



## Ekstraksi Parameter Elektronik Sel Surya Organik dengan Model Elektronik Dua Dioda

Elisa Sesa<sup>1)</sup>, Syahrul Ulum<sup>1)</sup>, Darmawati Darwis<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Tadulako, Palu, Sulawesi Tengah

### ABSTRACT

The organic photovoltaic cells (OPV) characteristics depend on several factors, i.e.: device structure, morphology of the active layer, and the active materials. These characteristic can be varied due to the applied treatment in the fabrication. The characteristic variations of OPV can be observed through the electrical parameters. These parameters can be extracted from the I-V curve. The purpose of this paper is to show that the two-diode model accurately extract the electrical parameters of several I-V curves comparing to the one-diode model. The model is built using the MATLAB program. The simulation results is given the average correlation value ( $R^2$ ) is 0.999 which shows that the extracted electrical parameters is valid to be used in the further analysis.

**Keywords:** OPV, I-V curve, electrical parameters, two-diode model, correlation value.

### ABSTRAK

Karakteristik dari suatu sel surya dari bahan organik sangat ditentukan oleh beberapa faktor antara lain: struktur divais, morfologi lapisan aktif, dan material yang digunakan. Karakteristik tersebut dapat berubah-ubah sesuai perlakuan dalam pembuatan sel surya tersebut. Perubahan karakteristik dari suatu sel surya dapat dilihat melalui karakteristik parameter elektroniknya. Parameter elektronik ini dapat diperoleh dengan mengekstraksinya dari kurva I-V sel surya tersebut. Tujuan dari tulisan ini adalah memperlihatkan keakuratan model elektronik dua dioda dalam mengekstraksi parameter elektronik dari beberapa kurva I-V dibanding model satu dioda. Model ini dibuat dengan menggunakan program MATLAB. Dari hasil simulasi diperoleh nilai korelasi ( $R^2$ ) rata-rata 0.999. Hal ini menunjukkan bahwa data yang diekstraksi dari kurva I-V adalah akurat untuk menjadi bahan acuan dalam analisa-analisa selanjutnya.

**Kata kunci:** Sel surya organik, kurva I-V, parameter elektronik, model elektronik dua dioda, nilai korelasi.

## I. PENDAHULUAN

Sel surya tipe organik sangat menjanjikan sebagai penghasil listrik yang kompetitif karena sel surya ini dapat dibuat dengan murah, materialnya fleksibel dan ringan, serta dapat diproduksi dalam skala besar sehingga sangat bersaing dengan bahan bakar fosil dan sumber energi lainnya untuk memenuhi kebutuhan energi harian masa depan[1].

Pemanfaatan energi secara langsung dari matahari dengan teknologi sel surya adalah hal yang sudah dikenal sebagai komponen yang esensial untuk sumber energi besar baik untuk tipe non-organik dan organik. Sel surya tipe non-organik terbuat dari bahan semikonduktor yang didoping atau didoping sehingga dapat membentuk sambungan p-n yang menghasilkan suatu sel fotovoltaik. Pada bahan tipe-p mengandung lebih banyak muatan positif (lubang) dan pada bahan tipe-n mengandung lebih banyak muatan negatif (elektron). Pada daerah sambungan akan terbentuk medan listrik oleh adanya perbedaan muatan. Hal ini akan mengakibatkan elektron dan lubang yang terbentuk akibat absorpsi cahaya akan terdifusi melalui sambungan ini dan bergerak ke masing-masing elektroda, yakni elektron bergerak ke elektroda negatif dan lubang bergerak ke elektroda positif[1].

Sebagai salah satu sumber energi yang bekerja secara kompleks maka perlu untuk memahami karakteristik sel surya tersebut. Hal ini dapat diketahui dari parameter-parameter elektrik dari karakteristik arus dan tegangan (I-V). Penentuan parameter ini merupakan hal yang penting untuk kontrol kualitas dan evaluasi kinerja dari suatu sel surya organik tersebut.

Tujuan dari tulisan ini adalah mengekstraksi parameter elektronik dari beberapa karakteristik arus-tegangan (kurva I-V) dengan menggunakan model elektronik satu dioda dan model elektronik dua dioda. Hal ini dilakukan untuk membandingkan hasil fit keduanya dan memperlihatkan keakuratan model dua dioda dalam mengekstraksi parameter-parameter elektronik dari suatu sel surya organik.

