

**PENGARUH KONSENTRASI ZAT WARNA EKSTRAK DAUN
TANAMAN SAMBANG DARAH (*EXCOECARIA COCHINCHINESIS*)
TERHADAP UNJUK KERJA DAYA LISTRIK DSSC (*DYE SENSITIZED
SOLAR CELL*) BERBASIS TITANIA**

TUGAS AKHIR SKRIPSI

Diajukan Kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains



Oleh :

Ersha Maharditya

NIM 14306141053

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA

2019

LEMBAR PERSETUJUAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

**PENGARUH KONSENTRASI ZAT WARNA EKSTRAK DAUN
TANAMAN SAMBANG DARAH (*EXCOECARIA COCHINCHINESIS*)
TERHADAP UNJUK KERJA DAYA LISTRIK DSSC (*DYE SENSITIZED
SOLAR CELL*) BERBASIS TITANIA**

Disusun oleh:

Ersha Maharditya

NIM 14306141053

Telah memenuhi syarat dan disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk dilaksanakan
Ujian Akhir Tugas akhir Skripsi bagi yang bersangkutan.

Yogyakarta, 28 Februari 2019

Mengetahui,
Ketua Program Studi

Disetujui,
Dosen Pembimbing

Nur Kadarisman, M.Si.
NIP. 19402051991011001

Rita Prasetyowati, M.Si.
NIP. 198007282006042001

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Ersha Maharditya

NIM : 14306141053

Program Studi : Fisika

Judul TAS : Pengaruh Konsentrasi Zat Warna Ekstrak Daun Tanaman
Sambang Darah (*Excoecaria Cochinchinesis*) Terhadap
Unjuk Kerja Daya Listrik DSSC (*Dye Sensitized Solar
Cell*) Berbasis Titania

Menyatakan bahwa skripsi ini benar benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim.

Yogyakarta, 28 Februari 2019

Yang menyatakan,



Ersha Maharditya

NIM 14306141053

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi

**PENGARUH KONSENTRASI ZAT WARNA EKSTRAK DAUN
TANAMAN SAMBANG DARAH (*EXCOECARIA COCHINCHINENSIS*)
PADA UNJUK KERJA DAYA LISTRIK DSSC (*DYE SENSITIZED SOLAR
CELL*) BERBASIS TITANIA**

Disusun oleh :

Ersha Maharditya

NIM 14306141053

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi Program Studi
Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri
Yogyakarta

Pada tanggal 28 Februari 2019

TIM PENGUJI

Nama/Jabatan

Rita Prasetyowati, M.Si.

Ketua Penguji/Pembimbing

Dr. Ariswan, M.Si., DEA

Sekretaris

Dr. Restu Widiatmono, S.Si., M.Si.

Penguji

Tanda Tangan

Tanggal

23-09-2017

23-09-2017

23-09-2017

Yogyakarta, 29 Juli 2019

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Hartono, M.Si.

NIP. 196203291987021002

**PENGARUH KONSENTRASI ZAT WARNA EKSTRAK DAUN
TANAMAN SAMBANG DARAH (*EXCOECARIA COCHINICHINESIS*)
TERHADAP UNJUK KERJA DAYA LISTRIK DSSC (*DYE SENSITIZED
SOLAR CELL*) BERBASIS TITANIA**

Oleh:

Ersha Maharditya

NIM 14306141053

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi penyisipan zat warna (*dye*) ekstrak daun Sambang Darah terhadap unjuk kerja daya listrik pada DSSC berbasis titania. Pengaruh konsentrasi penyisipan *dye* ditunjukkan melalui adanya perubahan kemampuan absorbansi lapisan titania pada hasil uji UV-Vis, perubahan struktur kristal lapisan titania pada hasil uji XRD, perubahan morfologi dan komposisi unsur lapisan titania pada hasil uji SEM-EDS, serta perubahan efisiensi daya listrik keluaran pada DSSC.

Penelitian ini dimulai dengan membuat larutan ekstrak daun Sambang Darah sebagai *dye* dengan variasi massa 5 gram, 10 gram, dan 15 gram. Sintesis lapisan titania dilakukan dengan metode *Doctor Blade Coating*. Lapisan titania disisipi *dye* dengan direndam pada tiap-tiap variasi konsentrasi selama 2 jam. Pengujian UV-Vis, XRD, dan SEM-EDS hanya dilakukan pada variasi konsentrasi *dye* dengan massa 0 gram dan 10 gram. Lapisan titania kemudian disusun seperti sandwich dimulai dari lapisan titania, elektrolit, dan elektroda lawan sehingga menjadi DSSC. DSSC diuji daya listrik keluarannya dengan menggunakan uji arus-tegangan.

Hasil uji UV-Vis menunjukkan bahwa penyisipan *dye* meningkatkan kemampuan absorbansi lapisan titania dengan panjang gelombang puncak 278 nm. Hasil karakterisasi XRD juga menunjukkan bahwa penyisipan *dye* tidak mempengaruhi struktur kristal TiO_2 dengan jenis kristal yang sama, yaitu TiO_2 jenis anatase bentuk tetragonal dan parameter kisi yang bernilai sama. Hasil uji SEM-EDS menunjukkan bahwa penyisipan *dye* tidak mempengaruhi morfologi dan komposisi kimia lapisan titania dengan bentuk permukaan yang sama dan komposisi yang sama antara kedua sampel. Penyisipan *dye* mempengaruhi unjuk kerja daya listrik DSSC ditunjukkan dengan hasil uji arus-tegangan dengan efisiensi konversi daya listrik 0,22% untuk tanpa *dye*, 0,25% untuk *dye* 5 gram, 0,38% untuk *dye* 10 gram, dan 0,53% untuk *dye* 15 gram.

Kata Kunci : *dye sensitized solar cell, doctor blade, Sambang Darah*

**THE EFFECT OF *EXCOECARIA COCHINCHINESIS* LEAF DYE
EXTRACT TO THE ELECTRIC POWER PERFORMANCE OF TITANIA
BASED DSSC (*DYE SENSITIZED SOLAR CELL*)**

By:

Ersha Maharditya

NIM 14306141053

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the effect of *Excoecaria Cochinchinesis* leaf dye extract insertion to the electric power performance of titania based DSSC. The dye insertion effect was indicated by the absorbance level of titania layer based on the result of UV-Vis characterization, titania layer crystal structure based on the XRD characterization, titania layer morphological structure and element identification based on the SEM-EDS characterization, and the DSSC output power efficiency.

The study was started by making the solutions of *Excoecaria Cochinchinesis* leaf extract as a dye by varying the leaf mass by 5 gram, 10 gram, and 15 gram. Synthesis of the titania layer was conducted using Doctor Blade Coating method, while titania layer was soaked in the dye for each concentration. The UV-Vis, XRD, and SEM-EDS characterization were conducted only to 0 and 10 gram mass of dye variation. DSSC were set to form titania layer, electrolyte, and counter electrode sandwich. The output power of the synthesized DSSC then was tested by current-voltage characterization.

The insertion of *Excoecaria Cochinchinesis* leaf dye extract to the titania based DSSC showed several results as follows: the titania layer absorbance value was measured at the highest peak of 278 nm; the crystal structure of TiO_2 wasn't affected by the insertion; SEM-EDS results also show that the titania layer morphological structure weren't affected by the insertion, while the element identification supports the insertion; DSSC output power efficiency measurement results were as follows: 0,22% on 0 gram dye, 0,25% on 5 gram dye, 0,38% on 10 gram dye, 0,53% on 15 gram dye.

Key Word : dye sensitized solar cell, doctor blade, *Excoecaria Cochinchinesis*

MOTTO

Never Ending Spirit
(Ersha Maharditya)

“Janganlah hendaknya kerajinanmu kendor, biarlah rohmu menyala-nyala dan
layanilah Tuhan.”
(Roma 12: 11)

PERSEMBAHAN

Karya sederhana ini saya persembahkan untuk orang tua saya,

Andreas Sutantoro dan Feronica Supraptini,

kakak saya Tesalonika Dinda Putri Arinda dan Efraim Bagas Widyatmoko,

orang yang selalu memberikan semangat buat saya,

Abigail Eunike Nita Raphaelly,

teman-teman Sika-E, teman-teman Youth-Teen GPdI Baturetno,

dan orang-orang yang selalu mendoakan saya,

jemaat GPdI Baturetno

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat dan karunia-Nya, sehingga Tugas Akhir Skripsi dalam rangka untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Fisika dengan judul “PENGARUH ZAT WARNA EKSTRAK DAUN TANAMAN SAMBANG DARAH (*EXCOECARIA COCHINCHINESIS*) TERHADAP UNJUK KERJA DAYA LISTRIK DSSC (*DYE SENSITIZED SOLAR CELL*) BERBASIS TITANIA” dapat disusun sesuai dengan harapan. Tugas Akhir Skripsi ini dapat diselesaikan tidak lepas dari bantuan dan kerjasama dengan pihak lain. Berkenaan dengan hal tersebut, penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada yang terhormat :

1. Dr. Hartono, M.Si. selaku Dekan FMIPA UNY beserta seluruh staf atas segala fasilitas dan bantuannya untuk memperlancar administrasi tugas akhir skripsi.
2. Yusman Wiyatmo, M.Si., selaku ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang telah memberikan izin atas penelitian ini.
3. Nur Kadarisman, M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika FMIPA UNY, yang telah memberikan izin dalam pelaksanaan tugas akhir skripsi ini.
4. Rita Prasetyowati, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir Skripsi yang telah banyak memberikan semangat, dorongan, dan bimbingan selama penyusunan tugas akhir skripsi ini.
5. Sumarna, M.Si., M.Eng., selaku Penasehat Akademik yang telah membimbing, memberikan banyak nasehat selama proses perkuliahan hingga terselesaikannya skripsi ini.
6. Dosen-dosen Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY, yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis.
7. Orangtua yang selalu memberikan dukungan dalam bentuk doa dan usaha.
8. Teman teman SikaE yang selalu berjuang bersama untuk mencapai gelar Sarjana.
9. Semua pihak, secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan di sini atas bantuan dan perhatiannya selama penyusunan Tugas Akhir Skripsi ini.

