

Pengaruh Variasi Periodisitas Nanopartikel Ag-SiO₂ terhadap Peningkatan Absorpsi Cahaya Matahari pada Sel Surya Organik

Ilham Perdana AT*, Muldarisnur

Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas
Kampus UNAND Limau Manis, Padang 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 6 Januari 2020
Direvisi: 12 Januari 2020
Diterima: 17 Januari 2020

Kata kunci:

OSC
FEM
nanopartikel *core-shell* Ag-SiO₂
plasmon

Keywords:

OSC
FEM
core-shell Ag-SiO₂ nanoparticles
plasmon

Penulis Korespondensi:

Ilham Perdana AT
Email: hamperdana@gmail.com

ABSTRAK

Telah dilakukan perhitungan numerik peningkatan absorpsi pada Sel Surya Organik (OSC) dengan penambahan nanopartikel *core-shell* Ag-SiO₂ yang ditempatkan 1 nm di atas lapisan *Indium Tin Oxide* (ITO). Investigasi ini bertujuan untuk melihat pengaruh variasi besar periodisitas nanopartikel terhadap peningkatan absorpsi pada lapisan aktif sel surya organik. Perhitungan dilakukan menggunakan Metode Element Hingga (FEM). Besar periodisitas divariasikan pada rentang 60 – 300 nm dengan peningkatan periodisitas sebesar 20 nm. Hasil yang didapatkan menunjukkan periodisitas nanopartikel mempengaruhi nilai peningkatan absorpsi dengan hubungan yang tidak linear. Nilai peningkatan absorpsi optimum terjadi pada periodisitas 200 nm yaitu sebesar 77,9%. Peningkatan absorpsi optimum didapatkan dari kompetisi nilai hamburan medan jauh dan resonansi medan dekat sebagai akibat dari fenomena *plasmon*.

Calculation of absorption enhancement in Organic Solar Cells (OSC) with embedded core-shell Ag-SiO₂ nanoparticles which are placed 1 nm on top Indium Tin Oxide (ITO) layer has been done numerically. In this study, the investigation was gained to understand impact of varied nanoparticle periodicity. The calculation was carried out by using Finite Element Method (FEM). The periodicity was varied ranging 60 – 300 nm with which periodicity increasement is 20 nm. The results show that the periodicity affect the absorption enhancement nonlinearly. Optimum absorption Enhancement was gained in periodicity 200 nm which is 77.9%. The absorption enhancement was obtained by the competition of far-field scattering and near-field resonance which is an effect of plasmon.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global meningkat pesat dalam beberapa dekade terakhir seiring bertambahnya jumlah penduduk, industrialisasi, dan perubahan gaya hidup. Sebesar 85,5% energi dunia dipasok oleh bahan bakar fosil sehingga dibutuhkan sumber energi yang terbarukan dan ramah lingkungan (Ediger, 2019). Jika dilihat dari sumber daya yang dimiliki, energi Matahari merupakan yang terbesar dibandingkan sumber energi lainnya. Potensi ketersediaan sumber daya energi Matahari sekitar 23.000 TW dibandingkan dengan panas Bumi 0,3 - 4 TW, angin 25 -75 TW, gelombang laut 0,2 - 2 TW, air 3 - 4 TW, dan biomassa 2 - 6 TW (Perez, 2015). Penggunaan sel surya juga dapat menjadi solusi terhadap masalah perubahan iklim tidak menghasilkan emisi karbon pada penggunaannya (Catchpole dan Polman, 2008).

Energi radiasi Matahari yang diterima tiap harinya diperkirakan sekitar $4,31 \times 10^{18} - 1,36 \times 10^{20}$ J yang artinya 1 hari energi matahari mampu memenuhi 0,5 hingga 9 hari kebutuhan dunia (Goldemberg, 2000). *Photovoltaic* adalah salah satu perangkat yang digunakan untuk mengubah energi Matahari menjadi listrik. Efisiensi *photovoltaic* atau sel surya masih rendah yaitu sekitar 27,6% untuk sel surya berbasis silikon dan 16,5% untuk sel surya organik (NREL, 2019). Oleh karena itu, perlu adanya peningkatan efisiensi sel surya terutama pada jenis sel surya organik (*Organic solar cell* (OSC) dikarenakan biaya fabrikasi yang jauh lebih murah dibandingkan dengan sel surya berbasis silikon (Gusak, 2014).

