Analisis Efisiensi Sel Surya Berbahan CIGS: Pendekatan Teoritis dengan Fokus pada Densitas Arus Hubung Singkat dan Tegangan Rangkaian Terbuka

Bambang Mulyo Raharjo1\*

*Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa*

*Kalibaru Timur Kel. Kalibaru Medan Satria Kota Bekasi*

*Email: bambang.mulyo@sttdb.ac.id*

**Abstrak –** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kinerja sel surya berbasis bahan *Copper Indium Gallium Diselenide* (CIGS) secara teoritis. Metode pendekatan teoritis digunakan untuk menginvestigasi efisiensi sel surya dengan mempertimbangkan densitas arus hubung singkat (*Jsc*) dan tegangan rangkaian terbuka (*Voc*). Berbagai nilai energi celah pita (*Eg*) CIGS dievaluasi untuk memahami dampaknya terhadap efisiensi sel surya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa efisiensi sel surya CIGS dipengaruhi secara signifikan oleh variasi *Eg*, dengan adanya korelasi yang kompleks antara, *Jsc*, *Voc*, dan efisiensi. Studi ini dimaksudkan untuk menambah wawasan di dalam pengembangan dan optimasi sel surya berbasis CIGS dengan potensi aplikasi di industri fotovoltaik.

**Kata kunci** – Sel surya CIGS, energi celah pita, densitas arus hubung-singkat, tegangan rangkaian-terbuka, efisiensi sel surya.

**Pendahuluan**

Dalam Sel surya berbasis bahan *Copper Indium Gallium Diselenide* (CIGS) telah menarik perhatian luas dalam bidang fotovoltaik karena memiliki potensi untuk mencapai efisiensi yang tinggi dan biaya produksi yang relatif rendah. Kinerja sel surya CIGS yang memadai terutama disebabkan oleh kombinasi unik dari sifat-sifat material CIGS, dengan variasi komposisi unsur kimia pembentuknya yang akan memberikan rentang energi celah pita yang optimal, koefisien absorpsi yang tinggi, dan kemampuan pembawa muatan yang baik. Berbagai penelitian teoritis dan eksperimental telah dilakukan untuk memahami karakteristik optoelektronik dan kinerja konversi energi sel surya CIGS.

Studi oleh Jackson et al. [1] mencatat peningkatan efisiensi sel surya CIGS hingga lebih dari 20%, yang dianggap sebagai pencapaian signifikan dalam industri fotovoltaik. Penelitian ini menyoroti pentingnya karakterisasi material dan teknik fabrikasi yang tepat dalam meningkatkan kinerja sel surya CIGS. Selain itu, penelitian terbaru oleh Powalla et al. [2] dan Gloeckler et al. [3] memberikan wawasan mendalam tentang karakteristik material CIGS dan mobilitas pembawa muatan dalam struktur kristal polikristalin.

Meskipun demikian, pemahaman yang komprehensif tentang hubungan antara karakteristik material, seperti densitas arus hubung singkat (*Jsc*), tegangan rangkaian terbuka (*Voc*), dan efisiensi konversi energi, masih menjadi tantangan. Oleh karena itu, penelitian teoritis yang cermat diperlukan untuk menyelidiki berbagai faktor yang memengaruhi kinerja sel surya CIGS dan mengoptimalkan desain serta proses produksi.

Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki secara teoritis karakteristik kinerja sel surya CIGS dengan mempertimbangkan *Jsc*dan *Voc* sebagai parameter kunci. Dengan memanfaatkan pendekatan simulasi komputer, efisiensi sel surya CIGS akan dievaluasi untuk berbagai nilai *Eg*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi wawasan bagi pengembangan sel surya CIGS yang lebih efisien dan ekonomis.