Akhirnya, semoga segala bantuan yang telah diberikan oleh semua pihak di atas menjadi amalan yang bermanfaat dan mendapatkan balasan dari Tuhan Yang Maha Esa dan Tugas Akhir Skripsi ini menjadi informasi yang bermanfaat bagi pembaca atau pihak lain yang membutuhkannya.

Yogyakarta, 28 Februari 2019
Penulis,

Erska Maharditya
NIM 14306141053

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
SURAT PERNYATAAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
HALAMAN MOTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	6
C. Batasan Masalah	6
D. Rumusan Masalah	7
E. Tujuan Penelitian	7
F. Manfaat Penelitian	8
 BAB II TINJAUAN PUSTKA	 9
A. Semikonduktor	9
B. Sel Surya	15
1. Tinjauan Umum Sel Surya	15
a. Generasi Pertama	18
b. Generasi Kedua	20
c. Generasi Ketiga	21
2. <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC)	22
3. Radiasi Matahari	25
C. Titanium Dioksida	27
D. Zat Pewarna (<i>Dye</i>) pada DSSC	30
E. Tanaman sambang Darah	32
F. <i>Indium Tin Oxide</i> (ITO)	34
G. Metode <i>Doctor Blade</i>	35
H. UV-Vis <i>Spectrofotometer</i>	36
I. <i>X-Ray Diffraction</i>	39
J. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	44

K. <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS)	47
L. Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V)	49
M. Kerangka Berpikir	50

BAB III METODOLOGI PENELITIAN53

A. Waktu dan Tempat Penelitian	53
1. Waktu Penelitian	53
2. Tempat Penelitian	53
B. Alat dan Bahan	54
1. Peralatan Penelitian	54
2. Bahan Penelitian	55
C. Variabel Penelitian	56
1. Variabel Bebas	56
2. Variabel Terikat	56
3. Variabel Kontrol	57
D. Teknik Pengambilan Data	57
1. Pembuatan ekstrak daun Sambang Darah sebagai pewarna	57
2. Pengujian absorbansi ekstrak daun Sambang Darah	58
3. Persiapan substrat ITO dan tembaga sebagai elektroda	58
4. Pembuatan lapisan aktif titania	58
5. Pengujian karakteristik absorbansi dan struktur kristal lapisan titania	58
6. Deposisi pewarna pada lapisan titania	59
7. Pengujian karakteristik absorbansi dan struktur kristal lapisan titania yang telah disisipi pewarna	59
8. Pengujian karakteristik morfologi permukaan dan komposisi kimia lapisan titania dan lapisan titania yang telah disisipi pewarna	59
9. Pembuatan elektrolit	59
10. Pembuatan DSSC	60
11. Pengujian karakteristik arus-tegangan pada DSSC	60
E. Metode Analisis Data	60
F. Diagram Alir Tahap Penelitian	62

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN63

A. Hasil Ekstraksi Daun Sambang Darah	63
B. Hasil Sintesis Lapisan Aktif	64
C. Pengaruh Penyisipan Konsentrasi Pewarna Ekstrak Daun Sambang Darah Pada DSSC Berdasarkan Hasil Karakterisasi UV-Vis, XRD, EDS, dan I-V Test	65
1. Karakterisasi UV-Vis	65
a. Ekstrak daun Sambang Darah	66
b. Lapisan aktif TiO ₂	70

c. Lapisan Aktif TiO ₂ yang telah direndam dalam dye ekstrak daun Sambang Darah.....	72
2. Karakterisasi Struktur Kristal Dengan Menggunakan XRD.....	75
3. Karakterisasi Morfologi Permukaan Dengan Menggunakan SEM	78
4. Karakterisasi Komposisi Kimia Dengan Menggunakan EDS	82
5. Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V)	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	91
A. Kesimpulan	91
B. Saran	93
DAFTAR PUSTAKA	94
LAMPIRAN.....	100

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Puncak-Puncak Absorbansi Pada Uji UV-Vis Ekstrak Daun Sambang Darah.....	69
Tabel 2. Puncak-Puncak Absorbansi Pada Uji UV-Vis Lapisan TiO ₂	71
Tabel 3. Puncak-Puncak Absorbansi Pada Uji UV-Vis Lapisan TiO ₂ Dengan <i>Dye</i> Ekstrak Daun Sambang Darah	73
Tabel 4. Tabel Nilai Faktor Pengisian dan Efisiensi Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan.....	89

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Susunan Komponen DSSC (Jiao <i>et al.</i> , 2011: 132)	2
Gambar 2. Struktur Pita Energi Bahan Semikonduktor, Konduktor, dan Isolator (Ramadhani, 2012: 10)	9
Gambar 3. Struktur Pita Energi Pada Bahan Semikonduktor: (a) Struktur Pita Energi Semikonduktor (b) Keadaan Pita Energi Kosong (c) Keadaan Pita Energi Terisi (Reka Rio, 1980: 18) (Ariswan, 2010)	12
Gambar 4. Struktur Pita Energi Pada Semikonduktor Tipe-p (Sumarna, 2010: 14)	14
Gambar 5. Struktur Pita Energi Pada Semikonduktor Tipe-n (Sumarna, 2010: 12)	15
Gambar 6. Efisiensi Konversi Sel Surya Ideal Yang Dapat Dihasilkan Oleh Beberapa Jenis Material (Sze, 1981: 219)	18
Gambar 7. Sambungan p-n Semikonduktor (Gupta <i>et al.</i> , 2009: 5)	20
Gambar 8. Susunan Komponen DSSC (Jiao <i>et al.</i> , 2011: 132)	22
Gambar 9. Penyebaran Panjang Gelombang Cahaya Surya Di Atas Atmosfer Dan Di Permukaan Bumi (Pagliaro, 2008)	25
Gambar 10. Struktur Kristal Semikonduktor TiO_2 Dengan Fase <i>Rutile</i> (Diebolt, 2003:67)	28
Gambar 11. Struktur Kristal Semikonduktor TiO_2 Dengan Fase <i>Anatase</i> (Diebolt, 2003:67)	29
Gambar 12. Struktur Kristal Semikonduktor TiO_2 Dengan Fase <i>Brookite</i> (Stepanov, 2013: 61)	29
Gambar 13. Tanaman Sambang Darah	32
Gambar 14. Spektrofotometer UV-Vis hitachi UV-4250 (http://www.hitachi-higtech.com)	37
Gambar 15. Alat XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>) Shimadzu XRD-6000 (http://www.shimadzu.com)	39
Gambar 16. Difraksi Sinar-X Pada Bidang Kristal (Suryanayana, 1998: 50- 52)	40
Gambar 17. Skema Dasar SEM (Sujatno, 2015)	45
Gambar 18. Morfologi Permukaan Lapisan Aktif TiO_2 pada Perbesaran 40.000x (Rita, 2011)	47
Gambar 19. Hasil EDS Lapisan TiO_2 (Rita, 2011)	48
Gambar 20. I-V Meter Keithley 2401	50
Gambar 21. Susunan Komponen DSSC	60
Gambar 22. Diagram Alir Penelitian	62
Gambar 23. Larutan Ekstrak Daun Sambang Darah Dengan Varian Konsentrasi 63	

Gambar 24. Lapisan Aktif TiO ₂ Sebelum Dipanaskan Didalam Furnace (Kiri) dan Setelah Dipanaskan Didalam Furnace (Kanan)	64
Gambar 25. Perbandingan Lapisan Aktif TiO ₂ Yang Disisipi Larutan Ekstrak Daun Sambang Darah: (a) Konsentrasi 0 gram (b) Konsentrasi 5 gram (c) Konsentrasi 10 gram (d) Konsentrasi 15 gram	65
Gambar 26. Hasil Uji UV-Vis Pda Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 gram.....	66
Gambar 27. Hasil Uji UV-Vis Pada Ekstrak Daun Sambang Darah 1/128 Konsentrasi 10 gram	68
Gambar 28. Hasil Uji UV-Vis Pada Lapisan Aktif TiO ₂	70
Gambar 29. Hasil Uji UV-Vis Pada Lapisan Aktif TiO ₂ Dengan Dye Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 Gram	72
Gambar 30. Perbandingan Grafik Hasil Uji UV-Vis Pada Lapisan TiO ₂ Dengan Lapisan TiO ₂ Disisipi Pewarna Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 gram.....	74
Gambar 31. Difraktogram Uji XRD Pada Lapisan Aktif TiO ₂	76
Gambar 32. Difraktogram Uji XRD Pada Lapisan Aktif TiO ₂ Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah	77
Gambar 33. Foto Morfologi Permukaan Lapisan TiO ₂ Dari Hasil Uji SEM: (a) Perbesaran 5000x (b) Perbesaran10000x (c) Perbesaran 30000x	78
Gambar 34. Grafik Hubungan Antara Diameter Partikel Dengan Jumlah Partikel Pada Lapisan TiO ₂	79
Gambar 35. Foto Morfologi Permukaan Lapisan TiO ₂ Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah Dari Hasil Uji SEM: (a) Perbesaran 5000x (b) Perbesaran10000x (c) Perbesaran 30000x	80
Gambar 36. Grafik Hubungan Antara Diameter Partikel Dengan Jumlah Partikel Pada Lapisan TiO ₂ Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah	81
Gambar 37. Hasil Uji EDS Pada Lapisan Aktif TiO ₂	82
Gambar 38. Hasil Uji EDS Pada Lapisan Aktif TiO ₂ Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah.....	83
Gambar 39. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan Pada Sel Surya TiO ₂ Tanpa Dye	85
Gambar 40. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan Pada DSSC Dengan Dye Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 5 gram	86
Gambar 41. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan Pada DSSC Dengan Dye Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 gram	87
Gambar 42. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan DSSC Dengan Dye Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 15 gram.....	88

