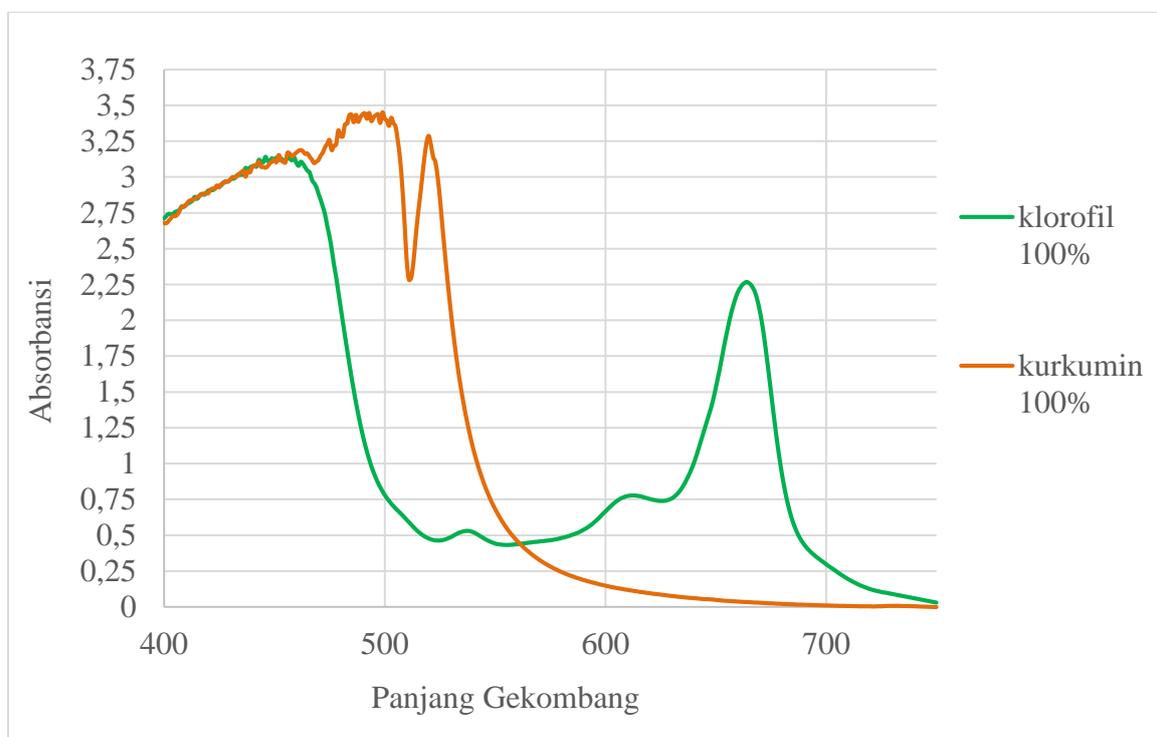


## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

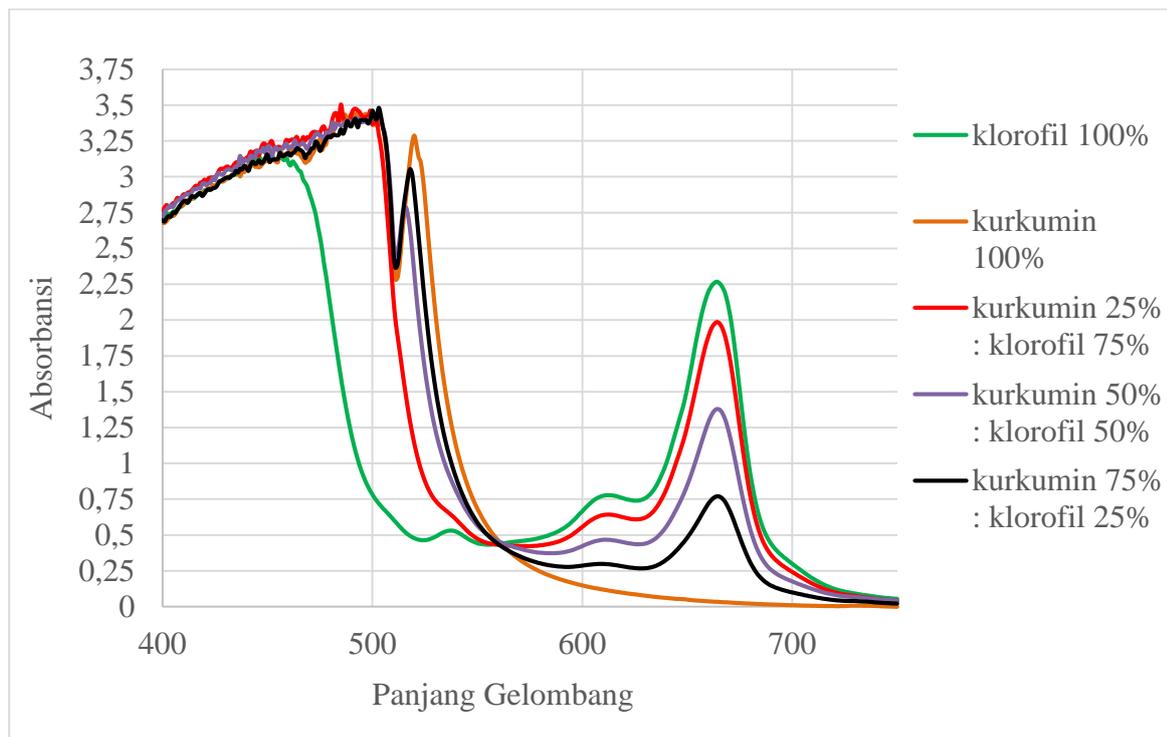
### 4.1 Karakterisasi Absorbansi Cahaya



Gambar 4.1 Absorbansi cahaya pada pewarna alami klorofil dan kurkumin

Gambar 4.1 menjelaskan bahwa absorbansi ekstraksi kunyit (kurkumin) dan daun bayam (klorofil) pada daerah cahaya tampak yaitu gelombang 400 sampai 750 nm. Pada gambar 4.1, ekstraksi kunyit (kurkumin) memiliki 2 puncak penyerapan yang baik. Pertama, pada daerah  $\pm 480 - 500$  nm dengan nilai puncak absorbansi rata - rata 3,4. Puncak kedua, pada gelombang 520 dengan nilai absorbansi 3,288. Kemudian pada gelombang 521 nm mulai menurun perlahan - lahan sampai absorbansi bernilai 0 pada 750 nm. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Kim, H, -J., et al. 2013), dimana kurkumin merupakan pigmen yang hanya bisa menyerap cahaya tampak pada warna biru, hijau dan kuning yaitu daerah  $\pm 400 - 580$  nm. Pada gambar 4.1 ekstraksi daun bayam (klorofil) memiliki absorbansi kuat pada gelombang 400 sampai 450 nm dengan kenaikan nilai absorbansi 2,71 - 3,135. Hal ini dikarenakan daun bayam memiliki jumlah dominan jenis klorofil  $\alpha$  yang menyerap maksimum pada daerah  $\pm 400 - 450$  nm, berbeda dengan klorofil  $\beta$  menyerap hanya daerah  $\pm 400 - 500$  nm (hartini, 2014). Kemudian, pada gelombang 450 - 600 nilai