**Studi literatur**

Studi literatur yang terkait dengan karakteristik sifat elektronik dan optik material CIGS dalam konteks aplikasi sel surya telah menjadi fokus utama dalam penelitian fotovoltaik. Berbagai rumus dan konsep telah dikembangkan untuk menggambarkan interaksi antara radiasi matahari, struktur material CIGS, dan kinerja sel surya. Dalam penelitian ini, beberapa rumus kunci yang relevan akan dijelaskan untuk memahami pengaruh spectral irradiance, celah pita energi, densitas arus hubung singkat, tegangan rangkaian terbuka, dan efisiensi sel surya.

***Absorpsi Sinar Matahari (α)***

Koefisien absorpsi, α, merupakan ukuran dari seberapa baik material menyerap radiasi matahari pada berbagai panjang gelombang. Hubungan antara koefisien absorpsi dan energi foton, E, dapat dinyatakan oleh hukum Beer-Lambert [4]:

Dimana α(λ) adalah koefisien absorpsi sebagai fungsi dari panjang gelombang spektral cahaya matahari λ, *k* konstanta, *Eg* celah pita energi materal sel surya, *m\** massa efektif pembawa muatan, *h* konstanta Planck, dan *c* adalah kecepatan cahaya. Rumus ini menghubungkan koefisien serapan dengan energi celah pita dan panjang gelombang cahaya. Penting untuk dicatat bahwa rumus ini merupakan penyederhanaan dan mungkin tidak sepenuhnya mencakup semua kompleksitas penyerapan pada bahan nyata.

***Densitas Arus Hubung Singkat (Jsc)***

Densitas arus hubung singkat, Jsc, merupakan arus listrik maksimum yang dapat dikeluarkan oleh sel surya ketika terhubung secara langsung ke sumber cahaya tanpa adanya tegangan pada terminal. Hubungan antara Jsc dan koefisien absorpsi, α, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [5,6]:

di mana *G*(*λ*) adalah spectral irradiance, *R*(*λ*) adalah reflektansi material, dan *q* adalah muatan elektron.

***Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)***

Tegangan rangkaian terbuka, *Voc*, adalah tegangan maksimum yang dapat dihasilkan oleh sel surya ketika tidak ada arus yang mengalir melalui sel. Hubungan antara Voc dan Jsc dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan Shockley-Queisser [7]:

di mana *k* adalah konstanta Boltzmann, *T* adalah suhu mutlak, dan *J*0​ adalah arus jenuh diode yang dapat dinyatakan sebagai [8]:

dimana *ni* adalah konsentrasi muatan intrinsik, *Dp* dan *Dn* adalah koefisien difusi *hole* dan elektron berturut-turut, *Lp* dan *Ln* adalah panjang jalur difusi *hole* dan elektron berturut-turut. Sedangkan *ni* dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

dimana *Nc* dan *Nv* masing-masing merupakan kepadatan efektif keadaan pada pita konduksi dan pita valensi.

***Efisiensi Sel Surya (η)***

Efisiensi sel surya, *η*, merupakan ukuran dari seberapa efektif sel surya dalam mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Hubungan antara *Jsc*, *Voc*, dan efisiensi sel surya dapat dinyatakan dengan rumus berikut [9]:

di mana *FF* adalah faktor isian (*fill factor*) dan *Pin*​ adalah daya masuk (*incident power*) dari radiasi matahari.

**Material dan metode**

Pada penelitian ini, kami menggunakan pendekatan teoritis dan metode simulasi komputer untuk menganalisis karakteristik kinerja sel surya berbasis CIGS. Berikut adalah detail mengenai spesifikasi dan data material yang digunakan untuk komputasi Matlab:

***Spesifikasi Material CIGS***

Rumus kimia dari *Copper Indium Gallium Diselenide* atau CIGS adalah (CuIn(1-x)Gax)Se2 dengan refractive index (*n*): 2.5, diode saturation current density (*J0*): 1.8e-5 A/m², dan *fill factor* (FF): 0.75 (asumsi nilai tipikal)

***Data Spektral Irradiance Matahari***

Dataset standar ASTM G173 atau setara rentang panjang gelombang: 280 nm hingga 4000 nm, resolusi tertentu, tergantung pada sumber data yang digunakan, spectral Irradiance dalam W/m2/nm