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Hasil Karakterisasi XRD	101
Lampiran 2. Perhitungan Parameter Kisi Kristal TiO_2 dan TiO_2 dengan <i>dye</i> ekstrak daun Sambang Darah	103
Lampiran 3. Data COD[96-900-8214]	108
Lampiran 4. Perhitungan Parameter Uji Arus Tegangan pada DSSC tanpa <i>dye</i> dan DSSC dengan <i>dye</i> ekstrak daun Sambang Darah	110
Lampiran 5. Dokumentasi Penelitian	113

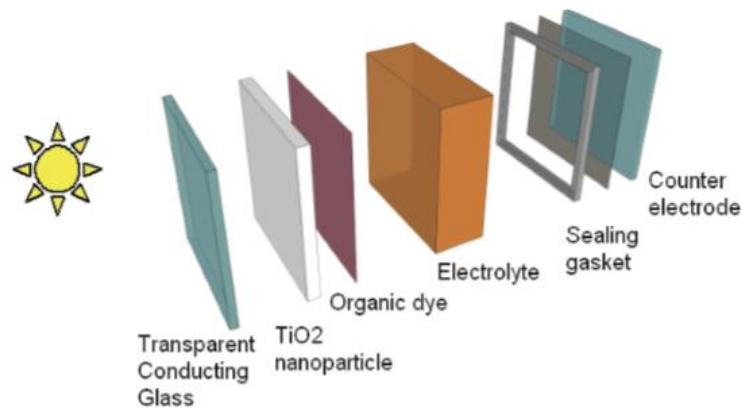
BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan sel surya generasi ketiga yang pada saat ini sedang giat dikembangkan karena proses fabrikasinya yang relatif murah dan mudah. Sel surya generasi ketiga merupakan sel surya yang dibuat dengan bahan baru selain silikon, seperti *carbon nanotube*, pewarna organik, plastik konduktif, *solar ink* menggunakan teknologi cetak konvensional dan masih banyak lagi (Prayoga dkk, 2014). DSSC pertama kami ditemukan oleh Profesor M. Gratzel pada tahun 1991, menggunakan semikonduktor TiO_2 yang dideposisikan pada substrat konduktif transparan dengan pewarna *ruthenium complex*. Molekul pewarna yang diadsorpsi pada semikonduktor oksida nanokristalin seperti TiO_2 digunakan untuk menyerap energi yang dibawa sinar matahari, oleh karena itu proses penyerapan cahaya (oleh pewarna) dan proses pengumpulan muatan (oleh semikonduktor) dipisahkan meniru proses fotosintesis. Efisiensi kerja yang telah dicapai oleh DSSC dalam mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik sebesar 10% (O'Regan & Gratzel, 1991).

Desain DSSC pada umumnya tersusun atas suatu set lapisan dengan komponen yang ditumpuk secara serial. Susunan komponen tersebut dimulai dari lapisan konduktor transparan, nanopartikel semikonduktor, pewarna, elektrolit dan elektroda *counter* yang ditutup dengan menggunakan gasket. Konfigurasi ini ditunjukkan pada gambar 1 (Jiao *et al.*, 2011: 131-132).



Gambar 1. Susunan Komponen DSSC (Jiao *et al.*, 2011: 132)

DSSC bekerja saat cahaya melakukan penetrasi pada kaca konduktif transparan dan mengenai semikonduktor dan pewarna. Pewarna menyerap sinar matahari dan memproduksi elektron bebas yang kemudian ditangkap oleh semikonduktor. Semikonduktor sendiri juga menyerap cahaya matahari dan memproduksi elektron sesuai dengan *bandgap* atau celah energi terlarang semikonduktor itu sendiri. Elektron yang telah diproduksi kemudian dialirkan menuju beban kemudian kembali lagi pada pewarna melalui elektroda *counter* dan elektrolit. Elektrolit berfungsi untuk mensuplai elektron pada pewarna dengan menggunakan reaksi redoks (Meng *et al.*, 2008).

TiO₂ merupakan salah satu semikonduktor yang paling sering digunakan sebagai komponen utama DSSC karena materialnya yang mudah didapatkan dengan biaya yang relatif murah. TiO₂ atau lebih sering disebut titania merupakan semikonduktor dengan *bandgap* 3,0 eV untuk fase *rutile* dan 3,2 eV untuk fase *anatase* (Hoffmann *et al.*, 1995). Fasa *anatase* lebih banyak digunakan sebagai komponen DSSC karena mempunyai struktur yang stabil pada suhu rendah (Tanaka *et al.*, 1991). Titania juga mempunyai indeks bias

(*n*) yang tinggi, yaitu 2,4 dalam bentuk bubuk dan 2,7 dalam bentuk lapisan tipis (Dongsun *et al.*, 2007).

Titania yang umum digunakan sebagai komponen DSSC berbentuk nanopartikel. Nanopartikel sendiri merupakan material dengan ukuran nano atau 10^{-9} m. Hal ini dikarenakan pada ukuran nano, material Titania mempunyai luas permukaan yang besar sehingga mempunyai efektifitas yang tinggi dalam mengadsorpsi pewarna. Luas permukaan partikel juga berpengaruh pada interaksi antar partikel dan juga kestabilan kristal. Lapisan Titania pada DSSC berfungsi untuk mengumpulkan muatan, dalam hal ini elektron (Mathew, 2014).

Salah satu komponen DSSC yang tidak kalah pentingnya adalah pewarna (*dye*). Pewarna pada DSSC digunakan untuk menyerap cahaya yang kemudian dikonversikan menjadi elektron bebas akibat proses eksitasi elektron oleh disebabkan karena partikel pewarna menerima kelebihan energi dari cahaya matahari yang diserap (O'Regan & Gratzel, 1991). Pada umumnya pewarna yang digunakan merupakan pewarna non-organik seperti *ruthenium complex* dan PGE, namun juga banyak dikembangkan pewarna organik seperti pewarna dari daun daunan dan buah-buahan. Pewarna organik digunakan karena mempunyai biaya produksi yang murah, ketersediaannya melimpah di alam, tidak berbahaya dan tidak beracun. Telah banyak dilakukan penelitian-penelitian mengenai bahan bahan organik yang mempunyai potensi sebagai pewarna pada DSSC. Pada awalnya, pewarna organik hanya menghasilkan efisiensi konversi energi kurang dari 1%, namun karena telah dikembangkan

dengan mencampurkannya dengan pewarna anorganik, efisiensinya konversi energinya mencapai 7,1% dan mempunyai stabilitas yang tinggi (Campbel *et al.*, 2007).

Sambang Darah (*Excoecaria Cochinchinesis*) merupakan tanaman hias yang berasal dari Indocina. Tanaman ini banyak ditemukan di hutan-hutan dan tumbuh liar. Terkadang juga dapat ditemukan di ladang yang sedikit terbuka. Tanaman ini biasanya digunakan oleh masyarakat di Indonesia dan dibudidayakan sebagai tanaman hias. Yang unik dari tanaman ini adalah daunnya yang berwarna merah pada bagian punggung dan berwarna hijau pada bagian muka. Hal tersebut terjadi karena pada daun tanaman sambang darah memiliki jumlah kartenoid yang lebih tinggi dari pada daun tanaman pada umumnya, sehingga berwarna merah. Kartenoid sendiri berbeda dengan klorofil, dimana klorofil menyerap cahaya tampak pada warna merah, jingga dan memantulkan warna hijau, sedangkan kartenoid sendiri menyerap cahaya ultraviolet dan cahaya tampak pada warna hijau, biru serta memantulkan warna merah (Dalimartha, 2007: 119-121). Klorofil dan kartenoid dapat memproduksi elektron dengan cara menyerap sinar matahari. Elektron ini kemudian diteruskan ke bagian tumbuhan yang lain untuk proses fotosintesis (Mark *et al.*, 2002).

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dilakukan, belum ada informasi yang menunjukkan adanya potensi daun Sambang Darah sebagai pewarna pada DSSC. Berdasarkan fakta tersebut, maka perlu dilakukan penelitian untuk menyelidiki potensi daun Sambang Darah sebagai pewarna pada DSSC. Salah

satu metode yang digunakan untuk membuat DSSC adalah dengan metode *Doctor Blade*. Metode *Doctor Blade* adalah metode dimana TiO_2 dideposisikan dengan cara meneteskan pasta TiO_2 pada substrat konduktif transparan dan meratakannya dengan batang pengaduk. Metode ini dapat menciptakan lapisan titania dengan ketebalan duapuluh hingga beberapa ratus mikron (Berni *et al.*, 2014)

DSSC dengan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengukur kemampuan absorbansi dari DSSC pada panjang gelombang tertentu, kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan struktur kristal dari nanokomposit TiO_2 dan pewarna, apakah sesuai dengan acuan atau tidak. DSSC juga dikarakterisasi dengan *Scanning Electron Microscopy* untuk mengetahui bentuk morfologi permukaan dari lapisan TiO_2 dengan pewarna dan mengukur ukuran partikel yang terbentuk, serta *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) untuk menentukan komposisi unsur-unsur penyusun lapisan tersebut. Karakterisasi yang terakhir adalah pengujian Arus dan Tegangan pada DSSC dengan variasi konsentrasi pewarna yang dilakukan dibawah penyinaran dengan daya tertentu untuk mengukur efisiensi daya listrik dari DSSC (Rita, 2011).

Berdasarkan uraian diatas, penulis melakukan penelitian mengenai potensi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada DSSC untuk mengukur efisiensi daya listrik dari DSSC tersebut. Sintesis DSSC

menggunakan metode *Doctor Blade* karena mudah dilakukan, tidak membutuhkan peralatan yang mahal dan juga aman (Howatt, 1947).