Efisiensi sel surya ditentukan oleh beberapa faktor yaitu absorptansi cahaya, laju produksi elektron dan *hole*, laju rekombinasi elektron-*hole*, dan resistansi parasitik pada kontak eksternal sel surya (Bush, 2012). Absorptansi menentukan laju produksi pasangan elektron dan *hole*. Sel surya hanya dapat berfungsi ketika laju produksi elektron dan *hole* lebih besar dari rekombinasi keduanya. Rendahnya absorptansi sel surya disebabkan oleh tingginya pemantulan kembali cahaya pada permukaan sel surya akibat indeks bias sel surya yang jauh lebih besar dibandingkan indeks bias medium datangnya cahaya yaitu udara (Alamdari, 2013).

Usaha peningkatan absorpsi secara numerik sudah dilakukan oleh N’Konou (2017) dengan menambahkan nanopartikel *metal*-dielektrik pada bagian lapisan aktif sel surya organik. Pengaruh penambahan nanopartikel perak yang dilapisi SiO₂ disusun secara paralel di atas lapisan *Indium Tin Oxide* (ITO) terhadap absorpsi sel surya organik disimulasikan menggunakan metode *Finite Different Time-Domain* (FDTD). Nanopartikel ini disebut juga sebagai *nanoantenna* karena berfungsi sebagai perangkat cahaya pada lapisan aktif sel surya. Pada penelitian N’Konou (2017), besar ketebalan lapisan SiO₂, ketebalan lapisan aktif, dan jenis bahan dielektrik, divariasikan nilainya. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan absorpsi hingga 27% dibandingkan dengan tanpa penambahan nanopartikel. Pada penelitian ini periodisitas nanopartikel tidak divariasikan sehingga pengaruh periodisitas nanopartikel terhadap peningkatan absorpsi belum diketahui. Oleh karena itu, investigasi lebih lanjut dibutuhkan untuk melihat pengaruh variasi periodisitas nanopartikel terhadap besar peningkatan absorpsi pada lapisan aktif sel surya organik.

Penelitian ini akan melanjutkan penelitian yang dilakukan N’Konou (2017), namun dengan metode dan variasi yang berbeda. Metode yang akan digunakan pada penelitian ini adalah metode elemen hingga (*finite element method* (FEM)). FEM dipilih karena diskritisasinya lebih mendekati geometri aslinya dibandingkan FDTD serta lebih general digunakan dalam berbagai fenomena fisika (Sumithra dan Thiripurasundari, 2017). Pada penelitian ini akan dilihat pengaruh periodisitas nanopartikel terhadap peningkatan absorpsi cahaya pada lapisan aktif sel surya organik.

II. METODE

Penelitian ini bersifat numerik dilakukan dengan membuat simulasi serta perhitungan peningkatan absorpsi sel surya secara komputasi. Penelitian ini memerlukan langkah kerja yang sistematis untuk menerangkan proses-proses fisika yang terjadi. Metode numerik yang digunakan pada penelitian ini adalah metode elemen hingga menggunakan program Comsol 5.4.