## II. TEORI DAN METODE

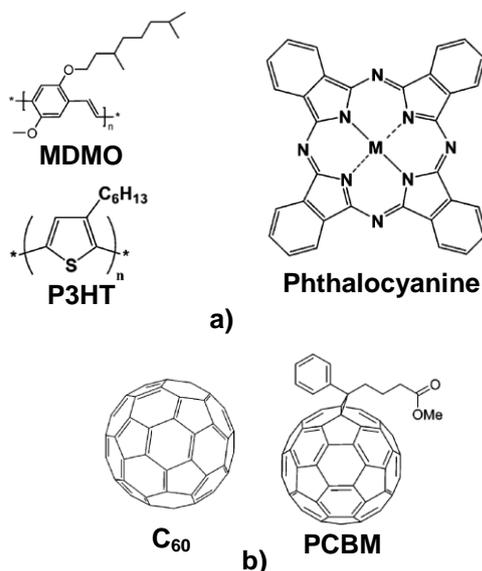
### A. Material sel surya organik

Secara umum sel surya organik dapat dibuat dari material dengan delokalisasi sistem  $\pi$  elektron yang dapat menyerap sinar matahari, membentuk pasangan muatan (excitons), dan mentransport muatan tersebut. Proses pembentukan material untuk berfungsi sebagai semikonduktor tipe-n (donor) dan tipe-p (akseptor) dapat dilakukan dengan metode kimia, fotokimia, atau elektrokimia[2]. Pada Gambar 1

diperlihatkan beberapa contoh material yang berfungsi sebagai donor dan akseptor untuk pembuatan sel surya organik. Untuk material donor (a) terdapat MDMO (poly-[2-methoxy-5-(3,7-dimethyloctyloxy)], P3HT [poly(3-hexylthiophene)], dan Phthalocyanine. Sementara untuk bagian akseptor (b) terdapat C<sub>60</sub> (buckminsterfullerene) dan PCBM [poly(1-(3-methoxycarbonyl)propyl-1-phenyl[6,6]C<sub>61</sub>].

### B. Arsitektur sel surya organik

Sejauh ini telah dikembangkan beberapa arsitektur atau struktur dari sel surya organik dan proses perpindahan muatan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.



**Gambar 1** Beberapa contoh material yang digunakan dalam pembuatan sel surya organik.  
a) material donor b) material akseptor  
(Sumber:[2])

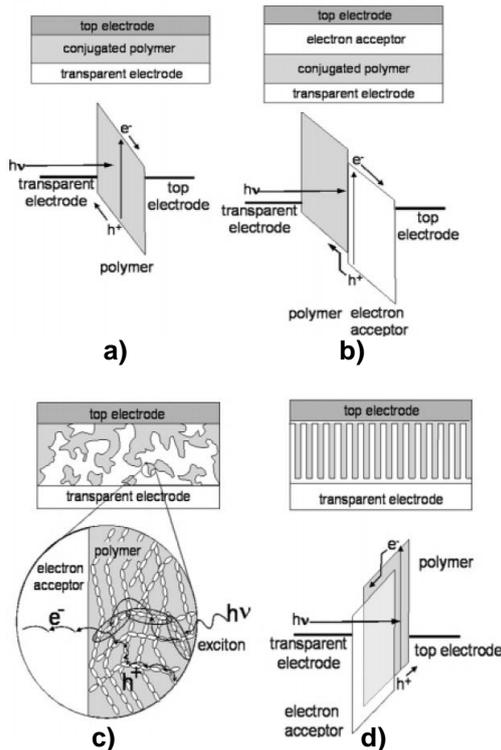
Pada dasarnya sel surya organik terdiri dari anoda (*bottom electrode/anode*) yang diletakkan di atas substrat glass atau plastik, lapisan aktif (*active*

*layer*), dan katoda (*top electrode/cathode*). Pada bagian anoda biasanya digunakan metal oksida indium (ITO, *indium tin oxide*) dan pada katoda biasanya digunakan aluminium (Al), perak (Ag), atau emas (Au)[3].

Sejauh ini struktur bulkheterojunction (BHJ) memberikan nilai efisiensi yang lebih tinggi dibanding struktur monolayer dan bilayer. Telah dikembangkan pula struktur yang lebih bagus yakni bulkheterojunction yang teratur (*ordered BHJ*). Hal ini dilakukan karena mengingat jarak difusi (*diffusion length*) dari exciton hanya sekitar 1-10 nm[1], namun masih mengalami kendala dalam hal mendapatkan keteraturan yang diinginkan.