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat diidentifikasi permasalahan sebagai berikut:

1. Perlunya penelitian mengenai potensi daun Sambang Darah sebagai pewarna pada DSSC
2. Karakteristik kemampuan absorbansi, struktur kristal, morfologi permukaan dan komposisi kimia DSSC dengan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah perlu diketahui
3. Unjuk kerja daya listrik DSSC dengan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah perlu diketahui

C. Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Daun Sambang Darah yang digunakan mempunyai panjang 8-10 cm dan lebar 4-6 cm dengan warna daun hijau tua pada bagian muka dan merah tua pada bagian punggung
2. Ekstrak daun Sambang Darah dibuat dengan pelarut ethanol 96%
3. Pasta TiO_2 dibentuk dengan campuran PVA mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Rita (2011)

4. Elektrolit yang digunakan berbahan dasar KI (Kalium Iodida), *Acetonitrile*, dan *Iodine* mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Prayoga (2014)

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi dan batasan masalah diatas, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan titania terhadap kemampuan absorbansi cahaya lapisan titania?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan titania terhadap struktur kristal lapisan titania?
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan titania terhadap morfologi permukaan dan komposisi kimia lapisan titania?
4. Bagaimana pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada DSSC terhadap unjuk kerja daya listrik DSSC?

E. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut

1. Mengukur pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan titania terhadap kemampuan absorbansi cahaya lapisan titania

2. Menentukan pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan titania terhadap struktur kristal lapisan titania
3. Menentukan pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan titania terhadap morfologi permukaan dan komposisi kimia lapisan titania
4. Mengukur pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah pada DSSC terhadap unjuk kerja daya listrik DSSC

F. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Bagi Mahasiswa
 - a. Memberikan cara untuk membuat DSSC dengan metode *Doctor Blade*
 - b. Memberikan pengaruh konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah
 - c. Memberikan informasi hasil karakterisasi dengan spektrofotometer UV-Vis, XRD, SEM-EDS, dan I-V Test pada DSSC dengan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah
 - d. Sebagai referensi untuk penelitian lebih lanjut mengenai DSSC
2. Bagi Masyarakat

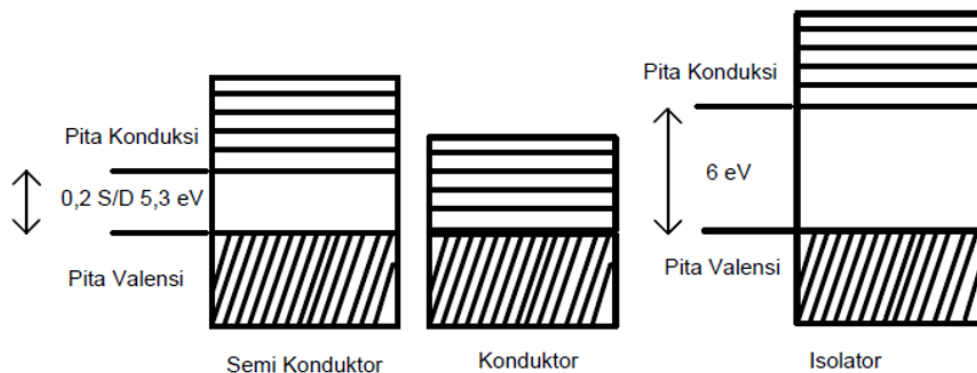
Penelitian ini dapat menjadi sumber referensi dan acuan yang dapat dikembangkan lebih lanjut

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Semikonduktor

Bahan dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan kemampuannya dalam menghantarkan arus listrik, yaitu konduktor, isolator dan semikonduktor. Perbedaan ketiga bahan tersebut dapat dilihat berdasarkan struktur pita energinya yang ditunjukkan dalam Gambar 1 (Ramadhani, 2012: 10).



Gambar 2. Struktur Pita Energi Bahan Semikonduktor, Konduktor, dan Isolator (Ramadhani, 2012: 10)

Konduktor adalah bahan logam yang mudah menghantarkan arus listrik dan memiliki resistivitas listrik yang sangat kecil, yaitu $10^{-5} \Omega.m$. Konduktor disebut penghantar listrik yang baik, karena konduktor tersusun oleh atom-atom dengan elektron terluar yang tidak berpasangan dengan elektron lain. Elektron terluar ini hampir bebas, sehingga sangat mudah untuk menghantarkan arus listrik. Gambar 2 memperlihatkan bahwa konduktor mempunyai kondisi dimana pita valensi dan pita konduksi saling menumpuk (*overlap*), sehingga menyebabkan elektron pada pita valensi dapat dengan

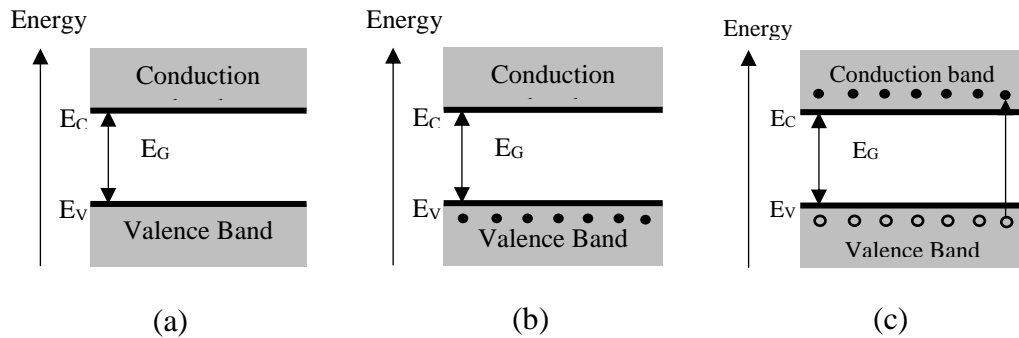
mudah menempati pita konduksi. Pita valensi sendiri merupakan pita energi yang diisi oleh elektron-elektron valensi dari suatu bahan (Wahyu, 2016: 8). Pengaruh medan listrik eksternal yang dikenakan pada konduktor akan mempengaruhi elektron-elektron terluar tersebut, kemudian elektron-elektron tersebut akan memperoleh energi tambahan dan memasuki tingkat energi yang lebih tinggi meskipun berada pada pita energi yang sama. Elektron tersebut akan menjadi elektron yang bebas dan gerakannya menghasilkan arus. Pita energi yang terisi elektron hampir bebas tersebut disebut pita konduksi (Ariswan 2010: 1).

Isolator merupakan penghantar listrik yang buruk, karena isolator tersusun atas atom-atom yang seluruh elektron pada tingkatan-tingkatan energi atomnya telah berpasangan. Isolator mempunyai pita valensi yang terisi penuh dengan elektron, sedangkan pita konduksinya kosong. Berdasarkan Gambar 1, kristal Intan (Karbon) mempunyai daerah terlarang yang tidak memenuhi keadaan kuantum (*bandgap*) dengan celah energi sebesar 6 eV. Medan listrik eksternal terlalu kecil untuk memindahkan elektron melewati *bandgap* tersebut, sehingga penghantaran arus listrik tidak dapat terjadi (Ariswan, 2010: 2). Isolator mempunyai nilai resistivitas lebih dari $10^{12} \Omega.m$ (Berger, 1997: 1).

Semikonduktor merupakan bahan dengan konduktivitas listrik berada diantara isolator dan konduktor. Semikonduktor pada umumnya diklasifikasikan oleh resistivitasnya pada suhu kamar, dengan nilai dalam rentang 10^{-2} - $10^9 \Omega cm$, dan sangat bergantung pada suhu. Pada suhu mutlak nol, kristal sempurna dari kebanyakan semikonduktor akan menjadi isolator,

apabila isolator didefinisikan sebagai bahan yang memiliki resistivitas diatas $10^{14} \Omega\text{cm}$. Semikonduktor mempunyai struktur pita energi yang hampir sama dengan isolator, hanya saja, celah energi terlarang atau *bandgap* (E_g) pada semikonduktor mempunyai nilai yang jauh lebih kecil daripada isolator. Celah energi terlarang yang nilainya tidak terlalu besar inilah yang menyebabkan semikonduktor mempunyai perilaku yang berbeda dari bahan isolator. Contoh bahan semikonduktor adalah germanium, silikon, dan selenium. Bahan semikonduktor pada saat ini digunakan sebagai bahan utama dari transistor, *switcher*, dioda, sel surya, detektor, dan thermistor. Alat alat ini secara umum digunakan sebagai komponen tunggal maupun komponen yang terintegrasi (Charles Kittel, 2005: 185).

Elektron pada pita valensi dapat menerima energi dari luar yang bisa berupa energi thermal atau foton. Jika energi yang diterima elektron lebih besar atau sama dengan E_g -nya, maka elektron-elektron tersebut mampu melewati celah energi terlarang dan berpindah ke pita konduksi sebagai elektron yang bebas. Elektron yang bebas tersebut akan meninggalkan kekosongan pada pita valensi yang disebut *hole*. *Hole* pada pita valensi dan elektron yang bebas pada pita konduksi itulah yang berperan sebagai penghantar arus pada semikonduktor, dimana elektron berperan sebagai pembawa muatan negatif, sedangkan *hole* berperan sebagai pembawa muatan positif (Suwitra, 1989: 187).



Gambar 3. Struktur Pita Energi Pada Bahan Semikonduktor: (a) Struktur Pita Energi Semikonduktor (b) Keadaan Pita Energi Kosong (c) Keadaan Pita Energi Terisi (Reka Rio, 1980: 18)

Berdasarkan gambar 3(a), setiap atom penyusun semikonduktor memiliki sejumlah elektron valensi pada kulit terluarnya yang menempati keadaan valensi. Keadaan valensi ini memiliki tingkat energi yang besarnya E_v . Elektron valensi ini berkontribusi pada pembentukan ikatan kovalen antara atom-atom penyusun kristal semikonduktor. Gambar 3(b) menunjukkan keadaan dimana elektron yang terbebas dari ikatan kovalen. Keadaan ini disebut keadaan konduksi dengan tingkat energi E_c . Apabila temperatur pada semikonduktor dinaikkan, maka akan ada penambahan energi termal yang menyebabkan terputusnya ikatan kovalen yang terbentuk. Terputusnya ikatan kovalen ini akan menyebabkan elektron bebas dalam keadaan konduksi dengan tingkat energi E_c . Gambar 3(c) menunjukkan keadaan elektron konduksi yang terjadi setelah adanya pemutusan ikatan kovalen. Elektron valensi dengan tingkat energi E_v akan berpindah ke keadaan konduksi dengan tingkat energi E_c . Selisih energi antara tingkat energi konduksi dengan tingkat energi valensi inilah yang dinamakan celah pita (*energy gap*). *Energy Gap* adalah energi

minimal yang dibutuhkan untuk memutus ikatan kovalen pada kristal semikonduktor (Ariswan, 2010: 3).

