

Metode Penentuan Parameter Kelistrikan Sel Surya Organik *Single Heterojunction*

Setianto^{1*}, Aswad H.S.¹, Kuwat T.², M.F. Rosyid²

¹Departemen Fisika-FMIPA, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Jatinangor KM. 21, Sumedang 45363

²Jurusan Fisika Universitas Gadjah Mada
Bulaksumur BLS 21, Yogyakarta 55281

Email : setianto@phys.unpad.ac.id

Abstrak - Telah dilakukan studi untuk menentukan parameter kelistrikan sel surya organik single heterojunction, yang meliputi hambatan seri (R_s) dan paralel (R_{sh}), rapat arus saturasi (J_s), rapat arus penyorotan (J_L) serta faktor idealitas dioda (n). Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan efisiensi konversi daya sel surya organik. Untuk maksud tersebut digunakan metoda kombinasi antara Levenberg- Marquadt, pengali Lagrange dan Newton-Rhapson (LMLNR). Metode ini merupakan metode regresi tak linier. Sehingga untuk mendapatkan efisiensi konversi daya diperlukan data pengukuran rapat arus-tegangan (J - V). Dari hasil kajian ini diperoleh bahwa nilai parameter kelistrikan R_s dan n masih jauh nilai dari ideal. Hal ini sebagai salah satu penyebab nilai efisiensi konversi daya sel surya organik menjadi rendah, yakni untuk yang berstruktur donor-akseptor-Ag (SDA-Ag) sebesar 0,86%.

Kata kunci : sel surya organik, donor, akseptor, efisiensi konversi daya, metode LMLNR

1. Pendahuluan

Melalui proses fotovoltaik, menggunakan peranti yang dinamakan sel surya (*solar cell*) konversi energi surya ke energi listrik terjadi secara langsung. Energi listrik surya telah dimanfaatkan di tempat terpencil dan mampu bersaing untuk pemakaian waktu yang lama. Sekarang ini, bahan-bahan aktif yang digunakan untuk pembuatan sel surya sebagian besar berasal dari bahan anorganik, seperti silikon (Si) Gallium-Arsenide(GaAs), Cadmium-Telluride(CdTe), dan Cadmium-Selenide(CdS). Efisiensi daya untuk sel surya ini bervariasi dari 8 – 29 % [1]. Tetapi sekarang ini terdapat kesulitan untuk menjual energi tersebut, sebab terlalu mahal.

Pendekatan lain adalah sel surya yang dibuat dari material yang seluruhnya baru, yaitu dari bahan organik seperti polimer dan molekul terkonjugasi. Material terkonjugasi adalah bahan organik yang terdiri dari ikatan tunggal-rangkap yang bertukar-tukar atau selang-seling. Pemilihan ini dikarenakan bahan organik lebih mudah dalam pembuatannya dan relatif lebih murah. Perkembangan peranti sel surya organik baru-baru ini mulai diarahkan pada riset tentang upaya meningkatkan efisiensi daya dan performansi bahan semikonduktor organik sebagai pilihan alternatif selain bahan semikonduktor anorganik yang sering digunakan.[1]

Keadaan optimal akan dicapai jika dalam aplikasinya memberikan nilai-nilai variabel seperti arus (I) dan tegangan (V) yang relevan. Selain itu memiliki efisiensi daya yang tinggi. Perkembangan terakhir penelitian sel surya organik, secara eksperimen telah mencapai efisiensi daya sekitar 4 %. [2]. Nilai efisiensi daya ini masih rendah dibandingkan dengan sel surya anorganik. Untuk memahami dan menjelaskan rendahnya efisiensi daya sel surya bahan organik tersebut, maka perlu dilakukan suatu penelitian tentang analisis numerik parameter sel surya organik single heterojunction. Manfaat yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini adalah : mengetahui beberapa parameter kelistrikan yang berpengaruh pada efisiensi daya sel surya organik single-heterojunction sebagai dasar untuk mengevaluasi dan memperbaiki kinerja sistem yang lebih baik, memberikan suatu metoda numerik baru yaitu kombinasi antara metode