absorbansinya rendah dengan rata-rata 0,52. Hal ini sesuai dengan sifat klorofil yang lemah menyerap cahaya daerah  $\pm 500 - 600$  nm. Lemahnya klorofil menandakan ketika cahaya putih polikromatik menyinari klorofil daun akan merefleksikan pigmen berwarna hijau. Kemudian nilai absorbansi naik dari gelombang 600 dan puncak maksimumnya pada gelombang 664 dengan nilai absorbansi 2,267. Hal ini dikarenakan sifat klorofil mampu menyerap maksimum pada daerah yaitu  $\pm 600 - 750$  nm.



Gambar 4.2 Absorbansi cahaya pewarna alami klorofil, kurkumin dan variasi campuran kurkumin-klorofil.

Gambar 4.2 menunjukkan pengaruh variasi pencampuran klorofil dan kurkumin. Campuran pewarna dengan komposisi perbandingan volume kurkumin 75% / klorofil 25% ; kurkumin 50% / klorofil 50% ; dan kurkumin 25% / klorofil 75% memiliki absorbansi lebih tinggi dan daerah serapan cahaya lebih lebar dibandingkan pewarna tunggal klorofil 100% dan kurkumin 100%. Pewarna klorofil dan kurkumin, masing-masing memberikan sumbangan absorbansi pada daerah panjang gelombang dan puncak serapan campuran. Pada daerah 400 – 500 pewarna campuran memiliki nilai absorbansi 2,75 sampai 3,5. Hal ini dikarenakan kedua pewarna (klorofil-kurkumin) memiliki penyerapan kuat pada gelombang 400-500, sehingga apabila dicampurkan mampu memperbaiki serapan di daerah 400 – 500 nm. Penambahan pewarna kurkumin mempengaruhi nilai absorbansi pada panjang gelombang 400 – 550 nm. Sedangkan Penambahan klorofil menyebabkan daerah serapan cahaya lebih lebar pada daerah 550 nm hingga 750 nm seperti yang terlihat pada gambar 4.2.