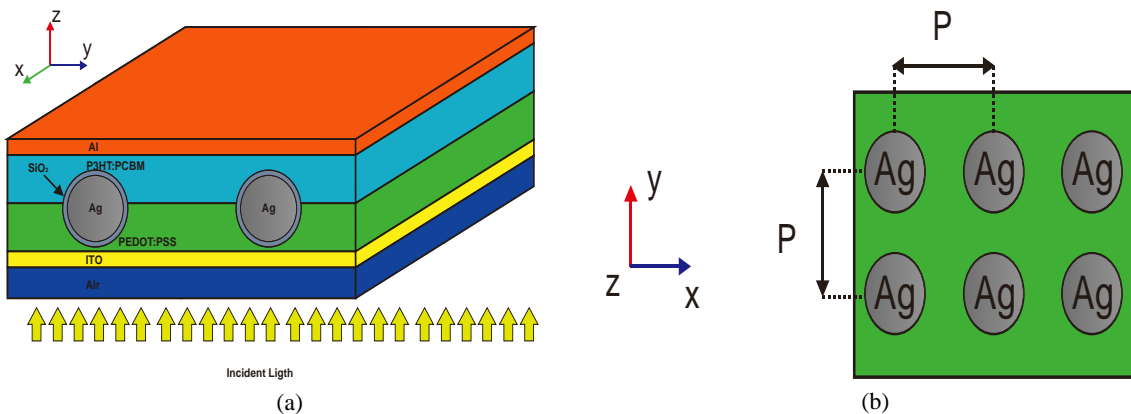
2.1 Pengumpulan data fisis

Sebelum pemodelan dibuat, data fisis seperti data indeks bias dan data spektrum radiasi Matahari dikumpulkan. Data indeks bias material penyusun sel surya diambil dari hasil penelitian

yang telah dilakukan pada laman <http://www.refractiveindex.info>. Data masing-masing indeks bias material yang digunakan seperti, data indeks bias udara diambil dari penelitian Ciddor (1996), data indeks bias ITO dari penelitian Konig dkk (2014), data indeks bias P3HT:PCBM dari penelitian Stelling dkk (2017), data indeks bias PEDOT:PSS dari peneliti Chen dkk (2015), data indeks bias perak dari penelitian Yang dkk (2015), data indeks bias SiO₂ dari penelitian Malitson (1965), dan data indeks bias aluminium dari penelitian Rakic (1995). Data spektrum radiasi matahari diambil dari hasil penelitian *the American Society for Testing and Material* (ASTM) pada laman <http://www.nrel.gov>. Spektrum radiasi yang digunakan pada penelitian ini adalah spektrum cahaya AM1,5 yang telah disepakati oleh industri pembuatan sel surya sebagai spektrum standar untuk pedoman pembuatan sel surya.

2.2 Pembuatan simulasi

Parameter simulasi dalam penelitian ini adalah periodisitas, ketebalan setiap lapisan penyusun sel surya organik, dan panjang gelombang cahaya. Periodisitas divariasikan pada rentang 60 - 300 nm dengan kenaikan nilai periodisitas adalah 20 nm. Ketebalan setiap lapisan penyusun sel surya dibuat sebagai berikut, lapisan ITO 40 nm, ketebalan lapisan P3HT:PCBM 50 nm, ketebalan lapisan PEDOT:PSS 20 nm, ketebalan Al 300 nm, ketebalan SiO₂ 2 nm, dan diameter nanopartikel logam 50 nm. Cahaya datang diasumsikan berada pada spektrum AM1,5 dengan panjang gelombang 350 nm – 700 nm. Tampilan simulasi sel surya organik diperlihatkan oleh Gambar 1a dan Gambar 1b.



Gambar 1 (a) Tampak samping susunan sel surya organik. (b) Tampak atas susunan sel surya organik

Setelah struktur sel surya dibuat, Perhitungan nilai daya yang hilang $L(\lambda)$ dilakukan menggunakan Persamaan (1)

$$L(\lambda) = \iiint -\nabla \cdot \mathbf{S}(x, y, z, \lambda) dx dy dz \quad (1)$$

dengan $\mathbf{S}(x, y, z, \lambda)$ adalah vektor pointing pada lapisan aktif sel surya organik. Selanjutnya, dengan memberikan nilai masukan daya $P_{\text{source}}(\lambda)$ pada simulasi ini, nilai absorpsi $A(\lambda)$ dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2)

$$A(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{P_{\text{source}}(\lambda)} \quad (2)$$

kemudian nilai peningkatan penyerapan AE dapat diketahui dengan Persamaan (3)