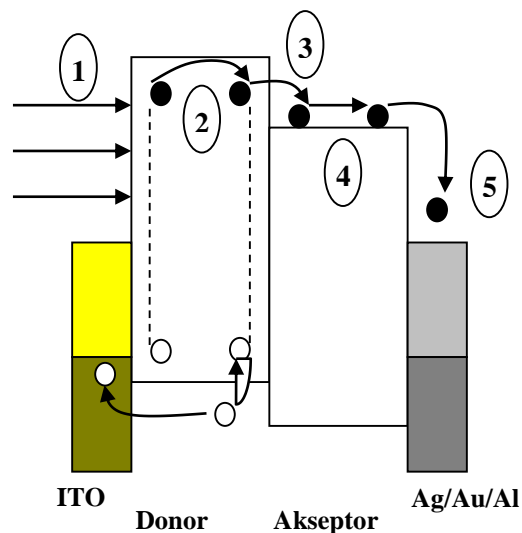
Levenberg-Marquadt, Pengali Lagrange dan Newton-Raphson untuk menghitung daya maksimum (P_{mak}) sel surya organik.

2. Sel Surya Organik

Sel surya organik biasanya terbuat dari lapisan tipis yang terbuat dari material organik yang berada diantara dua lapisan elektroda. Elektroda pertama (katoda) dibuat dari logam yang memiliki fungsi kerja yang rendah, sehingga dekat dengan tingkat energi LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) yang dioperasikan sebagai tempat masuknya elektron yang bergerak memasuki pita konduksi dari material organik. Elektroda yang kedua (anoda) memiliki fungsi kerja yang lebih tinggi sehingga dekat dengan tingkat energi HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) yang dioperasikan sebagai tempat masuknya hole yang bergerak memasuki pita valensi dari material organik. Lapisan yang sering digunakan sebagai anoda adalah Indium Tin Oxide (ITO) [Burroughess, 1990]. Sedangkan elektroda negatif (katoda) biasanya terbuat dari Aluminium (Al), Perak (Ag), Emas (Au) atau Calcium (Ca). Sel surya organik umumnya terdiri dari suatu lapisan aktif yang disisipkan pada substrat tertutup antara elektroda transparan dan elektroda logam. Ada beberapa macam struktur sel surya organik, yaitu : Sel Surya Lapisan Tunggal, Sel Surya Lapisan Ganda dan Sel Surya Blend

2.1. Mekanisme Konversi Energi Sel Surya Organik

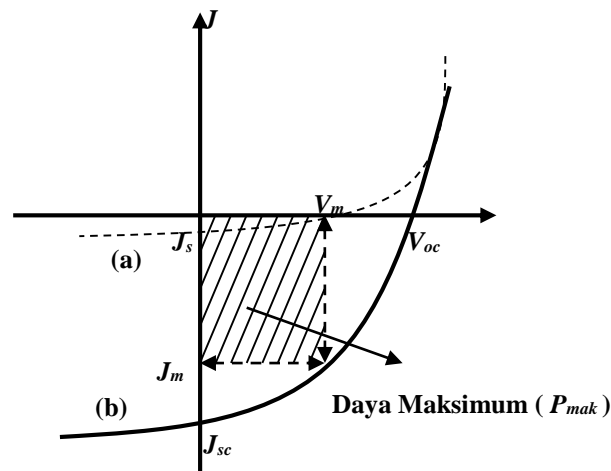
Mekanisme konversi energi dari cahaya ke listrik sel surya tersebut dijelaskan sebagai berikut [3]:



Gambar 1. Struktur sel surya organik jenis single-heterojunction

1. Penyerapan Foton. Sekitar 30 %.
2. Difusi Eksiton. Kemungkinannya terletak pada daerah dekat tepi material kedua yang jarak difusinya minimal sesuai dengan ketebalan lapisan. Jika tidak, eksiton akan berkombinasi kembali.
3. Pemisahan Muatan. Kemungkinan terjadinya terletak pada material semikonduktor organik atau elektroda logam.
4. Transportasi Muatan. Transportasi muatan ditimbulkan oleh kombinasi kembali muatan sepanjang perjalanan menuju elektroda jika material itu sebagai media transportasi baik oleh elektron maupun hole.
5. Pengumpulan Muatan. Elektroda logam kemungkinan juga telah membentuk kontak penghalang dengan material semikonduktor organik sedemikian rupa sehingga muatan tidak bisa langsung mencapai elektroda logam.