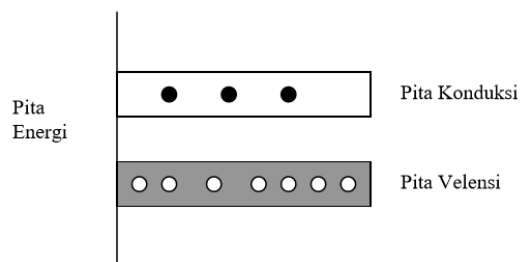
Semikonduktor terbagi menjadi dua jenis, yaitu semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik merupakan semikonduktor dalam bentuk paling murni. Bentuk paling murni diartikan bahwa semikonduktor tersebut tersusun atas satu unsur. Oleh karena tersusun atas satu unsur, sifat semikonduktor intrinsik ditentukan oleh sifat asli (karakteristik seperti resistivitas) dari unsur pembentuk semikonduktor itu sendiri. Semikonduktor intrinsik tersusun oleh atom atom dari golongan IV sistem periodik, seperti Silikon (Si) dan Germanium (Ge). Ciri-ciri pada semikonduktor intrinsik adalah (Suwitra, 1989: 222)

1. Jumlah elektron pada pita konduksi sama dengan jumlah hole pada pita valensi.
2. Energi Fermi (tingkat energi tertinggi yang ditempati elektron pada suhu $T = 0$ K atau pada keadaan dasar) terletak ditengah energi gap.
3. Elektron dan hole sama-sama memberikan sumbangan (peran sebagai muatan pembawa) yang besar terhadap terbentuknya arus.
4. Ada satu atom diantara 10^9 atom dalam bahan yang memberikan sumbangan terhadap terbentuknya hantaran listrik (Nyoman Suwitra, 1989: 222-227).

Semikonduktor ekstrinsik atau juga disebut semikonduktor tak murni merupakan semikonduktor yang terbentuk karena adanya ketidakmurnian (pengotor) yang menyebabkan jumlah *hole* atau elektron menjadi lebih banyak.

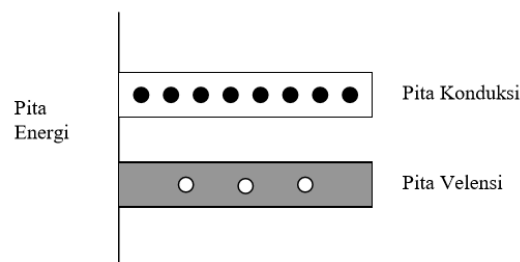
Kemampuan konduksi arus dari semikonduktor ekstrinsik sangat kecil karena sifat kelistrikannya dipengaruhi oleh jumlah pengotor (*impurity*) pada bahan tersebut. Proses pemberian pengotor pada semikonduktor murni disebut *doping* (Nyoman Suwitra, 1989: 228-229).

Bergantung pada jenis pengotor yang ditambahkan, semikonduktor ekstrinsik dibagi menjadi dua, yaitu tipe p dan tipe n. Semikonduktor tipe p terjadi karena terdapat jumlah *hole* yang melebihi jumlah elektron seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Semikonduktor ini biasanya tersusun atas atom-atom dari golongan IV yang diberi pengotor dengan atom-atom pada golongan III. Penambahan pengotor trivalen (atom dengan elektron valensi berjumlah tiga) telah menghasilkan sejumlah *hole*, namun masih ada sedikit elektron pada pita konduksi yang terkait dengan energi thermal pada suhu kamar. Jumlah *hole* pada bahan tersebut lebih banyak daripada jumlah elektronnya pada pita konduksi. Karena *hole* menjadi pembawa mutan mayoritas pada bahan semikonduktor tersebut, maka semikonduktor tersebut dinamakan semikonduktor tipe p (positif) (Sumarna, 2010: 13-14).



Gambar 4. Struktur Pita Energi Pada Semikonduktor Tipe-p (Sumarna, 2010: 14)

Semikonduktor tipe n akan terjadi apabila jumlah elektron melebihi jumlah *hole* pada bahan semikonduktor. Semikonduktor ini pada umumnya tersusun atas atom-atom golongan IV yang diberi pengotor atom-atom dari golongan V. Penambahan pentavalen (atom dengan elektron valensi berjumlah lima) akan menghasilkan sejumlah elektron pada pita konduksi, yakni elektron bebas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 . Hal ini terjadi karena elektron pada pita valensi tidak mempunyai pasangan *hole*. Kelebihan elektron inilah yang nantinya akan membawa muatan negatif pada semikonduktor. Karena pembawa muatan mayoritasnya adalah elektron, maka semikonduktor ini disebut tipe n (negatif) (Sumarna, 2010: 9-13).



Gambar 5. Struktur Pita Energi Pada Semikonduktor Tipe-n (Sumarna, 2010: 12)

B. Sel Surya

1. Tinjauan Umum Sel Surya

Penelitian tentang sel surya diawali dengan adanya temuan aliran listrik matahari (surya) oleh Alexander Edmond Becquerel, yang merupakan seorang ahli fisika yang berasal dari Jerman pada tahun 1839. Ia menangkap peristiwa dimana secara kebetulan berkas sinar matahari mengenai larutan elektrokimia yang mengakibatkan peningkatan muatan

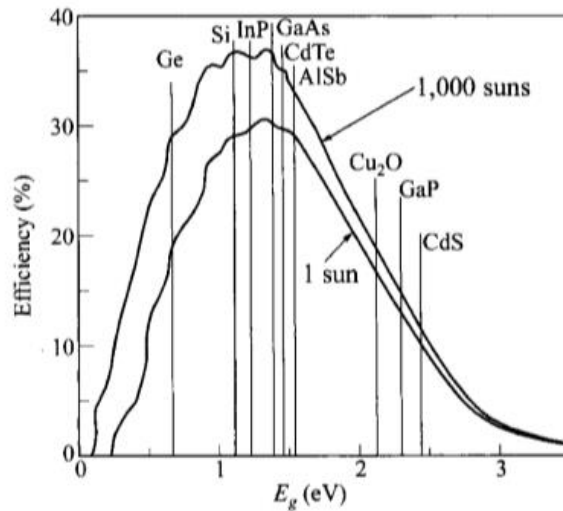
elektron (Anonim, 2009). Setelah satu abad berlalu, yakni pada awal abad ke-20, Albert Einstein mulai mengembangkan penemuan tersebut. Einstein menamai penemuan Alexander Edmond Becquerel dengan nama *Photoelectric effect*. Einstein melakukan pengamatan pada sebuah lempeng metal yang melepaskan partikel foton ketika sinar matahari mengenainya. Sinar matahari terus menerus mendesak atom metal sehingga terjadi perubahan tingkat energi pada elektron atom logam yang ditandai dengan munculnya energi baru dalam bentuk gelombang cahaya. Pada tahun 1930, Einstein membuat konsep baru Mekanika Kuantum yang digunakan untuk mengembangkan teknologi zat padat dari hasil percobaannya. Konsep Mekanika Kuantum Einstein dimanfaatkan oleh *Bell Telephone Research Laboratories* untuk membuat sel surya padat yang pertama. Kemudian pada tahun 1950-1960, sel surya diaplikasikan ke pesawat ruang angkasa (Galih Raditya, 2017).

Energi radiasi matahari merupakan energi terbarukan yang mempunyai jumlah yang sangat besar, terutama untuk negara-negara beriklim tropis seperti Indonesia. Karena hal inilah, pengembangan energi alternatif berbasis tenaga matahari akan menjanjikan (Yuliarto, 2008). Energi radiasi matahari dapat dimanfaatkan berdasarkan sistem konversi fotovoltaiik melalui suatu piranti optoelektronik yang disebut sel surya (*solar cell*). Keuntungan menggunakan sel surya diantaranya:

- a. Mengkonversi langsung energi matahari menjadi energi listrik
- b. Ramah lingkungan serta tanpa emisi saat dioperasikan

- c. Dapat diintegrasikan pada bangunan atau konstruksi
- d. Berbentuk modular sehingga jumlah sel surya yang dipakai dapat disesuaikan dengan kebutuhan. (Wolf, 1977)

Sel surya yang umum digunakan saat ini adalah sel surya dengan bahan dasar silikon. Silikon banyak digunakan sebagai sel surya karena mempunyai efisiensi yang tinggi dalam mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik sebesar 40% (Andrew, 2015). Namun sel surya berbahan dasar silikon juga mempunyai kelemahan yang diantaranya adalah proses fabrikasinya yang sulit dan relatif mahal. Sejak saat itulah sel surya mampu menarik perhatian banyak peneliti karena sel surya diperkirakan dapat menjadi pembangkit listrik utama di masa depan. Berbagai material kemudian diteliti untuk mendapatkan sel surya dengan efisiensi yang tinggi, proses fabrikasi yang mudah, dan relatif murah. Analisis teoritik yang berdasarkan celah pita energi menginformasikan bahwa beberapa jenis material diperkirakan mampu menghasilkan sel surya dengan efisiensi konversi lebih dari 30% seperti yang diperlihatkan pada gambar 6 (Sze, 1981: 219):



Gambar 6. Efisiensi Konversi Sel Surya Ideal Yang Dapat Dihasilkan Oleh Beberapa Jenis Material (Sze, 1981: 219)

Sel surya merupakan sebuah piranti yang berfungsi untuk mengkonversi energi sinar matahari menjadi energi listrik. Energi listrik tersebut diperoleh dari sel surya yang menerima cahaya matahari secara langsung dan menimbulkan efek fotovoltaiik (Yusmiati, 2014). Bahan utama yang digunakan sebagai sel surya adalah bahan semikonduktor (Nurhalim, 2017). Sel surya telah banyak dikembangkan dan kini terbagi menjadi tiga generasi.

