

## Pengaruh Ukuran Dimer Nanopartikel Bola Emas, Perak, dan Aluminium yang Ditambahkan pada Lapisan *Back Surface* terhadap Efisiensi Sel Surya CIGS

Abi Syaibah<sup>1</sup>, Mulda Muldarisnur<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 15 Agustus 2024  
Direvisi: 26 Oktober 2024  
Diterima: 21 November 2024

#### Kata kunci:

Dimer nanopartikel  
FDTD  
Back surface  
Sel surya CIGS

#### Keywords:

Nanoparticle dimers  
FDTD  
Back surface  
CIGS solar cells

#### Penulis Korespondensi:

Muldarisnur  
Email: [muldarisnur@sci.unand.ac.id](mailto:muldarisnur@sci.unand.ac.id)

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran dan material dimer nanopartikel bola yang diletakkan pada lapisan *back surface* sel surya CIGS terhadap kerapatan arus yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan secara komputasional menggunakan metode *finite difference time domain* (FDTD). Ada tiga material yang diteliti yaitu perak, emas, dan aluminium. Untuk setiap material dilakukan variasi ukuran nanopartikel. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kerapatan arus hubung singkat ( $J_{sc}$ ) meningkat dengan diameter nanopartikel. Dimer nanopartikel perak menunjukkan peningkatan  $J_{sc}$  tertinggi. Diameter bola sebesar 60 nm menghasilkan nilai  $J_{sc}$  tertinggi. Peningkatan nilai  $J_{sc}$  sel surya dikarenakan refleksi cahaya ke lapisan aktif sel surya oleh nanopartikel dan eksitasi medan dekat di sekitar nanopartikel dimer. Peningkatan  $J_{sc}$  yang cukup signifikan menunjukkan potensi pemanfaatan dimer nanopartikel perak untuk meningkatkan efisiensi sel surya CIGS.

*This research aims to determine the effect of the size and material of spherical nanoparticle dimers placed on the back surface layer of CIGS solar cells on the resulting current density. This research was conducted computationally using the finite difference time domain (FDTD) method. Three materials were studied: silver, gold, and aluminium. For each material, nanoparticle diameter was varied. The calculation results show that the short circuit current density ( $J_{sc}$ ) increases with the nanoparticle diameter. Silver nanoparticle dimers showed the highest increase in  $J_{sc}$ . A sphere diameter of 60 nm produces the highest  $J_{sc}$ . The increase in the  $J_{sc}$  of CIGS solar cells is due to the back reflection of light into the active layer of solar cells by nanoparticles and the near field excitation around nanoparticle dimers. The significant increase in  $J_{sc}$  shows the potential for utilizing silver nanoparticle dimers to increase the efficiency of CIGS solar cells.*

Copyright © 2024 Author(s).

## I. PENDAHULUAN

Energi terbarukan merupakan topik penelitian yang intensif dalam dua dekade terakhir karena terbatasnya cadangan minyak bumi, volatilitas harga, dan dampaknya terhadap lingkungan seperti polusi dan pemanasan global. Sinar matahari adalah sumber energi yang menjanjikan karena tersedia dalam jumlah yang banyak dan ramah lingkungan (Cousse, 2021). Ada beberapa metode untuk mengubah energi matahari menjadi listrik, yang paling menjanjikan adalah penggunaan sel surya. Sel surya digunakan untuk mengubah energi foton secara langsung menjadi listrik (Amalathas & Alkaisi, 2019). Di antara berbagai jenis sel surya, sel surya lapisan tipis seperti *copper indium gallium di-selenide* (CIGS) memiliki potensi besar. Sel surya CIGS memiliki efisiensi yang lebih tinggi (Kovacic, dkk., 2019; Royanian, dkk., 2020), penyerapan optik yang lebih tinggi (Kaelin, dkk., 2004), dan *bandgap* lapisan aktif yang mudah diatur (Ali & Abdullah, 2012; Boukourt, dkk., 2023) dibanding sel surya *non-single crystalline* lainnya.