2.2. Karakteristik Sel Surya Organik



Gambar 2. Kurva karakteristik arus – tegangan sel surya ideal.

(a). Keadaan gelap (b). Keadaan disinari

Rapat arus kontak (J_{sc}) adalah arus yang muncul pada saat tegangannya nol, ini merupakan fungsi dari kekuatan penyinaran G . Muatan berjalan karena perbedaan potensial internal yang sepadan dengan V_{oc} . Tegangan rangkaian terbuka terukur ketika arus dalam sel surya adalah nol, dan hampir bersesuaian dengan pita valensi dan pita konduksi. Nilai J_m dan V_m ditentukan dalam rangka memaksimalkan daya. Ini merupakan daya maksimum (P_{mak}) yang dihasilkan oleh sel surya. Faktor isian (FF) adalah perbandingan daya maksimum terhadap arus kontak dan tegangan rangkaian terbuka :

$$FF = P_{mak} / J_{sc} \times V_{oc} \quad (1)$$

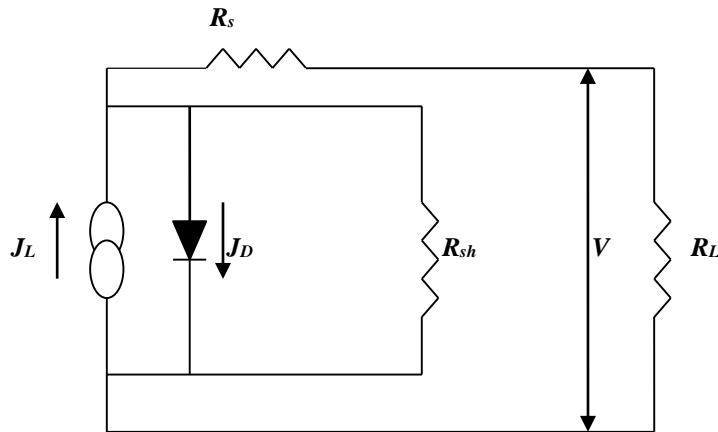
Efisiensi daya fotovoltaik (η) digambarkan sebagai perbandingan daya listrik maksimum terhadap kekuatan daya masukan dikalikan luas permukaan modul:

$$\eta = P_{max} / P_{in} \quad (2)$$

Hasil konversi ini merupakan parameter kunci produktivitas sel surya dan ini harus dievaluasi secara hati-hati.

3. Model Sel Surya Organik

Rangkaian setara sebuah sel surya riil ditunjukkan pada gambar 3 [4] :



Gambar. 3. Rangkaian penyetara sel surya riil.

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{V - JR_s}{nV_T}\right) - 1 \right) + \frac{(V - JR_s)}{R_{sh}} - J_L \quad (3)$$

dengan :

- J_L : rapat arus penyinaran (mA/cm^2)
- J_s : rapat arus dioda panjar mundur ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
- n : faktor ideal dioda, $n = 1 \dots 5$
- V_T : tegangan termal ; $V_T = 25,7\text{mV}$ pada suhu 25°C .
- k : konstanta Boltzmann $k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
- T : suhu mutlak; $[T] = \text{K}$ (Kelvin) $0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$
- e : muatan elektron; $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$
- R_s : hambatan seri (Ohm)
- R_{sh} : hambatan shunt (Ohm)

3.1. Penentuan Parameter Sel Surya (R_s , R_{sh} dan J_s)

Dengan menggunakan model sel surya riil yang telah diberikan pada bagian sebelumnya yaitu :