Untuk menghasilkan energi listrik yang lebih bagus maka pada beberapa studi menambahkan lapisan perantara (*interfacial layer*) diantara elektroda dan lapisan aktif. Penambahan lapisan ini akan meningkatkan produksi muatan dan besarnya tegangan jaringan terbuka (*Voc, open-circuit voltage*). Pada bagian antara anoda dan lapisan aktif dipakai PEDOT:PSS untuk menghalangi lubang ke anoda dan pada bagian antara lapisan aktif dan katoda dipakai lapisan antara dari logam-logam yang memiliki fungsi kerja yang lebih rendah dari logam pada katoda. Penambahan ini akan meningkatkan produksi muatan dan mempercepat transportasi muatan.

### Ekstraksi Parameter Elektronik Sel Surya Organik (Elisa Sesa dkk)



**Gambar 2** Perkembangan arsitektur dari sel surya organik yang telah dikembangkan selama ini.  
 a) lapisan tunggal (monolayer)  
 b) lapisan ganda (bilayer)  
 c) bulkheterojunction  
 d) bulkheterojunction yang teratur  
 (Sumber: [4])

### C. Prinsip kerja sel surya organik

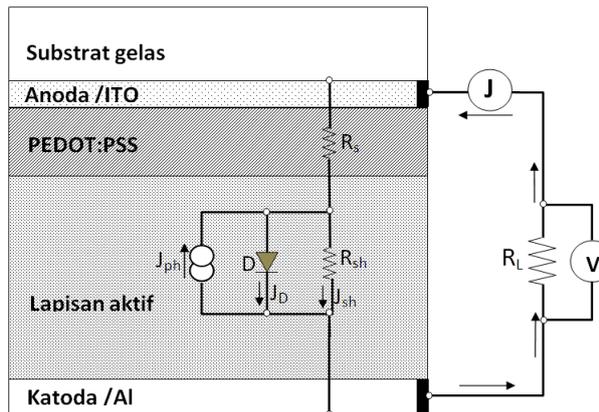
Seperti yang telah disampaikan pada bagian pendahuluan sebelumnya, pada dasarnya proses terjadinya arus pada sel surya organik diawali dengan penyerapan energi cahaya matahari. Proses penyerapan energi ini akan menyebabkan ada muatan dari material donor yang tereksitasi dan membentuk muatan pasangan terikat elektron dan lubang (*exciton*). Proses sangat berbeda dengan proses pembentukan elektron bebas pada sel surya non-organik. Hal ini terjadi karena rendahnya gaya antar molekul. Selanjutnya exciton akan terdifusi

karena adanya perbedaan potensial yang dapat disebabkan oleh perbedaan fungsi kerja kedua elektroda dan juga oleh adanya perbedaan tingkat energi antara orbital tertinggi yang terisi (HOMO, *highest occupied molecular orbital*) dan orbital terendah yang kosong (LUMO, *lowest unoccupied molecular orbital*). Jika exciton mencapai interface antara donor dan akseptor maka elektron dan hole akan terpisah (*dissociation*) karena elektron akan tertarik oleh akseptor. Muatan yang terpisahkan tersebut akan bergerak menuju masing-masing elektroda[5]. Dengan demikian pada elektroda akan dapat dihasilkan arus dari aliran elektron yang melalui penampang elektroda setiap detiknya.

### D. Model Elektronik

#### D.1 Model elektronik satu dioda

Pada Gambar 3 diperlihatkan rangkaian equivalent model elektronik satu dioda yang biasanya digunakan untuk menginterpretasi karakteristik sel surya non-organik. Namun model ini pula dapat digunakan untuk menggambarkan proses dalam sel surya organik.