Sel surya CIGS menggunakan lapisan aktif dari material yang mahal seperti indium dan gallium, yang menyebabkan biaya produksinya menjadi tinggi (Licht, dkk., 2015; Ouédraogo, dkk., 2013). Biaya produksi dapat ditekan dengan mengurangi ketebalan lapisan aktif (Sobhani, dkk., 2020; Zarerasouli, dkk., 2022; Ziabari, dkk., 2020), tetapi hal ini menyebabkan penurunan efisiensi sel surya yang signifikan karena jumlah foton yang diserap jauh berkurang. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini, seperti *bandgap grading* (Royanian, dkk., 2020), penggunaan perovskite (Jošt, dkk., 2022), penambahan lapisan *Back Surface Field* (BSF) (Barman & Kalita, 2021), dan penambahan *nanowire* (Sim, dkk., 2019), atau *quantum dot* di lapisan *downshifting luminescent* (Sui, dkk., 2020). Salah satu pendekatan yang paling efektif untuk meningkatkan efisiensi sel surya adalah dengan menggunakan nanopartikel logam (Fahendri, dkk., 2022; Muldarisnur, dkk., 2023; Perdana & Muldarisnur, 2020) karena terjadinya resonansi elektron bebas pada bidang batas dengan dielektrik (Atorf, dkk., 2014). Banyak penelitian telah dilakukan terkait penambahan logam nanopartikel ke berbagai sel surya (Gezgin & Kılıç, 2020; Mirzaei, dkk., 2020; Perdana & Muldarisnur, 2020; Royanian, dkk., 2020; Sobhani, dkk., 2020; Yassin, dkk., 2023; Zarerasouli, dkk., 2023; Ziabari, dkk., 2020) yang telah menunjukkan peningkatan efisiensi sel surya yang signifikan.

Peningkatan efisiensi sel surya lapisan tipis CIGS dengan *bandgap* yang dioptimalkan menggunakan nanopartikel logam sudah dilaporkan (Zarerasouli, dkk., 2022). Penelitian ini menganalisis pengaruh perubahan parameter nanopartikel, seperti bentuk, bahan, ukuran, dan periode, dikombinasikan dengan *bandgap* yang dioptimalkan dengan menyesuaikan molar lapisan aktif pada efisiensi sel surya dengan menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD). Dalam penelitian tersebut, nanopartikel logam ditempatkan pada bagian *back surface*. Nanopartikel Ag berbentuk kubik dengan panjang sisi 55 nm disusun secara periodik dengan periode 220 nm menunjukkan peningkatan *short circuit current density* ( $J_{sc}$ ) yang signifikan, mencapai 19,96 mA / cm<sup>2</sup> dibandingkan dengan sel surya tanpa nanopartikel, yang hanya mencapai 16,63 mA/cm<sup>2</sup>. Pendekatan ini kemudian dilanjutkan dengan menggunakan tetramer nanopartikel dan mencapai  $J_{sc}$  maksimum sebesar 27,2 mA/cm<sup>2</sup> untuk penambahan nanopartikel perak berbentuk silinder dengan diameter- $x$  70 nm, diameter- $y$  60 nm, dan tinggi 60 nm (Zarerasouli, dkk., 2023).

Sejauh ini, penelitian yang secara langsung menganalisis pengaruh ukuran dimer nanopartikel emas (Au), aluminium (Al) dan perak (Ag) yang diletakkan pada lapisan *back surface* sel surya CIGS terhadap efisiensinya masih belum dilakukan. Penelitian ini akan menganalisis secara komputasi pengaruh ukuran dimer nanopartikel bola dengan beberapa material logam pada lapisan *back surface* sel surya CIGS. Ada beberapa metode untuk menganalisis sifat optik sel surya, seperti FDTD dan *Finite Element Method* (FEM). Penelitian ini akan menggunakan metode FDTD untuk mensimulasikan medan listrik yang muncul ketika cahaya melewati sel surya dan berinteraksi dengan nanopartikel logam. FDTD dipilih karena metode ini sangat efisien dan akurat untuk mempelajari perambatan gelombang elektromagnetik di dalam sel surya.

## II. METODE

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik untuk menyelesaikan persamaan Maxwell di dalam sel surya. Simulasi numerik yang digunakan adalah FDTD. Panjang gelombang dibatasi dari rentang 300 nm sampai 984 nm dimana sekitar 90% cahaya Matahari yang sampai ke Bumi berada dalam rentang ini. Penelitian ini akan dibagi menjadi dua tahap, yaitu pemodelan sel surya tanpa

nanopartikel untuk dibandingkan dengan sel surya referensi (Zarerasouli, dkk., 2022, 2023) kemudian pemodelan sel surya dengan penambahan nanopartikel.