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{V - JR_s}{nV_T}\right) - 1 \right) + \frac{(V - JR_s)}{R_{sh}} - J_L \quad (4)$$

Penentuan parameter sel surya (R_s , R_{sh} dan J_s) dilakukan dengan cara mendiferensialkan persamaan (4) terhadap tegangan (dJ/dV) sehingga diperoleh:

$$R_s = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V_{OC}} - \frac{1}{\frac{J_s}{nV_t} e^{\frac{V_{OC}}{nV_t}}} \quad (5)$$

$$R_{sh} \approx \frac{dV}{dJ} \Big|_{J_{SC}} \quad (6)$$

$$J_s = \frac{J_{sc} \left(1 + \frac{1}{R_{sh}}\right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{e^{\frac{-J_{sc}R_s}{nV_t}} - e^{\frac{V_{oc}}{nV_t}}} \tag{7}$$

Persamaan daya diberikan sebagai :

$$P(J, V_a) = V.J = (V_a + JR_s).J \tag{8}$$

Dengan menggunakan metoda pengali Lagrange akan diperoleh persamaan untuk tegangan maksimum (V_m) :

$$-\frac{\left(\frac{V_m J_s}{nV_t} e^{\frac{V_m}{nV_t}} + \frac{V_m}{R_{sh}}\right)}{\left(1 + \frac{2R_s J_s}{nV_t} e^{\frac{V_m}{nV_t}} + \frac{2R_s}{R_{sh}}\right)} = J_s \left(e^{\frac{V_m}{nV_t}} - 1 \right) + \frac{V_m}{R_{sh}} - j_L \tag{9}$$

Persamaan (4) yang merupakan fungsi implisit akan menjadi fungsi eksplisit dan dituliskan sebagai :

$$J = \frac{J_s (e^{V/nV_t} - 1) + \frac{V}{R_{SH}} - J_L}{1 + \frac{R_s}{R_{SH}} + \frac{J_s R_s}{nV_t} e^{V/nV_t}} \tag{10}$$

Sedangkan untuk menghitung turunan-turunan dari fungsi eksplisit diatas terhadap koefisien-koefisien (J_s, R_s, R_{sh}, J_L dan n) akan digunakan bantuan komputer dengan menggunakan program *MAPLE* versi *V*. Menggunakan persamaan diatas, penentuan parameter-parameter model sel surya riil (J_s, R_s, R_{sh}, J_L dan n) dapat dilakukan dengan metode pencocokan kurva Levenberg-Marquardt dengan bentuk persamaan :

$$\delta = (Z^T Z + \lambda I)^{-1} Z^T g \tag{11}$$

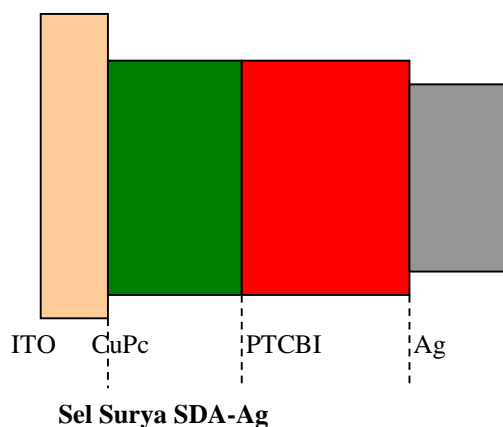
Dengan menggunakan metoda Newton-Rhapson yang ditulis sebagai berikut :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{12}$$

Persamaan (12) disebut rumus iterasi Newton-Rhapson yang menyatakan bahwa x_{n+1} dapat dicari dari x_n atau suatu titik dapat dicari dari titik sebelumnya. Pada penelitian ini, parameter-parameter sel surya organik (R_s, R_{sh}, J_s, J_L dan n) ditentukan dengan menggunakan metoda Levenberg-Marquardt, sehingga nilai V_m dan J_m yang berkaitan dengan daya maksimum sel surya seperti diungkapkan pada persamaan (10) atau (11) dapat ditentukan dengan metode Newton-Rhapson ini. Selanjutnya metode ini dinamakan dengan metode LMLNR