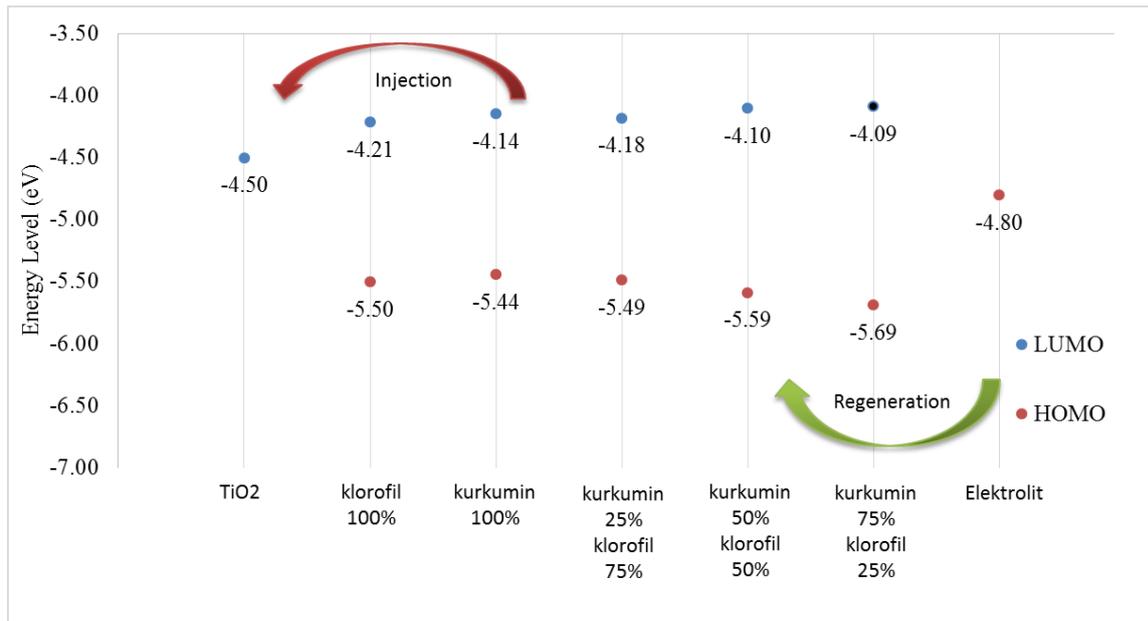
Perbandingan kemampuan absorbansi dilakukan dengan cara menghitung luas daerah pada masing-masing pewarna. Luas daerah tertinggi ke terendah adalah kurkumin 25% / klorofil 75% (502,528), kurkumin 50% / klorofil 50% (494,628), kurkumin 75% / klorofil 25% (466,268), kurkumin 100% (442,658), dan klorofil 100% (426,538).

Tabel 4.1  
Nilai puncak, panjang gelombang dan luas daerah absorbansi

No	Komposisi Pewarna	Nilai Puncak Panjang Gelombang (nm)	Nilai Puncak Absorbansi	Luas Daerah
1	kurkumin 25% / klorofil 75%	485	3.504	502,528
		663	1.974	
2	kurkumin 50% / klorofil 50%	503	3,440	494,628
		517	2,787	
		664	1.378	
3	kurkumin 75% / klorofil 25%	503	3,480	466,268
		518	3,053	
		664	0,769	
4	kurkumin 100%	499	3,452	442,658
		520	3,288	
5	klorofil 100%	456	3,135	426,538
		664	2,267	