***Data Properti Optik CIGS***

Data koefisien absorpsi (α) sebagai fungsi panjang gelombang spektral berdasarkan perhitungan teoritis berdasarkan model elektronik dan struktur pita material CIGS

***Langkah simulasi Matlab***

1. **Inisialisasi Variabel dan Konstanta**: Tentukan semua variabel dan konstanta yang akan digunakan dalam perhitungan.
2. **Load Data**: Load data spektral irradiance matahari dan data properti optik CIGS dari file eksternal.
3. **Perhitungan Koefisien Absorpsi**: Hitung koefisien absorpsi (α) berdasarkan persamaan Beer-Lambert untuk setiap panjang gelombang spektral.
4. **Perhitungan Densitas Arus Hubung Singkat**: Lakukan iterasi untuk setiap panjang gelombang spektral untuk *Jsc* menggunakan persamaan yang diberikan.
5. **Perhitungan Tegangan Rangkaian Terbuka**: Lakukan iterasi untuk setiap *Eg* untuk menghitung tegangan rangkaian terbuka *Voc* menggunakan persamaan Shockley-Queisser.
6. **Perhitungan Efisiensi**: Hitung efisiensi sel surya menggunakan nilai *Jsc*, *Voc*, faktor isian (FF), dan daya masuk dari radiasi matahari.
7. **Plotting**: Plot grafik koefisien absorpsi, dan efisiensi sel surya terhadap nilai bandgap (Eg).
8. **Output**: Tampilkan hasil perhitungan, termasuk *Jsc*, *Voc*, dan efisiensi untuk setiap nilai *Eg*.

Dengan menggunakan data material dan metode analisis yang tepat, kami dapat mengevaluasi kinerja sel surya CIGS secara komprehensif dan memahami bagaimana variasi bandgap memengaruhi kinerja sel surya tersebut.Top of Form

**Hasil dan diskusi**

Dalam penelitian ini, pengaruh bandgap (*Eg*) terhadap karakteristik kinerja sel surya berbasis CIGS dianalisis. Pendekatan teoritis dan simulasi komputer digunakan untuk memahami bagaimana variasi *Eg* memengaruhi koefisien absorpsi, densitas arus hubung singkat (*Jsc*), tegangan rangkaian terbuka (*Voc*), dan akhirnya efisiensi sel surya.

Pertama, diperhatikan bahwa semakin besar nilai *Eg*, semakin baik cahaya matahari diserap oleh material CIGS. Hal ini didasarkan pada teori dasar bahwa semakin besar bandgap, semakin rendah energi minimum yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari ikatan atom, sehingga material lebih menyerap cahaya pada panjang gelombang yang lebih pendek. Sebagai hasilnya, koefisien absorpsi (*α*) meningkat dengan meningkatnya nilai *Eg*, yang tercermin dalam grafik koefisien absorpsi terhadap panjang gelombang spektral pada Gambar-1.



**Gambar-1** Koefisien absorpsi α(λ) sel surya CIGS sebagai fungsi dari panjang gelombang spektral cahaya matahari λ (nm).

Pada Gambar-2 diperlihatkan dikarenakan peningkatan koefisien absorpsi, *Jsc* sel surya juga meningkat. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa semakin banyak cahaya matahari yang diserap oleh material, semakin banyak elektron yang dihasilkan dan menghasilkan arus listrik saat terbentuk pasangan elektron-hole. Dengan demikian, semakin tinggi nilai *Eg*, semakin tinggi pula *Jsc*, yang terlihat dalam hasil simulasi.



**Gambar-2** Densitas arus hubung singkat *Jsc* dan tegangan sirkuit terbuka *Voc* sel surya CIGS sebagai fungsi dari celah pita energi *Eg*.

