berikut adalah tabel ketebalan nanotube terhadap  $J_{sc}$ .

**Tabel 2.** Ketebalan Nanotube terhadap  $J_{sc}$

Ketebalan (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
0 (Tanpa PC)	24,4736
62,5	24,5469
100	26,0296
125	26.689
187,5	26,9527
250	27,7096
287,5	27,9191
325	27.9283
400	28,2406
500	28,4403

#### 4. Simpulan

Photonic crystal (PC) terbukti mempengaruhi nilai absorpsi Sel Surya, dengan nilai absorpsi optimum tercapai di ketebalan Photonic Crystal 187,5 nm di kisaran panjang gelombang seperti yang bisa dilihat di halaman kelima.

Nilai rapat arus listrik ( $J_{sc}$ ) terbukti berbanding lurus dengan ketebalan Photonic crystal. Data hasil simulasi menunjukkan nilai  $J_{sc}$  terkecil berada



pada ketebalan Photonic crystal 0 nm (tanpa PC), dan nilai Jsc terbesar berada pada ketebalan Photonic crystal 500 nm.

### Daftar Pustaka

- Gueymard, C. A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4), 423–453. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>
- Raoult, E., Bodeux, R., Jutteau, S., & Rives, S. (2019). Optical Characterizations and Modelling of Semitransparent Perovskite Solar Cells for Tandem Applications. *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*, 36(October), 757–763. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20192019-3BV.2.53>
- Sahoo, S. K., Manoharan, B., & Sivakumar, N. (2018). Introduction: Why perovskite and perovskite solar cells? In *Perovskite Photovoltaics: Basic to Advanced Concepts and Implementation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812915-9.00001-0>
- Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8(7), 506–514. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.134>