**Gambar 3** Rangkaian equivalen untuk model elektronik satu dioda.

Inti dari model ini adalah sumber arus tetap  $J_{ph}$  yang melambangkan proses pembentukan muatan. Arus tetap ini diparalelkan dengan sebuah dioda yang melambangkan karakteristik diode pada kondisi tanpa cahaya atau tanpa iluminasi. Hal ini pula berkaitan erat dengan kebocoran arus ( $J_D$ ) karena adanya rekombinasi muatan (*recombination*) dan terjebakny muatan (*trapping*) dalam lapisan aktif sel surya. Resistor  $R_s$  merepresentasikan total resistansi seri antar semua lapisan dan juga resistansi dari lapisan itu sendiri pada devais sel surya. Sementara resistansi  $R_{sh}$  juga berhubungan erat dengan proses rekombinasi dan terjebakny muatan. Untuk kondisi optimal diharapkan nilai  $R_s$  serendah mungkin dengan demikian arus mudah keluar dan masuk ke sel surya dan nilai  $R_{sh}$  sebesar mungkin yang tentunya ini menandakan

kurangnya arus ( $J_{sh}$ ) yang terbuang atau kurangnya rekobinasi muatan yang sudah terbentuk dan kurangnya muatan yang terjebak atau tidak bisa keluar dari suatu sel surya.

Dengan model ini, besarnya arus yang keluar dari sel surya seperti pada persamaan 2. Namun model ini belum dapat mewakili gambaran untuk sel surya organik secara penuh. Untuk itu dikembangkan model elektronik dua dioda.

$$J = J_{ph} - J_D - J_{sh} \quad 1)$$

dengan  $J$  = arus total yang keluar dari sel surya

$J_{ph}$  = arus yang diproduksi akibat iluminasi

$J_D$  = kebocoran arus melalui dioda

$J_{sh}$  = kebocoran arus melalui resistor  $R_{sh}$

Besarnya  $J_D$  [5] sebagai berikut:

$$J_D = J_0 \exp \left[ \frac{q}{nkT} (V - JR_s) \right] \quad 2)$$

dan dari Gambar 3 diturunkan  $J_{sh}$ :

$$J_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad 3)$$

Dengan demikian total arus  $J$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$J = J_{ph} - J_0 \exp \left[ \frac{q}{nkT} (V - JR_s) \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad 4)$$

dengan  $J_0$  = rapat arus saturasi pada dioda ( $A/cm^2$ )

$q$  = muatan elektron

$n$  = bilangan kualitas dioda

$k$  = konstanta Boltzmann

$T$  = temperatur mutlak ( $^{\circ}K$ )

$V$  = tegangan di antara kedua elektroda

$R_s$  = resistansi seri dari sel surya

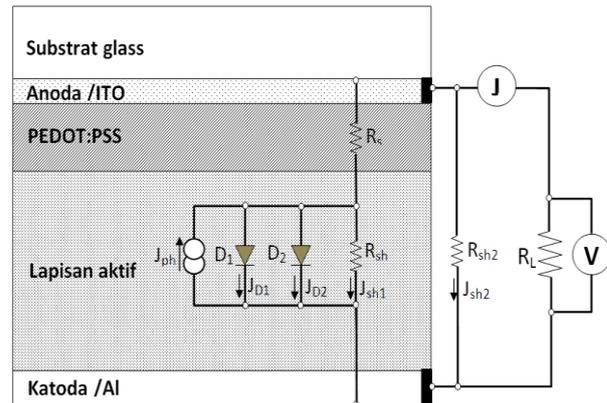
$R_{sh}$  = resistansi parallel dari sel surya

Ada 5 parameter utama yang dapat diekstraksi dari persamaan ini yakni  $J_{ph}$ ,  $J_{o1}$ ,  $n$ ,  $R_s$ , dan  $R_{sh}$ .

## D.2 Model elektronik dua dioda

Pada dasarnya model elektronik dua dioda adalah pengembangan dari model satu dioda yakni dengan menambahkan satu buah dioda yang diparalelkan dengan dioda pertama dan juga dengan  $R_{sh1}$  (lihat Gambar 4). Penambahan ini terjadi karena pada sel surya organik terjadi proses rekombinasi yang dalam (*deep recombination*) dan juga proses pembentukan muatan yang lebih kompleks dibanding pada sel surya non-organik. Model dua dioda ini dimodifikasi lagi dengan menambahkan sebuah resistor  $R_{sh2}$  yang diparalelkan dengan arus yang keluar dari sel surya tersebut. Resistansi ini erat kaitannya dengan porositas dan hubungan singkat yang terdapat pada sel surya.

Dari Gambar 4 dapat dituliskan karakteristik rapat arus  $J$  dan tegangan  $V$  dari model dua dioda seperti pada persamaan 5.