Selanjutnya, bahwa *Voc* juga meningkat seiring dengan peningkatan *Eg*. Hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan Shockley-Queisser, di mana Voc berkaitan secara logaritmik dengan *Jsc* dan arus jenuh diode (*J0*), yang juga dipengaruhi oleh *Eg*. Semakin besar nilai *Eg*, semakin besar pula *Voc*, karena meningkatnya bandgap menghasilkan penurunan *J0*.

Secara keseluruhan, peningkatan *Jsc* dan *Voc* yang dihasilkan oleh peningkatan *Eg* menyebabkan peningkatan efisiensi sel surya. Efisiensi (*η*) dapat dianggap sebagai produk dari *Jsc*, *Voc*, faktor isian (fill factor), dan daya masuk dari radiasi matahari. Oleh karena itu, semakin besar nilai *Eg*, semakin tinggi pula efisiensi sel surya CIGS sebagaimana diperlihatkan pada Gambar-3.



**Gambar-3** Efisiensi *η* sel surya CIGS sebagai fungsi dari celah pita energi *Eg*.

Hasil yang diperoleh dari analisis ini memberikan wawasan yang berharga terkait dengan pengaruh bandgap (*Eg*) terhadap kinerja sel surya berbasis CIGS. Penemuan bahwa peningkatan *Eg* meningkatkan koefisien absorpsi, *Jsc*, *Voc*, dan akhirnya efisiensi sel surya konsisten dengan teori dasar fotovoltaik. Namun, perlu dicatat bahwa selain meningkatkan efisiensi, peningkatan *Eg* juga dapat menyebabkan penurunan faktor isian (*fill factor*), yang dapat mengurangi kinerja sel surya secara keseluruhan. Oleh karena itu, dalam mempertimbangkan nilai *Eg* yang optimal, penting untuk mencari keseimbangan antara peningkatan absorpsi cahaya dan mempertahankan faktor isian yang tinggi. Selain itu, perbedaan dalam karakteristik kinerja sel surya berdasarkan variasi *Eg* menunjukkan kompleksitas dalam desain dan pengoptimalan sel surya CIGS. Penelitian lebih lanjut dalam hal ini dapat memberikan panduan yang lebih terperinci untuk pengembangan sel surya yang lebih efisien dan andal di masa depan.

**Kesimpulan**

Penelitian ini menyoroti pengaruh signifikan dari celah pita energi terhadap kinerja sel surya CIGS. Peningkatan celah pita energi meningkatkan koefisien absorpsi, densitas arus hubung singkat, dan tegangan rangkaian terbuka, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi sel surya. Namun, perlu dipertimbangkan keseimbangan antara peningkatan efisiensi dengan potensi penurunan faktor isian. Penelitian ini memberikan pandangan penting bagi pengembangan sel surya CIGS yang lebih efisien.

**Referensi**

1. P. Jackson et al., "New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se2 thin-film solar cells beyond 20%," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 19, no. 7, pp. 894-897, 2011.
2. M. Powalla et al., "Characterisation of chalcopyrite materials and solar cells," *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 7, pp. 2235-2241, 2009.
3. M. Gloeckler et al., "Electron and hole mobilities in polycrystalline CuInSe2 and CuGaSe2," *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 12, p. 123703, 2005.
4. Sze, S. M., & Kwok, K. N. (2006). Physics of Semiconductor Devices (3rd Edition). John Wiley & Sons.
5. A. Martí, L. Cuadra, and A. Luque, "Recent Advances in the Study of Chalcopyrite Semiconductors for Photovoltaic Applications," *Advanced Materials*, vol. 20, no. 1, pp. 54-59, 2008. [1]
6. Green, M. A. (2009). Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. Prentice Hall.
7. Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p‐n Junction Solar Cells. Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519.
8. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). Physics of Semiconductor Devices (3rd Edition). John Wiley & Sons.
9. R. Haight, J. Sites, and J. Nakade, "Recombination Mechanisms and Minority Carrier Lifetime in Polycrystalline Cu(In, Ga)Se2 Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 1, pp. 299-305, 2015.