## 2.1 Pemodelan Sel Surya Tanpa penambahan NP

Sel surya tanpa penambahan nanopartikel dibuat dengan struktur seperti pada Gambar 1 dengan ukuran sel 220 nm x 150 nm dan ketebalan tiap lapisan sebagai berikut: AZO dengan ketebalan 20 nm, ZnO dengan ketebalan 30 nm, CdS dengan ketebalan 20 nm, CIGS dengan ketebalan 120 nm, dan Mo dengan ketebalan 20 nm. Udara digunakan sebagai media di luar sel surya. Spektrum AM1,5G digunakan sebagai sumber cahaya. *Short circuit current density* ( $J_{sc}$ ) dari sel surya dihitung dengan menggunakan Persamaan 1.

$$j_{sc} = e \int \frac{\lambda}{hc} QE(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

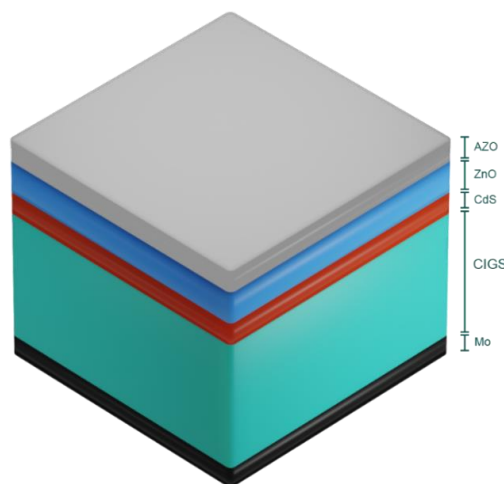
dimana  $e$ ,  $QE$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $I_{AM1.5}$  berturut-turut adalah muatan elektron, *quantum efficiency*, panjang gelombang, konstanta Planck, kecepatan cahaya, dan intensitas cahaya AM 1,5. Nilai  $QE$  dapat ditentukan dengan Persamaan 2.

$$QE(\lambda) = \frac{P_{abs}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (2)$$

Untuk intensitas cahaya AM 1,5 nilai  $P_{in}$  adalah 1000 W/m<sup>2</sup>. Nilai  $P_{abs}$  dapat ditentukan dengan Persamaan 3.

$$P_{abs} = -real\left(\nabla \cdot \vec{P}\right) = -\frac{1}{2} \omega \epsilon_0 |E(r, \omega)|^2 Im(\epsilon(r, \omega)) \quad (3)$$

dengan  $\omega$ ,  $\epsilon_0$ ,  $E(r, \omega)$ ,  $Im(\epsilon(r, \omega))$  berturut-turut merepresentasikan frekuensi, permitivitas vakum, medan listrik, bagian imajiner dari permitivitas lapisan aktif.

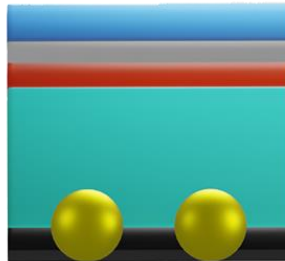


**Gambar 1** Struktur sel surya CIGS

Data indeks bias ( $n$ ) dan koefisien ekstingsi ( $k$ ) yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh melalui penelitian sebelumnya. Data ini tersedia di situs <http://www.refractiveindex.info> dan artikel-artikel referensi. Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah indeks bias udara (Ciddor, 1996), *Aluminium-doped ZnO* (Treharne, dkk., 2011), ZnO (Aguilar, dkk., 2019), cadmium selenide (Ninomiya & Adachi, 1995), CIGS (Loubat, dkk., 2017), *molybdenum* (Werner, dkk., 2009), perak (Wu, dkk., 2014), emas (Rosenblatt, dkk., 2020) dan aluminium (McPeak, dkk., 2015). Data spektrum radiasi matahari AM1.5 diperoleh dari situs web <https://www.nrel.gov>. Nilai  $J_{sc}$  akan dibandingkan dengan referensi (Zarerasouli, dkk., 2023).

## 2.2 Sel Surya dengan Penambahan NP Emas di Lapisan Back Surface

Dimer nanopartikel ditambahkan ke lapisan *back surface* yaitu Molybdenum. Nanopartikel yang digunakan adalah emas (Au), aluminium (Al), dan perak (Ag) berbentuk bola. Jarak antar permukaan nanopartikel dibuat tetap sebesar 20 nm seperti pada Gambar 2.