**Gambar 4** Rangkaian equivalenten untuk model elektronik dua dioda (Sumber: [6])

$$J = J_{o1} \left[ \exp \left( \frac{q(V(1 + \frac{R_s}{R_{sh2}}) - JR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right] + J_{o2} \left[ \exp \left( \frac{q(V(1 + \frac{R_s}{R_{sh2}}) - JR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right] + \frac{V(1 + \frac{R_s}{R_{sh2}}) - JR_s}{R_{sh1}} + \frac{V}{R_{sh2}} - J_{ph}$$

5)

dengan  $J_{o1}$  = rapat arus saturasi pada dioda  $D_1$ ,

$J_{o2}$  = rapat arus saturasi pada dioda  $D_2$ ,

$J_{ph}$  = rapat arus iluminasi

$n_1$  = faktor idealitas dioda  $D_1$

$n_2$  = faktor idealitas dioda  $D_2$

$R_s$  = resistansi seri sel surya

$R_{sh1}$  = resistansi parallel sel surya

$R_{sh2}$  = resistansi parallel melalui

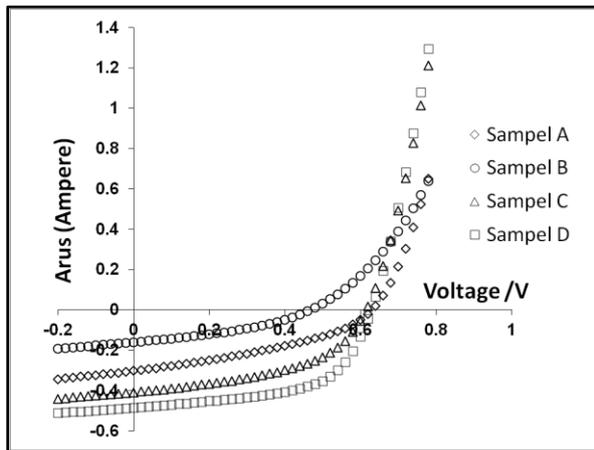
seluruh sel

Jika pada model satu dioda ada 5 parameter utama maka pada model dua dioda ini ada 7 parameter utama yang dapat diekstraksi dari persamaan 5 di atas yakni  $J_{o1}$ ,  $J_{o2}$ ,  $J_{ph}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $R_s$ , dan  $R_{sh}$ .

## III. DATA, APLIKASI MODEL, DAN HASIL

Pada studi ini dilakukan ekstraksi parameter dengan menggunakan model elektronik dua dioda terhadap empat buah data karakteristik I-V dari sel surya organik

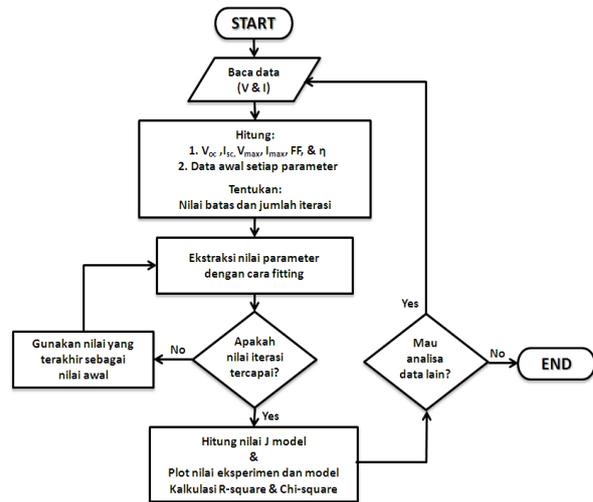
seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5. Nilai yang diperoleh akan dibandingkan pula dengan nilai parameter dengan menggunakan model elektronik satu dioda.



**Gambar 5** Data yang digunakan dalam studi ini dengan nilai efisiensi yang berbeda-beda

Pada Gambar 6 diperlihatkan diagram alir program untuk menjalankan program untuk masing-masing model secara terpisah. Program ini dibuat dan dijalankan dengan menggunakan software MATLAB. Program dimulai dengan pembacaan data J-V dan perhitungan nilai awal semua parameter untuk masing-masing sampel. Kemudian data J-V difit melalui suatu proses iterasi yang berakhir pada saat nilai iterasi yang diberikan tercapai. Pada setiap proses iterasi akan diekstraksi nilai setiap parameter dari model. Nilai akhir setiap parameter diperoleh jika proses iterasi berhenti. Selanjutnya nilai akhir setiap parameter tersebut akan digunakan untuk

menghitung nilai arus dengan jalan memasukkan nilai tersebut ke persamaan 4 untuk model elektronik satu dioda dan ke persamaan 5 untuk model elektronik dua dioda.