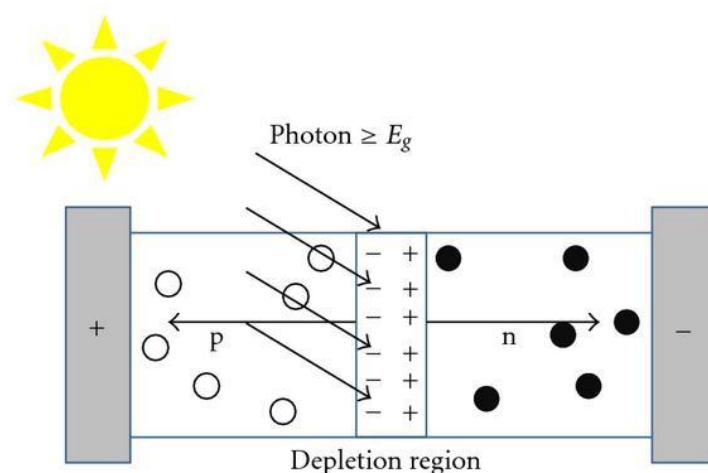
a. Generasi Pertama

Generasi pertama sel surya adalah sel surya dengan bahan dasar silikon kristal tunggal dan silikon multi kristal. Sel surya ini mempunyai efisiensi konversi energi sinar matahari yang paling tinggi diantara ketiga generasi sel surya yang lain, yakni mencapai 40% (Andrew, 2012). Dibalik nilai efisiensi konversi energinya yang

tinggi, sel surya ini memiliki beberapa kekurangan yang diantaranya adalah proses fabrikasinya yang susah dan mahal (Yuliarto, 2008).

Sel surya ini terdiri dari dua sambungan semikonduktor, yaitu semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Kedua jenis semikonduktor ini apabila disambungkan akan membentuk sambungan p-n (*p-n junction*) atau dioda p-n. Dalam sambungan p-n ini terdapat tiga daerah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Pada daerah tipe-p, mayoritas pembawa muatannya adalah *hole* (positif), sedangkan pada daerah tipe-n mayoritas pembawa muatannya adalah elektron (negatif). Daerah deplesi (pengosongan) merupakan daerah yang terbentuk akibat adanya sambungan p-n. Pada daerah deplesi, terbentuknya pasangan *hole* dan elektron membuat daerah tersebut tidak bermuatan (normal). Hal ini terjadi dikarenakan *hole* pada daerah tipe-p (mayoritas pembawa muatannya adalah *hole*) bergerak menuju daerah tipe-n (mayoritas pembawa muatannya adalah elektron) dan begitu pula sebaliknya, sehingga terbentuklah daerah deplesi atau sering juga disebut *barrier*. Perpindahan muatan ini terjadi karena perbedaan konsentrasi *hole* dan elektron pada kedua daerah. Perpindahan muatan ini disebut dengan arus difusi. Daerah tipe-p yang tadinya bermuatan netral menjadi bermuatan negatif dan daerah tipe-n yang tadinya bermuatan netral menjadi bermuatan positif. Berdasarkan hal ini, maka timbulah medan listrik internal yang arahnya dari n ke p (Reka Rio, 1989: 59). Pada saat cahaya matahari

melakukan penetrasi pada sambungan n daerah deplesi, maka akan muncul elektron bebas akibat dari eksitasi elektron yang disebabkan oleh penambahan energi (dari cahaya matahari). Elektron bebas ini kemudian bergerak menuju sambungan tipe-n (yang telah bermuatan positif) akibat medan listrik yang ditimbulkan kedua sambungan dan menimbulkan arus listrik yang disebut arus *drift*. Apabila terdapat kabel (beban) yang disambungkan pada kedua sambungan ini, maka elektron akan mengalir dan menimbulkan arus listrik (Diputra, 2008: 7).



Gambar 7. Sambungan p-n Semikonduktor (Gupta *et al.*, 2009: 5)

b. Generasi Kedua

Sel surya generasi kedua ini merupakan sel surya lapisan tipis, dimana semikonduktor dideposisikan pada substrat. Semikonduktor ini mempunyai prinsip kerja yang sama dengan sel surya generasi pertama. Salah satu hal yang membedakan sel surya generasi pertama

dan kedua adalah ukuran ketebalan dari sel surya itu sendiri. Sel surya generasi pertama mempunyai ketebalan lebih dari 0,3 mm, sedangkan untuk sel surya generasi kedua dibuat dengan ketebalan kurang dari 0,3 mm, bahkan hingga bentuknya hampir transparan (Sinamo, 2007). Sel surya ini memanfaatkan teknologi deposisi bahan seperti *DC Sputtering*, *Bridgeman* dan lain-lain. Sel surya generasi kedua ini juga membutuhkan biaya yang tinggi dalam proses fabrikasinya, namun dalam mendapatkan teknologi fabrikasinya masih dapat dijangkau (Yuliarto, 2008).

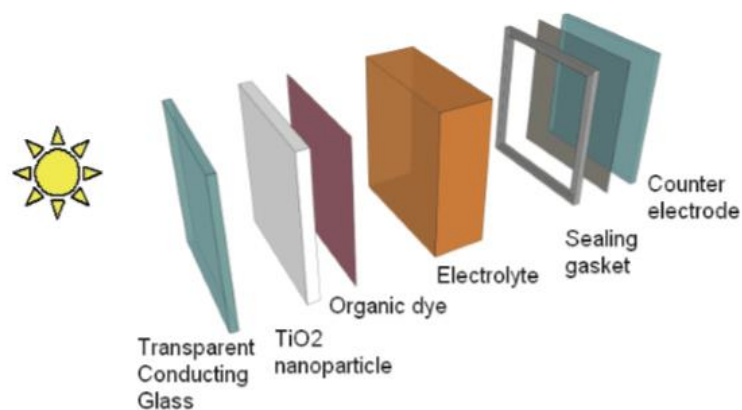
c. Generasi Ketiga

Sel surya generasi ketiga merupakan sel surya *multiple stacks bandgap*. *Multiple stacks bandgap* berarti pada sel surya tersebut terapat beberapa material semikonduktor yang mempunyai nilai *bandgap* yang berbeda-beda. Pada umumnya, sel surya ini dibuat dengan bahan baru selain silikon, seperti *carbon nanotube*, pewarna organik, plastik konduktif, *solar ink* dengan menggunakan teknologi cetak dan masih banyak lagi (Prayoga dkk, 2014). Salah satu sel surya generasi ketiga yang masih dikembangkan adalah sel surya fotoelektrokimia, yaitu sel surya yang menghasilkan energi listrik akibat efek fotokimia (proses kimia yang disebabkan oleh cahaya) yang menimbulkan elektron bebas. Sel surya fotoelektrokimia ini berbeda dengan sel surya generasi pertama maupun kedua yang memanfaatkan sambungan p-n. Pada sel surya fotoelektrokimia, yang

berperan penting dalam timbulnya arus listrik adalah efek fotokimia (Abdullah, 2009). Salah satu sel surya fotoelektrokimia yang masih dikembangkan adalah DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*). Efisiensi konversi energi yang telah dicapai DSSC mencapai 7,1% dan mempunyai stabilitas yang tinggi (Campbell *et al.*, 2007).

2. *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)

DSSC merupakan sel surya yang terbuat dari semikonduktor yang disisipi oleh suatu zat warna untuk meningkatkan efisiensi konversi sinar matahari. DSSC sendiri tersusun atas beberapa komponen yang ditumpuk secara serial dimulai dari lapisan konduktor transparan, nanopartikel semikonduktor, pewarna, elektrolit dan elektroda *counter* yang ditutup dengan menggunakan gasket seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 (Jiao *et al.*, 2011: 131-132).



Gambar 8. Susunan Komponen DSSC (Jiao *et al.*, 2011: 132)

DSSC bekerja cukup sederhana, ide utamanya adalah memisahkan proses penyerapan cahaya dari proses pengisian muatan, meniru proses pemanenan cahaya secara alami pada fotosintesis, dengan menggabungkan sensitizer alami dengan semikonduktor. DSSC yang umum dikembangkan adalah DSSC dengan bahan dasar semikonduktor titania (TiO_2) dan sebagian besar perangkat DSSC, pasangan $\text{I}^- / \text{I}_3^-$ sering digunakan sebagai elektrolit. Ini dikarenakan titania merupakan material yang murah, mudah didapatkan dan tersedia melimpah di alam (O'Regan dan Gratzel, 1991).

Proses didalam DSSC adalah sebagai berikut. Cahaya yang mengenai perangkat DSSC akan ditransmisikan melalui kaca konduktif. Partikel cahaya akan mengenai dye dan memberikan energi pada atom-atom dye. Atom-atom dye menerima energi dari cahaya, kemudian menghasilkan elektron bebas dari proses eksitasi pada elektron terluarnya. Elektron-elektron bebas tersebut nantinya akan mengisi pita konduksi daripada titania. Titania kemudian akan berperan seperti konduktor dan menghantarkan arus pada elektroda. Saat beban dikenakan pada elektroda, arus akan mengalir dan menuju pada elektroda negatif. Elektron yang dialirkan kemudian menuju kembali pada dye melalui elektrolit (Meng et al., 2008).