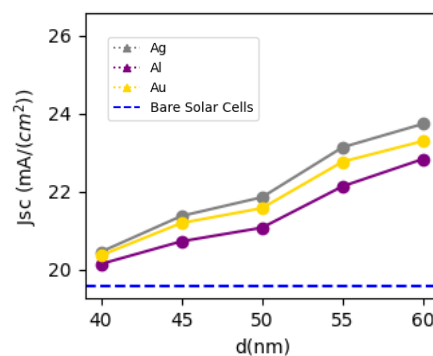


Gambar 2 Posisi dimer nanopartikel pada lapisan *back surface* sel surya CIGS

Diameter nanopartikel divariasikan dari 40 nm sampai 60 nm dengan peningkatan sebesar 5 nm. Ukuran 60 nm diambil sebagai ukuran maksimal untuk menghindari penyerapan cahaya berlebih oleh nanopartikel.

## III. HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan simulasi FDTD yang dilakukan untuk sel surya tanpa penambahan nanopartikel, didapatkan nilai  $J_{sc}$  sebesar  $19,6 \text{ mA/cm}^2$ . Nilai ini dijadikan sebagai acuan performa sel surya dengan penambahan nanopartikel. Simulasi FDTD untuk sel surya dengan penambahan nanopartikel dilakukan dengan variasi material Au, Ag, dan Al dengan variasi ukuran dari 40 nm sampai 60 nm untuk setiap material. Dari hasil simulasi didapatkan nilai  $J_{sc}$  seperti pada Gambar 3.

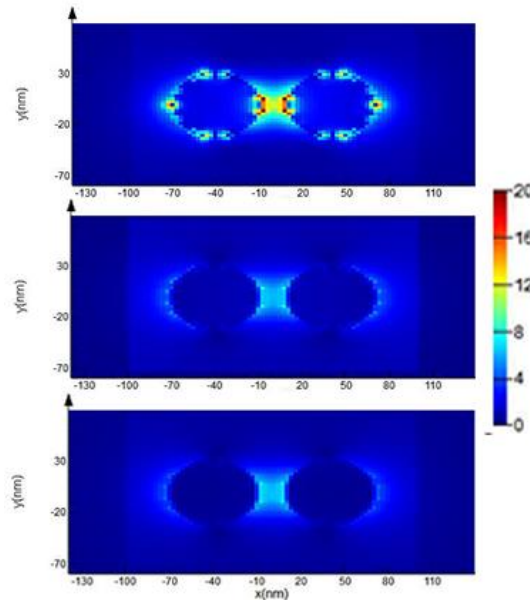


Gambar 3 Short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) sebagai fungsi dari ukuran NP bola dengan berbagai material pada lapisan *back surface*

Secara umum, nilai  $J_{sc}$  meningkat seiring dengan bertambahnya diameter nanopartikel. Hal ini disebabkan oleh kombinasi efek medan dekat yang muncul di bagian bawah lapisan aktif dan refleksi cahaya ke lapisan optic oleh nanopartikel. Berdasarkan Gambar 3, nilai  $J_{sc}$  tertinggi dicapai pada nanopartikel Ag dengan ukuran 60 nm sebesar  $23,74 \text{ mA/cm}^2$ . Nilai  $J_{sc}$  terendah didapatkan pada nanopartikel Al berukuran 40 nm.  $J_{sc}$  tertinggi terjadi pada ukuran nanopartikel 60 nm untuk semua material. Nilai  $J_{sc}$  meningkat seiring dengan bertambahnya diameter nanopartikel untuk semua material.