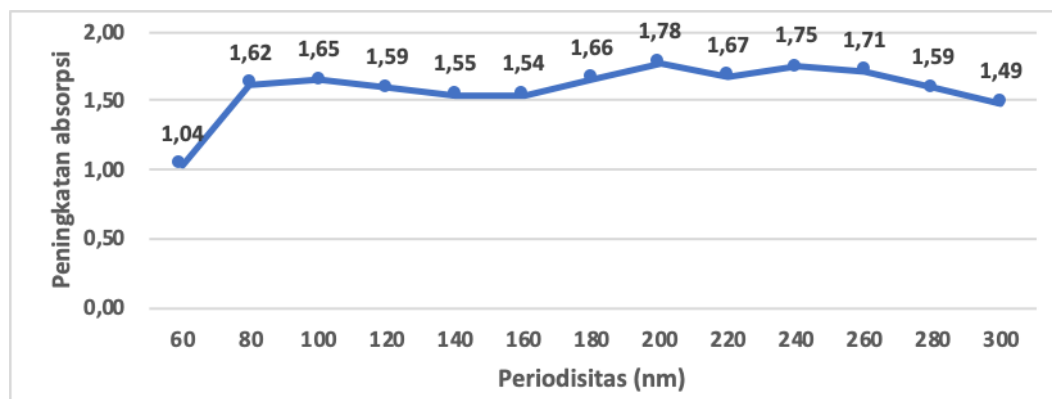
$$AE = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda / hc) A(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda / hc) A_0(\lambda) I(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

dimana $A_0(\lambda)$ adalah absorpsi cahaya tanpa penambahan nanopartikel dan $I(\lambda)$ adalah spektrum radiasi cahaya matahari yang didapatkan dari penelitian *the American Society for Testing and Material* (ASTM).

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Peningkatan absorpsi

Analisis peningkatan Absorpsi dilakukan untuk menentukan periodisitas optimum dalam peningkatan absorpsi cahaya. Nilai yang didapatkan berdasarkan dari pemodelan menggunakan Comsol 5.4, didapatkan plot grafik seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Grafik peningkatan absorpsi sebagai fungsi periodisitas

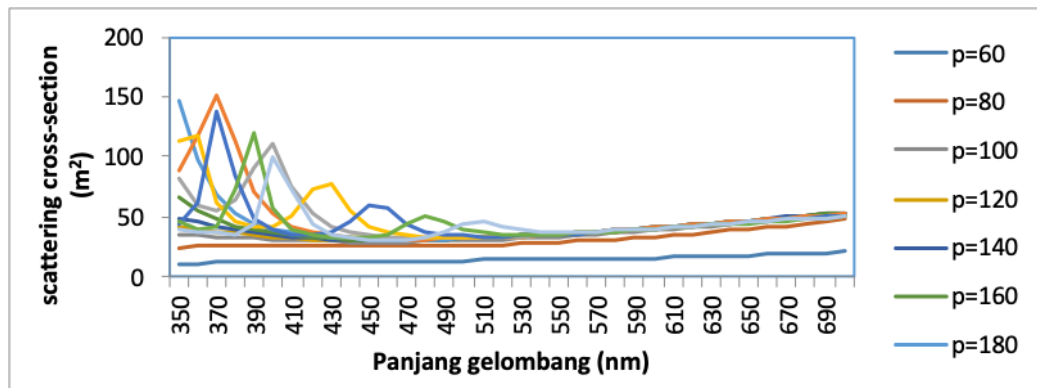
Peningkatan absorpsi pada periodisitas 60 nm adalah 3,6% dan pada periodisitas 300 nm adalah 48%. Peningkatan absorpsi relatif naik pada rentang periodisitas 60 - 300 nm meskipun peningkatan yang terjadi tidak monoton. Kenaikan nilai peningkatan absorpsi terbesar terjadi antara periodisitas 60 nm dan 80 nm yaitu 59%. Kenaikan ini dikarenakan peningkatan luas kurva *scattering cross section* yang diperlihatkan oleh Gambar 3. Sedangkan nilai peningkatan absorpsi maksimum terjadi pada periodisitas 200 nm, sesuai dengan nilai maksimum *scattering cross section* pada Gambar 3.