Elektrolit sendiri mempunyai peranan penting, yaitu untuk mensuplai elektron pada dye supaya tidak terjadi Rekombinasi. Rekombinasi disini adalah kembalinya elektron yang telah tereksitasi pada

pewarna itu sendiri (Haque *et al.*, 2005). Saat ini, elektrolit yang sering digunakan dalam DSSC dengan kelebihan dan kekurangannya sebagai berikut:

a. I^-/I_3^- dalam pelarut organik

Contohnya adalah asetonitril. Terkadang ditambahkan ion lithium untuk membantu transport elektron. Elektrolit ini baik untuk difusi ion dan dapat meresap dengan baik pada lapisan tipis titania. Stabilitas jangka panjang dari elektrolit ini terbatas oleh karena penguapan, sehingga menghambat penggunaannya yang luas (Jiao *et al.*, 2011).

b. Larutan ionik anorganik yang terbuat dari garam atau campuran garam

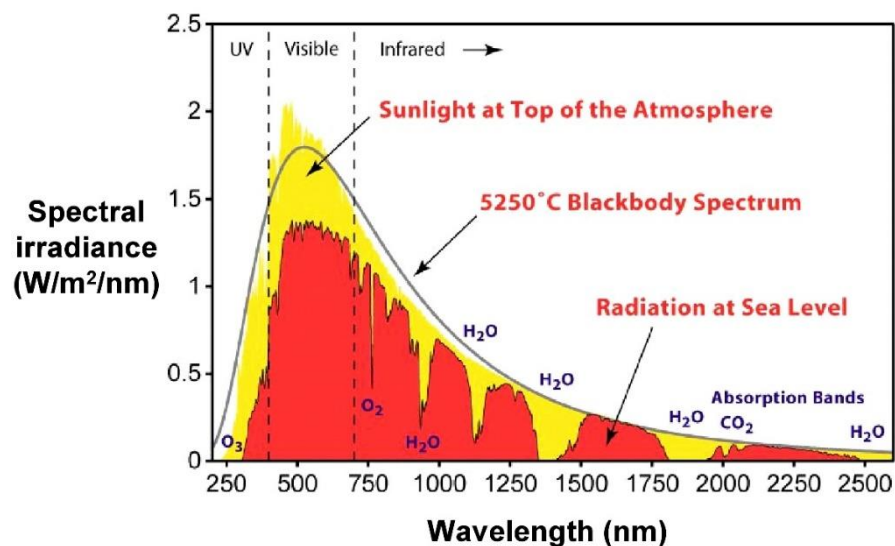
Mempunyai bentuk yang terlihat tampak seperti padatan, namun mempunyai sifat-sifat zat cair. Elektrolit ini mempunyai kinerja yang baik dalam konduktivitasnya, namun setelah jangka waktu yang panjang, efisiensinya menurun (Jiao *et al.*, 2011).

c. Elektrolit padat

Contohnya adalah CuI dan SpiroMeOTAD (Konno dkk, 2007). Untuk CuI, ketidakstabilan dan kristalisasi membuat elektrolit ini sulit untuk mengisi pori dari lapisan TiO_2 . Hal ini dapat diatasi dengan menambahkan cairan ionik kedalam elektrolit. Sedangkan untuk SpiroMeOTAD merupakan jenis khusus dari konduktor dengan pembawa muatan *hole* yang telah dikembangkan selama bertahun-tahun dan turut meningkatkan efisiensi dari DSSC hingga mencapai 5% (Yu, 2009).

3. Radiasi Matahari

Matahari merupakan salah satu sumber energi utama bagi kehidupan di bumi. Sumber energi matahari berasal dari reaksi fusi antara atom Hidrogen hingga menjadi Helium. Hal ini terjadi karena atom atom Hidrogen terkena tekanan dan suhu yang tinggi, sehingga menghasilkan energi yang besar dan berubah menjadi Helium. Temperatur inti matahari mencapai 15 juta kelvin dan dipancarkan hingga ke bumi dalam bentuk gelombang elektromagnetik (Tjasyono, 2003). Energi yang dibawa cahaya matahari hingga ke permukaan bumi mencapai 1000 W/m^2 pada kondisi siang hari dengan cuaca cerah. Intensitas radiasi terbesar matahari didapatkan pada sebagian hari-hari yang cerah dan berawan (Mintorogo, 2000).



Gambar 9. Penyebaran Panjang Gelombang Cahaya Surya Di Atas Atmosfer Dan Di Permukaan Bumi (Pagliaro, 2008)

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara panjang gelombang dengan intensitas radiasi oleh cahaya surya yang diterima oleh atmosfer dan permukaan bumi. Terdapat selisih intensitas seperti yang ditampilkan pada grafik, antara intensitas yang diterima oleh permukaan atmosfer dengan permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh karena beberapa cahaya dengan panjang gelombang tertentu diserap oleh O₃ pada panjang gelombang 0 – 1000nm. Selain itu nampak lubang-lubang pada grafik yang ditunjukkan oleh intensitas radiasi dipermukaan bumi, lubang ini disebabkan karena adanya absorpsi pada pita absorpsi untuk atom atom O₂, H₂O, dan CO₂ (Pagliaro, 2008).

Titanium mempunyai nilai *bandgap* sebesar 3,0 eV (fasa *rutile*) hingga 3,2 eV (fasa *anatase*). Nilai *bandgap* ini baik dalam menyerap cahaya matahari dengan panjang gelombang *ultraviolet* (UV) (Okamoto *et al.*, 1985). Berdasarkan persamaan energi foton dengan perumusan sebagai berikut

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Dengan h = konstanta *Planck* ($4,315 \times 10^{-15}$ eVs)

c = kecepatan cahaya ($2,99 \times 10^8$ m/s)

E = energi foton (eV)

λ = panjang gelombang foton (m)

maka titanium menyerap cahaya pada panjang gelombang 430 nm untuk fasa *rutile* dan 403 nm untuk fasa *anatase* dimana panjang gelombang ini berada pada rentang *violet* atau ungu (380-450 nm) (Bruno, 2005).

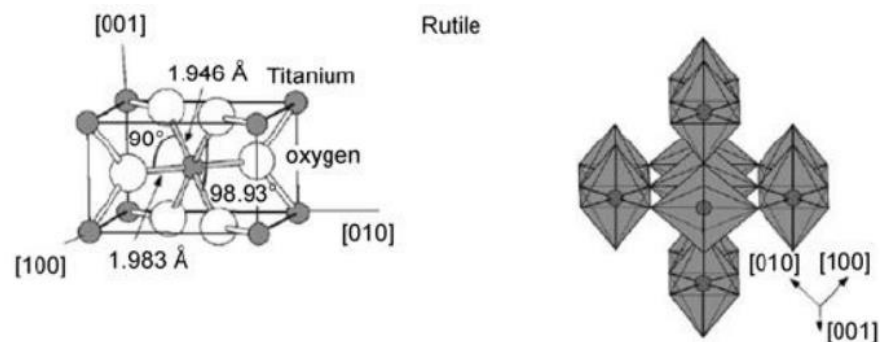
C. Titanium Dioksida (TiO₂)

Titanium Dioksida atau titania atau TiO₂ adalah salah satu semikonduktor yang telah dipelajari secara ekstensif sebagai fotokatalis sejak ditemukan efek sensitasi cahaya oleh Honda dan Fujishima pada tahun 1971. Titania sendiri mempunyai potensi yang tinggi sebagai foto-oksidasi, fotokatalis, stabilitas kimia yang tinggi, *non-toxic* material, serta mempunyai biaya produksi yang rendah. Titanium dioksida banyak dibuat dalam berbagai variasi bentuk mulai dari serbuk berukuran nano, koloid, dan lapisan tipis. Titania juga dapat diaplikasikan untuk lingkungan mulai dari *deodorization*, purifikasi air dan udara (Hashimoto, 2005: 1-2).

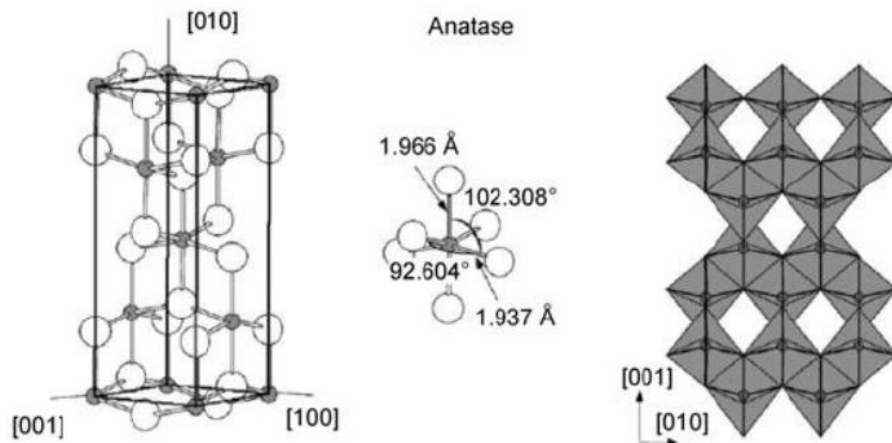
Titania mempunyai energi *bandgap* yang cukup besar, yaitu 3,2 hingga 3,8 eV. Berdasarkan informasi ini, titanium dioksida hanya memiliki efisiensi absorpsi sebesar 5% dari energi matahari pada rentang *ultraviolet*, yaitu pada rentang panjang gelombang 380-400 nm (Okamoto *et al.*, 1985). Untuk mengaktifkan pemanfaatan konversi energi matahari pada titania, maka memperlebar spektrum penyerapan energi matahari ke area cahaya tampak (dengan panjang gelombang 400–700 nm) menjadi hal yang penting. Salah satunya adalah memperkecil *bandgap* dari titania melalui proses *doping* dengan unsur lain seperti N, B, C, dan F. Namun masih ada cara lain lagi, yaitu dengan menggunakan *dye* atau pewarna. Pewarna disini dimaksudkan untuk menyerap energi matahari pada rentang panjang tampak yang akan

menghasilkan elektron valensi yang energinya digunakan untuk mengisi celah pita energi dari titania itu sendiri (Abdullah, 2009).