#### 4.2 Karakterisasi Energi *Bandgap*

*Cyclic voltammetry* adalah alat yang digunakan untuk menganalisa tingkat energi pada pewarna alami. Energi yang dianalisa adalah energi reduksi ( $E_{red}$ ) dan energi oksidasi ( $E_{oks}$ ) yang kemudian dikonversi menjadi energi HOMO (*highest occupied molecular orbital*) dan energi LUMO (*lowest unoccupied molecular orbital*). Energi oksidasi merupakan energi yang diperlukan molekul untuk melepaskan elektron. Energi reduksi merupakan energi yang diperlukan molekul untuk menambahkan elektron. HOMO adalah orbital yang bertindak sebagai donor elektron, karena merupakan orbit terluar (energi tertinggi) yang mengandung setidaknya satu elektron. LUMO adalah orbital yang bertindak sebagai penerima elektron, karena merupakan orbit terdalam (energi terendah) memiliki ruang untuk menerima elektron. Energi *bandgap* merupakan selisih antara energi oksidasi dan reduksi. Energi LUMO diperoleh dari rumus  $-e(E_{red} = 4,4)$  eV, energi HOMO dari rumus  $-e(E_{oks} + 4,4)$  eV, dan energi *bandgap* dari rumus selisih  $E_{LUMO}$  dan  $E_{HOMO}$  (Yudha, 2016)



Gambar 4.3. Tingkat energi HOMO-LOMO pada pewarna alami klorofil, kurkumin dan variasi komposisi klorofil-kurkumin

Gambar 4.3 menunjukkan proses transfer elektron pada pewarna oleh sinar matahari, injeksi elektron dari pewarna ke semikonduktor, dan regenerasi elektron oleh elektrolit pada pewarna. Injeksi elektron yang baik dan efisien dari pewarna ke semi konduktor terjadi ketika LUMO pewarna lebih positif dari CB (*conduction band*) TiO<sub>2</sub>. Regenerasi elektron pada pewarna yang baik dan efisien terjadi ketika energi HOMO pewarna lebih negatif dari energi potensial redoks elektrolit. Energi bandgap antara HOMO – LOMO yang lebar juga dapat menghasilkan *photocurrent* yang lebih besar.

Perubahan tingkat energi LUMO dan HOMO terjadi berdasarkan komposisi campuran pewarna. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.3. Nilai absorbansi pewarna campuran dari tertinggi ke terendah yaitu kurkumin 25% / klorofil 75% ; kurkumin 50% / klorofil 50% ; dan kurkumin 75% / klorofil 25%. Semakin tinggi nilai absorbansi maka semakin besar pula energi bandgap pada pewarna.

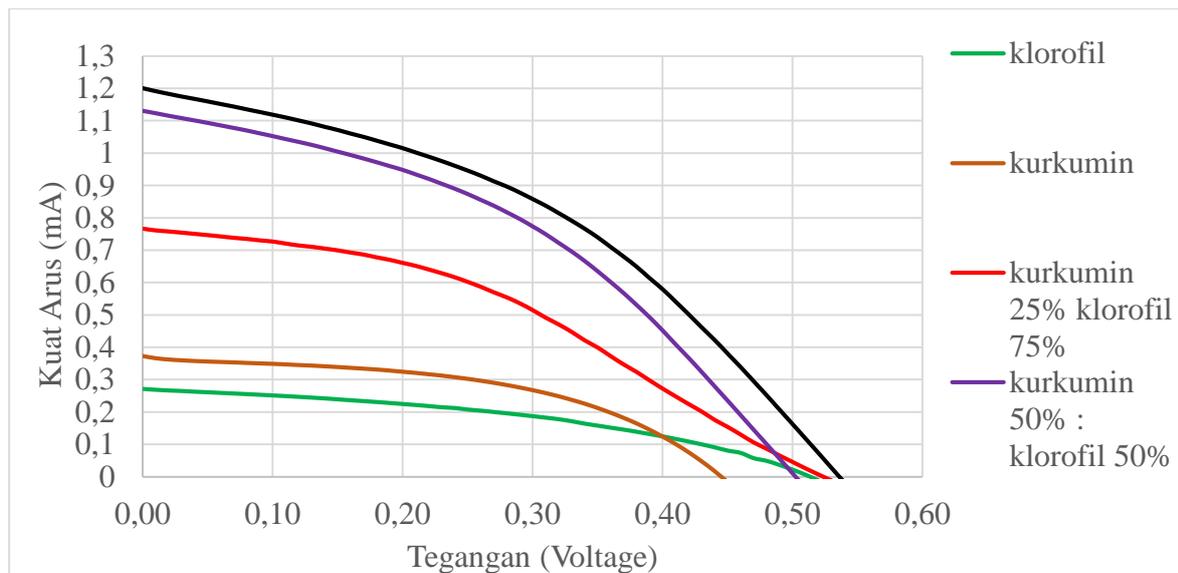
Tabel 4.2  
*Cyclic Voltammetry* variasi campuran pewarna