Kenaikan tidak monoton ini disebabkan oleh resonansi medan dekat yang menurun akibat memperbesar nilai periodisitas sedangkan hamburan medan jauh cenderung meningkat dengan memperbesar nilai periodisitas. pengaruh hamburan medan dekat juga dapat menurunkan penyerapan jika celah antar partikel sempit. Misalnya pada periodisitas 60 nm, celah antar partikel sekitar 6 nm, ini dapat menyebabkan cahaya yang datang pada lapisan aktif terpantul keluar dari lapisan aktif. Peristiwa ini dapat merugikan proses penyerapan cahaya tetapi menguntungkan dari segi resonansi medan dekat, sebab jarak antar partikel cukup dekat dan interaksi antar partikel cukup kuat sehingga menyebabkan dipol yang terbentuk meradiasikan energi radiasi yang lebih besar dibandingkan pada periodisitas lainnya.

Peningkatan absorpsi maksimum terjadi pada periodisitas 200 nm yaitu sebesar 77,9%. Celah bukaan yang tidak terlalu sempit dibandingkan periodisitas 60 nm akan menghamburkan cahaya ke dalam lapisan P3HT:PCBM. Sehingga diprediksi dari hamburan medan jauh meningkatkan penyerapan lebih signifikan dibandingkan dengan resonansi medan dekat. Absorpsi dapat mengalami peningkatan ataupun penurunan oleh hamburan medan jauh dan resonansi medan dekat. Sehingga, kenaikan nilai periodisitas nanopartikel tidak bersifat linear dengan peningkatan absorpsi cahaya.

3.2 *Scattering cross-section*

Penyerapan yang terjadi pada lapisan aktif juga dibantu oleh hamburan yang dihasilkan nanopartikel yang direpresentasikan dalam besaran *scattering cross-section*. Grafik *scattering cross-section* diperlihatkan pada Gambar 3 berikut



Gambar 3 Scattering cross-section fungsi panjang gelombang

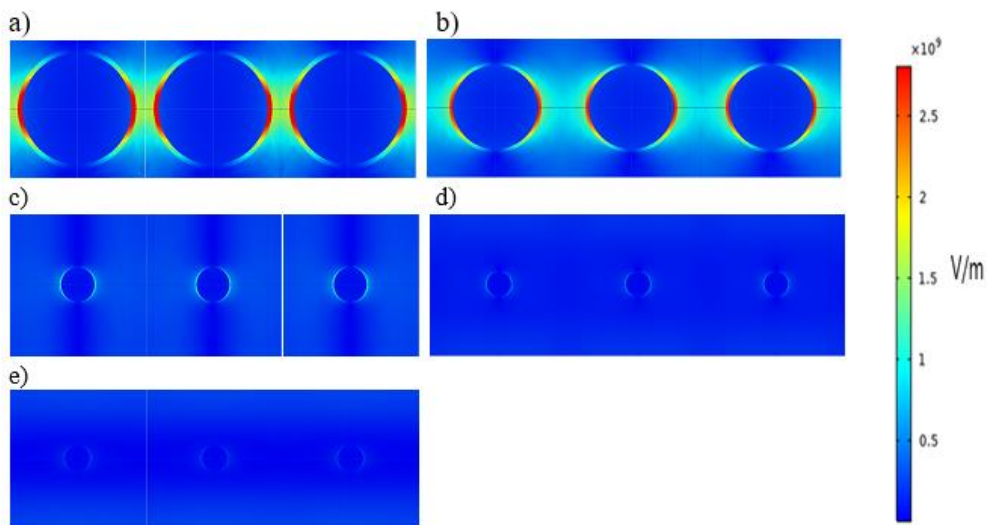
Hampir semua nilai *scattering cross section* optimum pada variasi periodisitas berada pada rentang 350 nm – 400 nm. Untuk kurva periodisitas 60 nm dan 80 nm memiliki nilai *scattering cross section* yang relatif rendah dibandingkan yang lainnya. Luas area di bawah grafik *scattering cross section* pada periodisitas 200 nm adalah salah satu yang paling lebar. Pada periodisitas kecil seperti 60 nm dan 80 nm, luas daerah di bawah kurva *scattering cross-section* relatif kecil. Sesuai dengan prediksi sebelumnya, peningkatan absorpsi untuk periodisitas 60 nm dan 80 nm lebih banyak diberikan oleh kontribusi peristiwa LSPR bukan oleh peristiwa hamburan medan jauh.