Sel surya dengan penambahan nanopartikel Ag menghasilkan peningkatan nilai  $J_{sc}$  paling besar. Nilai  $J_{sc}$  awalnya sebesar  $20,46 \text{ mA/cm}^2$ , nilai ini meningkat seiring bertambahnya diameter nanopartikel. Nilai  $J_{sc}$  terbesar didapatkan ketika ukuran nanopartikel 60 nm yaitu sebesar  $23,74 \text{ mA/cm}^2$ . Untuk sel surya dengan penambahan nanopartikel Au, tren hubungan ukuran nanopartikel dengan nilai  $J_{sc}$  mirip seperti Ag, namun lebih rendah. Ketika ukuran nanopartikel Au sebesar 40 nm, didapatkan nilai  $J_{sc}$  sebesar  $20,37 \text{ mA/cm}^2$ . Sedikit di bawah nanopartikel Ag. Nilai ini terus naik ketika ukuran nanopartikel bertambah. Didapatkan nilai  $J_{sc}$  tertingginya ketika nanopartikel Ag berukuran 60 nm yaitu  $23,30 \text{ mA/cm}^2$ . Nilai peningkatan  $J_{sc}$  paling rendah didapatkan pada nanopartikel Al. Nilai  $J_{sc}$  ketika nanopartikel Al berukuran 40 nm adalah sebesar  $20,15 \text{ mA/cm}^2$ . Sama seperti pada sel surya dengan penambahan nanopartikel Ag dan Al, nilai  $J_{sc}$  juga meningkat seiring bertambahnya diameter

nanopartikel. Didapatkan nilai  $J_{sc}$  tertinggi ketika ukuran nanopartikel Al sebesar 60 nm yaitu 22,84 mA/cm<sup>2</sup>. Peningkatan nilai  $J_{sc}$  ketika ukuran nanopartikel bertambah dapat dijelaskan karena peningkatan luas tampang lintang hamburan nanopartikel ketika diameternya bertambah. Kenaikan luas penampang hambur ini menyebabkan refleksi cahaya ke lapisan aktif oleh nanopartikel sehingga lebih banyak cahaya yang diserap.



**Gambar 4** Sebaran medan listrik di sekitar dimer nanopartikel berbentuk bola ( $d=60$  nm) untuk material: (a) Ag, (b) Au, dan (c) Al.

Ag memiliki peningkatan  $J_{sc}$  tertinggi diikuti oleh Au dan Al hal ini disebabkan oleh lebih kuatnya resonansi dan sebaran medan dekat oleh nanopartikel Ag. Distribusi medan dekat dapat memengaruhi nilai  $J_{sc}$ . Nanopartikel yang dapat membangkitkan medan dekat yang kuat dan terdistribusi merata dapat meningkatkan penyerapan cahaya di lapisan aktif. Distribusi medan dekat pada sel surya dapat dilihat pada Gambar 4. Ag memiliki distribusi medan dekat yang merata dan sangat kuat di beberapa bagian seperti pada celah antara nanopartikel. Peningkatan sangat kuat di antara celah nanopartikel ini dinamakan efek *inter-coupling* akibat interferensi antar nanopartikel.

#### IV. KESIMPULAN

Arus hubung pendek,  $J_{sc}$ , sel surya CIGS meningkat dengan penambahan nanopartikel pada lapisan *back surface*. Secara umum nilai  $J_{sc}$  meningkat seiring bertambahnya ukuran nanopartikel. Peningkatan nilai  $J_{sc}$  dipengaruhi oleh luas area yang menghadap lapisan aktif sehingga didapatkan bentuk paling bagus adalah nanopartikel kubus. Aluminium menjadi material yang paling bagus untuk meningkatkan nilai  $J_{sc}$  kecuali untuk bentuk bola. Didapatkan nilai  $J_{sc}$  tertinggi sebesar 26,2336 mA/cm<sup>2</sup> untuk nanopartikel aluminium silinder dengan ukuran 60 nm. Nilai ini naik signifikan dibandingkan sel surya tanpa nanopartikel yaitu sebesar 19,6 mA/cm<sup>2</sup>. Hasil yang didapatkan menunjukkan potensi penambahan nanopartikel dimer untuk meningkatkan efisiensi sel surya CIGS.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aguiar, O., Castro, S. d., Godoy, M. P. F., & Dias, M. R. S. (2019). Optoelectronic characterization of Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>O thin films as an alternative to photonic crystals in organic solar cells. *Opt. Mater. Express*, 9, 3638-3648, <https://doi.org/10.1364/OME.9.003638>
- Ali, L. S., & Abdullah, A. K. (2012). Computer Simulation of The Effect of Band Cap Grading of The Cigs Absorber Layer on The Performance of Cds/Cigs Thin Film Solar Cell *Al-Rafadain Engineering Journal*, 20(3), 44-55.
- Amalathas, A. P., & Alkaisi, M. M. (2019). Nanostructures for Light Trapping in Thin Film Solar Cells. *Micromachines* 10(9), 619, <https://doi.org/10.3390/mi10090619>