No	Komposisi Pewarna	$E_{oks}$ (V)	$E_{red}$ (V)	$E_{HOMO}$ (eV)	$E_{LUMO}$ (eV)	$E_{band\ gap}$ (eV)
1	kurkumin 25% / klorofil 75%	1.29	-0.31	-5.69	-4.09	1.60
2	kurkumin 50% / klorofil 50%	1.19	-0.30	-5.59	-4.10	1.49
3	kurkumin 75% / klorofil 25%	1.09	-0.22	-5.49	-4.18	1.31
4	kurkumin 100%	1.04	-0.26	-5.44	-4.14	1.30
5	klorofil 100%	1.10	-0.19	-5.50	-4.21	1.29

- $E_{HOMO} = -e(E_{oks} + 4,4)$
- $E_{LUMO} = -e(E_{red} + 4,4)$
- $E_{band\ gap} = E_{LUMO} - E_{HOMO}$

Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian *cyclic voltammetry* dari setiap sampel pewarna yang diuji dan didapatkan energi LUMO (kurkumin75%/klorofil 25%, -4,09 eV ; kurkumin 50%/klorofil 50%, -4,1 eV ; kurkumin 25%/klorofil 75%, -4,18 eV ; kurkumin 100%, -4,14 eV dan klorofil 100%, 1,29 eV), energi HOMO (kurkumin75%/klorofil 25%, -5,69 eV ; kurkumin 50%/klorofil 50%, -5,59 eV ; kurkumin 25%/klorofil 75%, -5,49 eV ; kurkumin 100%, -5,44 eV dan klorofil 100%, -550 eV) dan energi *band gap* (kurkumin75%/klorofil 25%, 1,60 eV ; kurkumin 50%/klorofil 50%, 1,40 eV ; kurkumin 25%/klorofil 75%, 1,31 eV ; kurkumin 100%, 1,30 eV dan klorofil 100%, 1,29 eV). *Band gap* lebar akan memperbanyak elektron yang mengalir dari pita konduksi ke pita valensi, yang membuat ruang reaksi fotokatalis dan absorpsi oleh *dye* akan menjadi lebih banyak, sehingga penyerapan warna akan semakin lebar. Oleh karena itu pewarna klorofil, kurkumin dan campuran kurkumin bisa digunakan sebagai fotosensitizer untuk DSSC karena memiliki energi LUMO yang lebih positif dari pada CB TiO<sub>2</sub> (-4,5 eV) dan energi HOMO yang lebih negatif dari pada energi redoks elektrolit (-4,8 eV) sehingga akan mempengaruhi nilai arus listrik ( $I_{sc}$ ) dan tegangan listrik ( $V_{oc}$ ).

### 4.3 Karakteristik Arus dan Tegangan



Gambar 4.4 Karakterisasi I-V pada pencampuran pewarna alami kurkumin dan klorofil

Pengukuran DSSC menggunakan solar simulator pada penyinaran  $1000 \text{ W/m}^2$ . Hasil yang didapatkan dari pengujian tersebut berupa grafik seperti pada gambar 4.4. Dari grafik tersebut dapat ditentukan nilai *fill factor*,  $V_{oc}$  dan efisiensi dari sebuah *solar cell*.

Faktor yang mempengaruhi karakteristik sel surya adalah tingkat energi HOMO (*highest occupied molecular orbital*), LUMO (*lowest unoccupied molecular orbital*), dan celah pita pada pewarna. Gambar 4.3 menjelaskan bagaimana proses injeksi elektron dari pewarna ke semikonduktor dan proses regenerasi elektron pewarna oleh elektrolit. Proses injeksi elektron dari pewarna ke semikonduktor dan proses regenerasi elektron pewarna oleh elektrolit. Proses injeksi elektron terjadi ketika tingkat energi LUMO pewarna lebih positif atau rendah dari pada tingkat energi semikonduktor ( $\text{TiO}_2$ ). Proses regenerasi elektron pewarna oleh elektrolit terjadi ketika tingkat energi HOMO pewarna lebih negatif atau tinggi dari pada tingkat energi redoks elektrolit (Yudha, 2016)

Faktor lain yang mempengaruhi karakteristik sel surya adalah luas absorbansi yang dimiliki kedua pewarna terhadap cahaya. Semakin meningkatnya jumlah klorofil dalam campuran pewarna kurkumin-klorofil maka efisiensi DSSC juga akan meningkat. Hal ini disebabkan karena klorofil memiliki daerah absorbansi yang lebih luas pada daerah 500-600 nm. Semakin luas daerah absorbansi, maka energi foton yang diserap semakin besar. Dengan meningkatnya foton maka jumlah elektron yang terseksitasi lebih banyak, sehingga arus yang dihasilkan akan semakin besar. Pada gambar 4.2 daerah absorbansi campuran kurkumin 25%/klorofil 75% lebih luas daripada campuran kurkumin 50%/klorofil 50% dan kurkumin 75%/ klorofi 25%.