4. Hasil dan Pembahasan

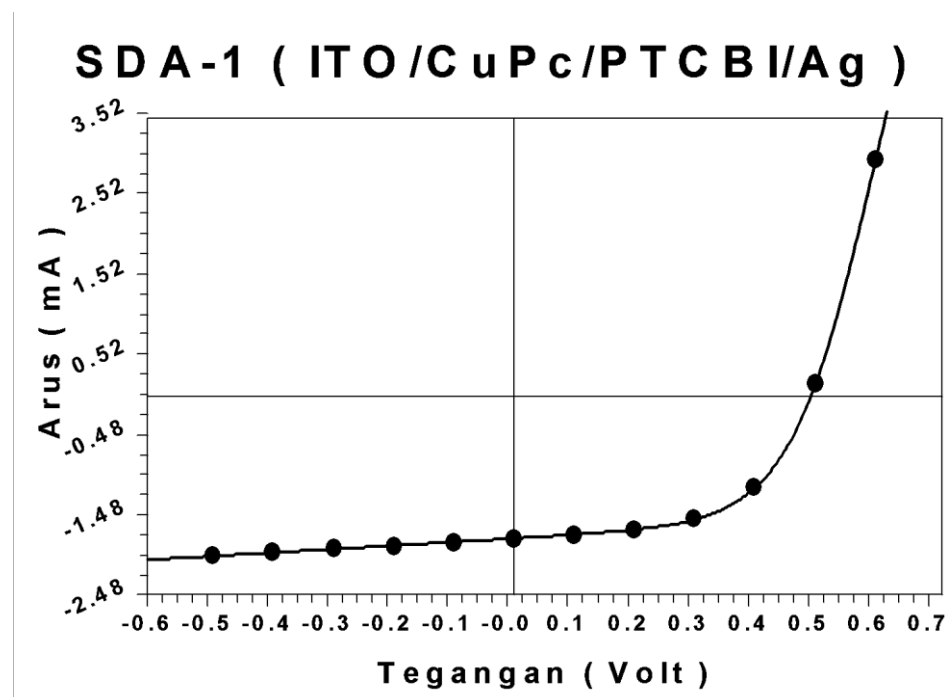
Struktur masing-masing sel surya diberikan pada gambar 4 :



Gambar 4. Struktur sel surya organik

Tabel 1. Hasil Perhitungan Parameter Sel Surya SDA-Ag secara Eksperimen, Analitik dan Numerik

Parameter	Eksperimen	Analitik	Numerik
V_{oc} (Volt)	0,49	-	0,492297
J_{sc} (mA/cm^2)	1,77	-	1,76829
R_s (Ohm)	48	7,6	9,5
R_{sh} (Ohm)	2203	2200	2322
J_s ($\square A/cm^2$)	-	1,419	1,1
N	-	-	2,6
J_L (mA/cm^2)	-	-	1,7758
FF	0,56	-	0,5948
Efisiensi Daya η (%)	0,81%	-	0,8633%

Gambar 5. Kurva J - V Sel Surya SDA-Ag

4.1. Pembahasan Sel Surya Organik SDA-Ag

Nilai parameter R_{sh} , R_s dan J_s secara analitik dan komputasi hampir mendekati kesamaan. Sedangkan untuk eksperimen nilai parameter R_s cukup besar disebabkan oleh faktor koreksi yang tidak digunakan dalam perhitungan. Secara grafis atau kurva pengukuran arus-tegangan, R_s dan R_{sh} menentukan kelengkungan kurva. Sedangkan dalam piranti sel surya, R_s akan mempengaruhi kinerja sel surya karena berkaitan erat dengan efisiensi daya. Sel Surya akan memiliki efisiensi daya yang tinggi jika nilai R_s kecil mendekati nol dan nilai R_{sh} sangat besar. Rapat arus saturasi J_s kedua sel surya cukup besar, hal ini disebabkan oleh besarnya parameter n (ideality factor). Idealnya nilai konstanta n mendekati 1. Dilihat dari efisiensi daya (η), sel surya SDA-Ag memiliki efisiensi sebesar 0.8633% dan 0.81% secara numerik dan eksperimen

5. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil perhitungan, dapat disimpulkan bahwa :

- Dengan menggunakan metoda numerik yang telah dikembangkan dalam penelitian ini (kombinasi antara Levenberg-Marquadt, Pengali Lagrange dan Newton-Rhapson) sel surya organik disebut sebagai metode LMLNR, parameter-parameter R_s , R_{sh} , J_s , J_L , n , FF sel surya organik dan efisiensi daya (η) yang berkaitan dengan kinerja sistem dapat ditentukan secara lengkap.
- Nilai parameter R_s , R_{sh} , J_s , J_L dan n untuk sel surya organik SDA-Ag (ITO/CuPc/PTCBI/Ag) adalah 9,5 Ohm ; 2322 Ohm ; 1,1 mA ; 1,77 mAdan 2,6 .Parameter-parameter tersebut menghasilkan faktor isian (FF) sebesar 0,59 dan efisiensi daya η sebesar 0,86 %.
- Sel surya organik SDA-Ag lebih baik dibandingkan SDA-Au karena memiliki parameter yang lebih baik sehingga efisiensi dayanya lebih besar yaitu untuk SDA-Ag sebesar 0,86 % dan SDA-Au sebesar 0,74 %. Rendahnya efisiensi daya sel surya organik ini dipengaruhi oleh besarnya nilai parameter R_s , J_s , dan n yang masih jauh dari keadaan sel surya ideal.
- Sel surya ideal adalah sel surya yang memiliki nilai parameter : R_s mendekati 0, R_{sh} sangat besar mendekati takhingga, J_s dalam orde 10^{-9} A – 10^{-12} A dan faktor ideal n mendekati 1.
- Nilai R_s secara eksperimen dan analitik mempunyai perbedaan yang cukup besar yaitu sebesar 48 Ohm sedangkan secara analitik sebesar 7,6 Ohm dan secara numerik 9,5 Ohm. Hal ini dikarenakan pada perhitungan secara eksperimen tidak menambahkan faktor koreksi seperti pada perhitungan secara analitik yaitu pada persamaan (III.4).

- f. Sel surya organik SDA-AI yang tersusun atas (ITO/PANI/PPV/AI) masih memiliki performansi yang rendah dibandingkan dengan SDA-Ag dan SDA-AI dikarenakan rendahnya nilai rapat arus penyinaran (J_L) yaitu sekitar $0,304 \mu A/cm^2$.

6. Saran

Dari hasil perhitungan yang telah diperoleh ini disarankan :

- a. Mengembangkan metode LMLNR ini untuk sel surya riil serial, yaitu dengan menambahkan dioda secara seri pada model. Hal ini berkaitan dengan sistem sel surya *double heterojunction*.
- b. Mengkaji lebih dalam lagi (secara mikroskopik) besaran-besaran apa saja yang terkandung di dalam parameter R_s , J_s dan n . Karena hal ini akan menghasilkan kinerja piranti sel surya organik yang layak pakai.
- c. Menggunakan alat ukur yang lebih teliti dan memadai untuk pengukuran data arus-tegangan ($I-V$) peranti sel surya SDA-AI.

Daftar Pustaka

- [1]. Jeroen van Duren. 2004. *Polymer : Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells.*, Technische Universiteit Eindhoven
- [2]. Brabec C. J., Sariciftci N.S., Hummelen J.C., 2001. *Advanced Functional Materials*, 11-15.
- [3]. Kuwat Triyana. 2004. *Heterojunction Organic Photovoltaic Devices Based On Phthalocyaninine and Perylene*. Dissertation, Graduate School of Engineering Science Kyushu University
- [4]. Gow J. A., Manning C. D. 1999. Development Of A Photovoltaic Array Model For Use In Power-Electronics Simulation Studies. *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, pp. 193-200.