Pada periodisitas 200 nm luas daerah di bawah kurva *scattering cross-section* relatif lebar. Artinya proses hamburan pada periodisitas 200 nm juga berkontribusi besar dalam penyerapan cahaya. Akumulasi dari kontribusi resonansi *plasmon* dan hamburan ini yang menyebabkan nilai penyerapan maksimum pada periodisitas 200 nm.

Semakin tinggi dan lebar kurva *scattering cross section* terhadap panjang gelombang maka semakin besar peluang rentang panjang gelombang tersebut mengalami hamburan. Meskipun tidak ada kaitan secara langsung antara penyerapan pada lapisan aktif dengan hamburan yang dihasilkan oleh nanopartikel namun tetap memungkinkan dapat meningkatkan penyerapan pada lapisan aktif sel surya. Sehingga besarnya nilai *scattering cross-section* oleh permukaan nanopartikel logam adalah representasi dari kemungkinan panjang gelombang tersebut untuk menghambur dan memiliki OPL yang lebih panjang saat di dalam medium P3HT:PCBM.

3.3 Resonansi medan dekat

Analisis resonansi medan dekat untuk melihat pengaruh medan dekat terhadap penyerapan. Berikut adalah data distribusi medan di sekitar nanopartikel pada beberapa nilai periodisitas dengan panjang gelombang 350 nm, diperlihatkan oleh Gambar 4.



Gambar 4 Resonansi distribusi medan pada beberapa periodisitas (a) 60 nm, (b) 80 nm, (c) 200 nm, (d) 280 nm dan (e) 300 nm

Distribusi warna yang diberikan pada gambar adalah distribusi medan listrik. Pada periodisitas 60 nm, warna merah di sekitar nanopartikel lebih pekat. Pada peningkatan nilai periodisitas terlihat distribusi medan di sekitar nanopartikel mengecil. Ini memperlihatkan bahwa osilasi *plasmon* yang terjadi lebih kuat saat periodisitas semakin kecil. Alasannya karena semakin kecil jarak antar partikel akan mengakibatkan interaksi kuat antar partikel yang berdekatan. Ini juga menunjukkan bahwa pada periodisitas 60 nm resonansi medan dekat memiliki kontribusi besar dalam proses penyerapan.

Pada periodisitas 200 nm distribusi medan akibat osilasi *plasmon* lebih kecil dibandingkan pada periodisitas 60 nm atau 80 nm namun lebih besar dari periodisitas 280 nm dan 300 nm. Artinya kontribusi resonansi medan dekat pada periodisitas 200 nm lebih besar dibandingkan pada periodisitas 280 nm dan 300 nm. Diperkirakan ada kontribusi lain yang menyebabkan penyerapan pada periodisitas 200 nm maksimum yaitu proses hamburan yang akan dibahas pada poin selanjutnya.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan data yang didapatkan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan dari penelitian ini yaitu penambahan nanopartikel perak dapat meningkatkan penyerapan optik pada lapisan aktif sel surya. penyerapan optik meningkat pada rentang panjang gelombang cahaya ungu. Peristiwa hamburan oleh nanopartikel dapat meningkatkan penyerapan pada lapisan P3HT:PCBM akibat bertambahnya panjang lintasa optik (OPL) cahaya.