- Atorf, B., Mühlenbernd, H., Muldarisnur, M., Zentgraf, T., & Kitzerow, H. (2014). Effect of Alignment on a Liquid Crystal/Split-Ring Resonator Metasurface. *ChemPhysChem*, 15(7), 1470-1476, <https://doi.org/10.1002/cphc.201301069>
- Barman, B., & Kalita, P. K. (2021). Influence of back surface field layer on enhancing the efficiency of CIGS solar cell. *Solar Energy*, 216, 329-337, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.032>
- Boukourt, N. E. I., Patanè, S., Hadri, B., & Crupi, G. (2023). Graded Bandgap Ultrathin CIGS Solar Cells. *Electronics*, 12(2), 393, <https://doi.org/10.3390/electronics12020393>
- Ciddor, P. E. (1996). Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Appl. Opt.*, 35, 1566-1573, <https://doi.org/10.1364/AO.35.001566>
- Cousse, J. (2021). Still in love with solar energy? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111107, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111107>
- Fahendri, F., Perdana, I., Abdullah, Z., & Muldarisnur, M. (2022). Enhancement of Light Absorption in the Active Layer of Organic Solar Cells using Ag:SiO<sub>2</sub> Core-Shell Nanoparticles *JPPIPA*, 8(6)<https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i6.2393>
- Gezgin, S. Y. ğ. t., & Kılıç, H. Ş. (2020). An improvement on the conversion efficiency of Si/CZTS solar cells by LSPR effect of embedded plasmonic Au nanoparticles. *Optical Materials*, 101, 109760, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109760>
- Jošt, M., Köhnen, E., Al-Ashouri, A., Bertram, T., Tomšič, Š., Magomedov, A., Kasparavicius, E., Kodalle, T., Lipovšek, B., Getautis, V., Schlatmann, R., Kaufmann, C. A., Albrecht, S., & Topič, M. (2022). Perovskite/CIGS Tandem Solar Cells: From Certified 24.2% toward 30% and Beyond. *ACS Energy Lett.*, 7(4), 1298–1307, <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c00274>
- Kaelin, M., Rudmann, D., & Tiwari, A. N. (2004). Low cost processing of CIGS thin film solar cells. *Solar Energy*, 77(6), 749-756, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.015>
- Kovacic, M., Krc, J., Lipovsek, B., Chen, W.-C., Edoff, M., Bolt, P. J., Deelen, J. v., Zhukova, M., Lontchi, J., Flandre, D., Salomé, P., & Topic, M. (2019). Light management design in ultra-thin chalcopyrite photovoltaic devices by employing optical modelling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 109933, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109933>
- Licht, C., Peiró, L. T., & Villalba, G. (2015). Global Substance Flow Analysis of Gallium, Germanium, and Indium: Quantification of Extraction, Uses, and Dissipative Losses within their Anthropogenic Cycles. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 890-903, <https://doi.org/10.1111/jiec.12287>
- Loubat, A., Eypert, C., Mollica, F., Bouttemy, M., Naghavi, N., Lincot, D., & Etcheberry, A. (2017). Optical properties of ultrathin CIGS films studied by spectroscopic ellipsometry assisted by chemical engineering. *Applied Surface Science*, 421, 643-650, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.037>
- McPeak, K. M., Jayanti, S. V., Kress, S. J. P., Meyer, S., Iotti, S., Rossinelli, A., & Norris, D. J. (2015). Plasmonic Films Can Easily Be Better: Rules and Recipes. *ACS Photonics*, 2(3), 326–333, <https://doi.org/10.1021/ph5004237>
- Mirzaei, M., Hasanzadeh, J., & Ziabari, A. A. (2020). Efficiency Enhancement of CZTS Solar Cells Using Al Plasmonic Nanoparticles: The Effect of Size and Period of Nanoparticles. *Journal of Electronic Materials*, 49(12), 7168–7178, <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08524-w>
- Muldarisnur, M., Fahendri, F., Perdana, I., Abdullah, Z., & Yusfi, M. (2023). Light absorption enhancement in organic solar cell using non-concentric Ag:SiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles. *Communications in Science and Technology*, 8(1), 50–56, <https://doi.org/10.21924/cst.8.1.2023.1076>
- Ninomiya, S., & Adachi, S. (1995). Optical properties of wurtzite CdS. *J. Appl. Phys.*, 78, 1183-1190, <https://doi.org/10.1063/1.360355>
- Ouédraogo, S., Zougmore, F., & Ndjaka, J. M. (2013). Numerical Analysis of Copper-Indium-Gallium-Diselenide-Based Solar Cells by SCAPS-1D. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 1-9, <https://doi.org/10.1155/2013/421076>