*Fill factor* merupakan rasio daya maksimum DSSC terhadap hasil  $V_{oc} \times I_{sc}$ . Hal yang mempengaruhi besarnya *fill factor* adalah hambatan internal dari *photoelectrode*  $TiO_2$ , *counter electrode*, dan kaca konduktif. Hambatan pada campuran kurkumin 25%/klorofil 75%, kurkumin 50%/klorofil 50%, dan kurkumin 75%/klorofil 25% berturut-turut sebagai berikut 222  $\Omega$ , 284  $\Omega$ , dan 542  $\Omega$ . Oleh karena itu *fill factor* yang dihasilkan berturut-turut adalah 0,405, 0,409, dan 0,387. Hasil ini menunjukkan semakin kecil nilai hambatan maka *fill factor* akan meningkat.

$V_{oc}$  merupakan tegangan pada saat open circuit atau hambatan tak terhingga. Nilai  $V_{oc}$  dipengaruhi oleh tingkat energi *bandgap*, semakin tinggi energi *bandgap* maka semakin besar nilai  $V_{oc}$  yang dihasilkan (Yudha, 2016). Nilai  $V_{oc}$  pada kurkumin 25%/klorofil 75%, kurkumin 50%/klorofil 50%, kurkumin 75%/klorofil 25%, kurkumin 100%, dan klorofil 100% adalah 0,535 mV, 0,502 mV, 0,523 mV, 0,445 mV dan 0,513 mV.

$I_{sc}$  merupakan arus yang mengalir pada *short current* yang berarti arus yang terbaca sebelum muncul tegangan.  $I_{sc}$  dipengaruhi oleh energi *bandgap* dan absorbansi, semakin lebar energi *bandgap* maka jumlah elektron yang mengalir dari pita konduksi ke pita valensi akan banyak. Ketika elektron yang mengalir banyak maka *photocurrent* yang dihasilkan akibat dari *photoexcitation* menjadi lebih besar. Energi *bandgap* pada campuran kurkumin 25% / klorofil 75% ; kurkumin 50% / klorofil 50% ; kurkumin 75% / klorofil 25%, kurkumin 100 % dan klorofi 100% berturut-turut sebagai berikut 1,6 eV, 1,49 eV, 1,31 eV, 1,30 eV, dan 1,29 eV. Oleh karena itu,  $I_{sc}$  yang dihasilkan oleh DSSC menggunakan kurkumin 25%/klorofil 75% ; kurkumin 50%/klorofil 50% ; kurkumin 75%/klorofil 25%, kurkumin 100% dan klorofil 100% adalah 1,2 mA, 1,13 mA, 0,766 mA, 0,372 mA, dan 0,271 mA.

Tabel 4.3.

Parameter-parameter DSSC dengan variasi perbandingan kurkumin-klorofil dalam campuran *dye*.

Kurkumin : Klorofil	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$I_{max}$ (mA)	$V_{max}$ (V)	$P_{max}$ (mW)	FF	$\eta$ (%)
25% : 75%	1,200	0,535	0,791	0,33	0,261	0,405	0,261
50% : 50%	1,130	0,502	0,749	0,31	0,232	0,409	0,232
75% : 25%	0,766	0,523	0,535	0,29	0,155	0,387	0,155
100% : 0%	0,372	0,445	0,267	0,31	0,08	0,482	0,080
0% : 100%	0,271	0,513	0,178	0,32	0,056	0,408	0,056

Pada tabel 4.3 menunjukkan efisiensi DSSC tertinggi didapatkan pada saat menggunakan campuran pewarna kurkumin25%/klorofil 75%. Efisiensi DSSC merupakan

rasio energi yang dihasilkan terhadap energi yang digunakan. Faktor yang menyebabkan efisiensi *solar cell* yang tinggi adalah  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $I_{max}$ ,  $P_{max}$ , dan FF yang dihasilkan.