Berdasarkan hasil simulasi yang didapatkan, model paling efisien untuk fabrikasi sel surya organik adalah dengan penambahan nanopartikel Ag-SiO₂ dengan periodisitas 200 nm. Nilai peningkatan penyerapan maksimum dalam tinjauan ini adalah 77,9%. Peningkatan Absorpsi terjadi dari akumulasi kontribusi hamburan medan jauh dan resonansi medan dekat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abass, A., Le, K.Q., Andrea, A., Burgelman, M., dan Maes, B., Dual-Interface Gratings for Broadband Absorption Enhancement in Thin-Film Solar Cells, *Physical Review B*, 85(115449), 1-7 (2012).
- Alamdari, N., E., "Mixed Plasmonic Nanoparticles for Enhanced-Performance Organic Solar Cells", *Tesis*, Concordia University, Canada, 2013.
- Bush, J., C., "Plasmonic Fluorescence Enhancement of Poly(3-Hexylthiophene) For Organic Solar Cell Applications", *Tesis*, Western Carolina University, 2012.
- Catchpole, K.R. dan Polman, A., "Plasmonic Solar Cells", *Material for Sustainable Energy*, 16(26), OSA, 2010.
- Chen, C. W., Hsio, S. Y., Chen, C. Y., Kang, H. W., Huang, Z. Y., dan Lin, H. W., "Optical Properties of Organometal Halide Perovskite Thin Films and General Device Structure Design Rules for Perovskite Single and Tandem Solar Cells", *Journal of Material Chemistry*, 3(17), 9152-9159 (2015).
- Ciddor, P. H., "Refractive Index of Air: New Equations for The Visible and Near Infrared", *Applied Optics*, 35(9), 1566-1573 (1996).
- Ediger, V.S., "An Integrated Review and Analysis of Multi-Energy Transition from Fossil Fuels to Renewables", *International conference on power and energy systems engineering*, diedit oleh Bowlus, J. V., (Kadir Has University, Turkey, 2019). 2-6.
- Goldemberg, J., *Energy and The Challenge of Sustainability*, (United Nations Development Programme, New York, 2000).
- Gusak, V., "Nanoplasmonic for Solar Cells", *Tesis*, Chalmer University of Technology, Goteborg, 2014.
- Konig, T. A. F., Ledin, P. A., Kerszulis, J., Mahmoud, M. A., El Sayed, M. A., dan John, R., "Electrically Tunable Plasmonic Behavior of Nanocube-Polymer Nanomaterials", 2014.
- N'Konou, K., Peres, L. dan Torchio, P., "Optical Absorption Modeling of Plasmonic Organic Solar Cells Embedding Silica-Coated Silver Nanospheres", (Crossmark, Springer Science, 2018).

- Perez, M. dan Perez, R., "A Fundamental Look at Supply Side Energy Reserves for The Planet", *IEA-SHCP-Newsletter*, 62, 4-6 (2015).
- Rakic, A. D., "Algorithm for The Determination of Intrinsic Optical Constants of Metal Films: Application to Aluminium", *Applied Optics*, 34(22), 4755-4767 (1995).
- Stelling, C., Singh, R. C., Karg, M., Konig, T. A. F., Thelakkat, M., dan Retsch, M., "Plasmonic Nanomeshes: Their Ambivalent Role as Transparent Electrodes in Organic Solar Cells", *Scientific Reports*, 7(42530), 1-13 (2017).
- Sumithra, P., dan Thiripurasundari, D., "A review on Computational Electromagnetics Methods", *Advanced Electromagnetics*, 6(1), VIT University, 42 – 55 (2017).
- Yang, H. U., D'Archangel, J., Sundheimer, M. L., Tucker, E., Boreman, G. D., dan Raschke, M. B., "Optical Dielectric Function of Silver, *Physical Review B* 91", 23(235137), 1-11 (2015).
- The National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019, Best Research-Cell Efficiencies, <http://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, diakses Juli 2019.