- Perdana, I., & Muldarisnur, M. (2020). Pengaruh Variasi Periodisitas Nanopartikel Ag-SiO<sub>2</sub> terhadap Peningkatan Absorpsi Cahaya Matahari pada Sel Surya Organik. *Jurnal Fisika Unand*, 9(2), 202-208, <https://doi.org/10.25077/jfu.9.2.202-208.2020>
- Rosenblatt, G., Simkhovich, B., Bartal, G., & Orenstein, M. (2020). Nonmodal Plasmonics: Controlling the Forced Optical Response of Nanostructures. *Phys. Rev. X*, 10(1), 011071, <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.10.011071>
- Royanian, S., Ziabari, A. A., & Yousefi, R. (2020). Efficiency Enhancement of Ultra-thin CIGS Solar Cells Using Bandgap Grading and Embedding Au Plasmonic Nanoparticles. *Plasmonics*, 15, 1173–1182, <https://doi.org/10.1007/s11468-020-01138-2>
- Sim, J.-K., Um, D.-Y., Kim, J.-W., Kim, J.-S., Jeong, K.-U., & Lee, C.-R. (2019). Improvement in the performance of CIGS solar cells by introducing GaN nanowires on the absorber layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 779, 643-647, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.297>
- Sobhani, F., Heidarzadeh, H., & Bahador, H. (2020). Efficiency enhancement of an ultra-thin film silicon solar cell using conical-shaped nanoparticles: similar to superposition (top, middle, and bottom). *Opt. Quant. Electron.*, 52(9), 387, <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02487-2>
- Sui, F., Pan, M., Wang, Z., Chen, M., Li, W., Shao, Y., Li, W., & Yang, C. (2020). Quantum yield enhancement of Mn-doped CsPbCl<sub>3</sub> perovskite nanocrystals as luminescent down-shifting layer for CIGS solar cells. *Solar Energy*, 206, 473-478, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.070>
- Treharne, R. E., Seymour-Pierce, A., Durose, K., Hutchings, K., Roncallo, S., & Lane, D. (2011). Optical design and fabrication of fully sputtered CdTe/CdS solar cells. *J. Phys: Conf. Ser.* 286, 012038, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/286/1/012038>
- Werner, W. S. M., Glantschnig, K., & Ambrosch-Draxl, C. (2009). Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals. *J. Phys Chem Ref. Data*, 38, 1013-1092, <https://doi.org/10.1063/1.3243762>
- Wu, Y., Zhang, C., Estakhri, N. M., Zhao, Y., Kim, J., Zhang, M., Liu, X.-X., Pribil, G. K., Alù, A., Shih, C.-K., & Li, X. (2014). Intrinsic Optical Properties and Enhanced Plasmonic Response of Epitaxial Silver. *Adv. Mater.*, 26(35), 6106-6110, <https://doi.org/10.1002/adma.201401474>
- Yassin, H. M., El-Batawy, Y. M., & Soliman, E. A. (2023). Enhancement of plasmonic photovoltaics with pyramidal nanoparticles. *Appl. Opt.*, 62, 1961-1969, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2226576/v1>
- Zarerasouli, P., Bahador, H., & Heidarzadeh, H. (2022). Performance improvement of an ultra-thin film solar cell based on optimized CIGS (Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)Se<sub>2</sub>) using appropriate plasmonic nanoparticles. *Optical Materials*, 131, 112729, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112729>
- Zarerasouli, P., Bahador, H., & Heidarzadeh, H. (2023). Design of an efficient ultra-thin film Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cell, using plasmonic cluster back reflectors. *Solar Energy*, 261, 1-6, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.06.001>
- Ziabari, A. A., Royanian, S., Yousefi, R., & Ghoreishi, S. (2020). Performance Improvement of Ultrathin CIGS Solar Cells Using Al Plasmonic Nanoparticles: The Effect of the Position of Nanoparticles. *Journal of Optoelectrical Nanostructures*, 5(4), 17-32.