**Gambar 6** Diagram alir program baik untuk model elektronik satu dioda dan dua dioda

**Tabel 1.** Nilai-nilai setiap parameter elektronik setiap sampel dengan model satu dioda dan model dua dioda.

Sampel	Effisiensi (%)	Model elektronik	Parameter-parameter elektronik							R-square
			$J_{o1}$ (A)	$J_{o2}$ (A)	$I_{ph}$ (A)	$n_1$	$n_2$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	
A	0.56	1-dioda	2.12E-08	-	1.62E-04	2.4	-	237	4818	0.99864
		2-dioda	1.21E-08	8.54E-07	1.65E-04	4.0	4.0	142	5441	0.99992
B	1.42	1-dioda	1.39E-09	-	3.07E-04	2.1	-	76	3336	0.99916
		2-dioda	4.63E-09	6.34E-12	3.06E-04	2.4	2.4	63	3437	0.99928
C	2.45	1-dioda	1.49E-09	-	3.96E-04	2.0	-	65	5851	0.99821
		2-dioda	9.52E-10	1.27E-08	4.10E-04	2.4	2.4	52	4591	0.99976
D	3.54	1-dioda	1.99E-09	-	4.88E-04	2.0	-	59	6213	0.99995
		2-dioda	3.62E-11	1.21E-09	4.88E-04	1.9	1.9	61	5964	0.99996

#### IV. PEMBAHASAN

Pada Tabel 1 diperlihatkan nilai-nilai parameter elektronik yang diekstraksi dari data J-V masing-masing sampel dari kedua model elektronik yang telah dijelaskan sebelumnya. Terlihat bahwa nilai korelasi ( $R^2$ , *R-square*) menggunakan model elektronik dua dioda dominan lebih baik model elektronik satu dioda. Nilai korelasi ini menunjukkan seberapa dekatnya nilai eksperimen dan nilai yang diperoleh dengan menggunakan model. Nilai korelasi ini memiliki range dari 0-1. Semakin besar nilai korelasi (mendekati 1) semakin akurat hasil suatu fit yang diperoleh.

Dari fitting data dan ekstraksi nilai-nilai parameter elektronik tiap sampel baik dengan model satu dioda maupun dengan model dua dioda dapat disimpulkan bahwa untuk sel

surya organik sangat tepat dimodelkan dengan model elektronik dua dioda. Hal ini sangat didukung dari hasil fitting dengan nilai korelasi (*R-square*) yang dominan lebih tinggi dibanding model elektronik satu dioda. Dengan nilai korelasi yang lebih tinggi ini menguatkan bahwa nilai setiap parameter elektronik yang diekstraksi lebih akurat.

#### V. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada University of Newcastle, Paul Dastoor, Warwick Belcher, dan Xiao-jing Zhou atas bimbingannya. Kami jugaberterima kasih kepada Dikti Depdikbud untuk pembiayaan beasiswa.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

1. Blom, P.W.M., et al., *Device physics of polymer:fullerene bulk heterojunction solar cells*. *Advanced Materials*, 2007. **19**(12): p. 1551-1566.
2. Gunes, S., H. Neugebauer, and N.S. Sariciftci, *Conjugated polymer-based organic solar cells*. *Chemical Reviews*, 2007. **107**(4): p. 1324-1338.
3. Brabec, C.J., *Organic photovoltaics: technology and market*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2004. **83**(2-3): p. 273-292.
4. Coakley, K.M. and M.D. McGehee, *Conjugated polymer photovoltaic cells*. *Chemistry of Materials*, 2004. **16**(23): p. 4533-4542.
5. Moliton, A. and J.-M. Nunzi, *How to model the behaviour of organic photovoltaic cells*. *Polymer International*, 2006. **55**(6): p. 583-600.
6. Sesa, E., et al. *Comparing Model Parameters of Bulk Heterojunction and Nanoparticulate Photovoltaic Cells Using a Two-diode Model*. in *AIP Conference Proceedings*. 2011.