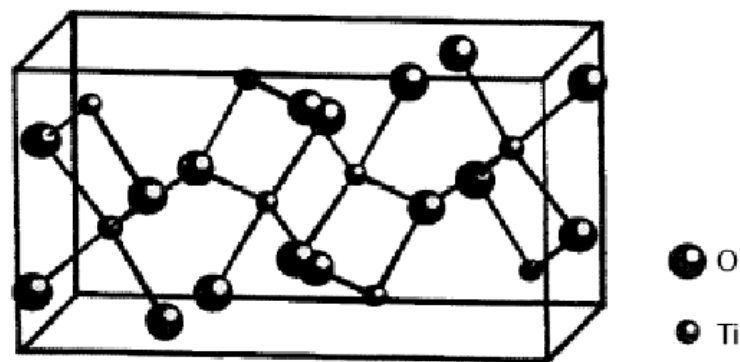
Titania memiliki 3 fasa struktur kristal, yaitu *anatase*, *rutile*, dan *brookite*. Fase Anatase dan rutile keberadaannya cukup stabil di alam. Fase *brookite* sulit ditemukan, biasanya terdapat dalam mineral dan sulit dimurnikan. Kemampuan fotoaktivitas semikonduktor TiO_2 dipengaruhi oleh morfologi, luas permukaan, kristalinisasi, dan ukuran partikel. Fase *anatase* pada titania mempunyai energi *bandgap* sebesar 3,2 eV, sedangkan fase *rutile* mempunyai energi *bandgap* sebesar 3,0 eV. Fase *anatase* mulai muncul pada rentang 120–500°C dan cenderung bertransformasi menjadi *rutile* pada suhu 700°C (Matthews, 1992). Fase *brookite* pada titania sulit untuk dipreparasi serta keberadaannya tidak stabil sehingga fase *anatase* yang cenderung digunakan dan dimanfaatkan pada berbagai aplikasi industri (Hashimoto, 2005).



Gambar 10. Struktur Kritisal Semikonduktor TiO_2 Dengan Fase *Rutile* (Diebolt, 2003:67)



Gambar 11. Struktur Kristal Semikonduktor TiO_2 Dengan Fase *Anatase* (Diebolt, 2003:67)



Gambar 12. Struktur Kristal Semikonduktor TiO_2 Dengan Fase *Brookite* (Stepanov, 2013: 61)

Titania dengan fase *anatase* mempunyai aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan fase *rutile*, hal ini dikarenakan fase *anatase* mempunyai luas permukaan yang lebih besar dan ukuran partikel yang lebih kecil. Berdasarkan hal ini, interaksi antar partikel fase *anatase* menjadi lebih besar dan membentuk kestabilan kristal yang tinggi. Interaksi antar partikel dalam fase *anatase* ini mempengaruhi nilai konduktifitas dari semikonduktor itu sendiri (Matthews, 1992)

D. Zat Pewarna (*dye*) pada DSSC

Pewarna (*dye*) pada DSSC merupakan salah satu komponen penting. Fungsi pewarna sendiri adalah melakukan absorpsi cahaya pada permukaan titania, sehingga pewarna mendapatkan tambahan energi dari cahaya yang diserapnya. Energi yang diserap oleh atom-atom pewarna membuat atom valensi pada *dye* dalam keadaan tereksitasi. Elektron tersebut kemudian ditransfer material titania sebagai energi yang akan mengisi celah pita energi pada titania dan sebagai pembawa muatan negatif yang pergerakannya menimbulkan arus listrik. Saat celah pita energi pada titania terisi, maka elektron pada titania berada dalam keadaan valensi dan menjadi bebas. Berdasarkan proses inilah DSSC menghasilkan arus listrik (Jiao *et al.*, 133).

Pada mulanya desain dari DSSC sendiri menggunakan senyawa logam transisi (misalnya *ruthenium polypyridyl complexes*) sebagai *sensitizer* karena kemampuan penyerapannya yang kuat, waktu eksitasi yang lama, serta transfer muatan dari logam ke *ligan* yang lebih efisien. *Ligan* merupakan ion atau molekul yang melekat pada atom logam karena ikatan koordinat. Namun karena biaya yang tinggi dari material *ruthenium* (dengan harga > \$1.000/gram) menjadi penghambat dari material tersebut sebagai *sensitizer* dalam DSSC. Meskipun sangat efektif dengan efisiensi saat ini hingga mencapai 11%, sintesis yang dilakukan untuk *sensitizer* jenis ini tidak ramah lingkungan, sehingga dibutuhkan *sensitizer* yang lebih sederhana, ramah lingkungan, murah, dan juga aman sebagai *sensitizer* alternatif (Gratzel, 2005).

Pewarna organik, yang termasuk pigmen alami dan pewarna organik sintesis alami, memiliki struktur akseptor-donor yang sering disebut juga dengan *push-pull architecture* yang dapat meningkatkan densitas arus hubung singkat dengan meningkatkan penyerapan cahaya pada rentang warna merah dan infra merah. Pigmen alami seperti klorofil, karoten, antosianin tersedia bebas di daun tanaman, bunga, dan buah buahan. Dan pigmen seperti inilah yang memenuhi persyaratan sebagai *sensitizer* alternatif pada DSSC. Secara eksperimen, *dye sensitizer* alami untuk sel surya TiO_2 telah mencapai efisiensi 7,1% serta mempunyai stabilitas yang tinggi (Campbell et al., 2007).

Bahkan yang lebih menjanjikan adalah pewarna organik sintetis. Berbagai jenis dari pewarna organik sintetis baru-baru ini telah dikembangkan, termasuk *indolic dyes* (D102, D149) (Konno et al., 2007), dan asam *cianoacrylic* (JK, C209). Sama seperti beberapa pewarna alami, mereka tidak terkait dengan ion logam apa pun, ramah lingkungan dan mudah disintesis dari sumber daya yang melimpah dalam skala besar. Efisiensi yang didapatkan telah mencapai level tinggi, yaitu pada rentang 10,0-10,3% (Zeng et al., 2010). Material pewarna organik sintetis ini relatif murah, dengan harga sepersepuluh dari harga pewarna Ru yang sesuai. Percobaan pemaparan cahaya pada pewarna organik sintetis telah menegaskan bahwa material tersebut memiliki stabilitas jangka panjang dengan efisiensi sebesar 80% yang telah dipertahankan setelah 1.200 jam pemaparan cahaya pada temperatur 60 ° C (~ 5 juta turnover). Produksi komersial pewarna sintetis ini telah didirikan di Cina tahun 2011. Pewarna tunggal biasanya memiliki spektrum adsorpsi terbatas,

sehingga beberapa kelompok penelitian menggunakan beberapa jenis pewarna untuk menambah transfer energi dan saling mengimbangi antar pewarna serta telah mencapai hasil yang baik (Hardin et al., 2010).

E. Tanaman Sambang Darah

Sambang Darah (*Excoecaria cochinchinensis*) merupakan tumbuhan berkhasiat obat yang berasal dari China dan Asia Tenggara. Di Indonesia, tanaman ini sering disebut Remek Daging (untuk daerah Jawa Tengah), Sambang Darah (untuk daerah Melayu dan Betawi), dan Ki Sambang. Selain dikenal sebagai tanaman obat, tanaman ini mempunyai sifat *toxic* terhadap ikan, dan mempunyai kekuatan untuk membunuh pada serangga. Namun demikian, tanaman ini masih tergolong aman untuk manusia dan dipakai sebagai tanaman hias (Dalimartha, 2007: 119-121).



Gambar 13. Tanaman Sambang Darah

Sambang Darah merupakan tanaman dengan ciri-ciri mempunyai tinggi antara 0,5 – 3 meter. Batangnya berkayu dan mempunyai cabang yang banyak. Apabila batang tersebut digores, akan mengeluarkan getah putih yang beracun. Rantingnya beruas dengan warna hijau-keunguan. Daunnya tunggal dan berbentuk memanjang yang mempunyai letak saling berhadapan dan atau berseling-selingan. Daunnya mempunyai ukuran dengan panjang dari 4 – 15 cm dan lebar 1,5 – 4,5 cm. Warna daunnya dibagian atas hijau tua, sedangkan dibagian bawah berwarna merah tua. Daun mudanya mempunyai warna mengkilap. Warna daun dari Sambang Darah ini dapat berpadu di bawah sinar matahari, sehingga tanaman ini sering dijadikan tanaman hias dan tanaman pagar di negara Eropa (Sastrapradja & Bimantoro, 1983: 90-91).

Tanaman ini bergetah racun, dalam konsentrasi 1:500.000, cukup untuk menjadikannya racun bagi ikan dalam waktu yang singkat (Heyne, 1913). Selain itu, tanaman ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengobati pendarahan dan *datang bulan* berkepanjangan. Tanaman ini mengandung asam *shikimat*, *tanin*, asam *behenat*, asam *palmat*, asam *sterat*, *excolabdone A, B, & C*, *triterpenoid eksokarol*, *excoecariodes A*, dan *B*. Bagian dari tanaman yang dipakai adalah daun, ranting, dan akarnya yang mempunyai sifat pedas, hangat, dan beracun. Obat yang berasal dari tanaman ini mampu membunuh parasit (*parasitoid*), penghilang gatal, dan penghenti pendarahan (*hemostatis*) (Smith, 1922: 112-119).

Daun sambang darah mempunyai kandungan senyawa *flavonoid* yang tinggi yang menyebabkan daunnya mempunyai banyak warna. *Flavonoid*

sendiri terbagi menjadi antosianin, klorofil, dan karotena. Flavonoid mengabsorpsi cahaya pada spektrum UV (karena memiliki banyak gugus kromofor). Flavonoid termasuk senyawa polar, karena mempunyai sejumlah gugus hidroksil atau gugus gula. Hal ini memungkinkan flavonoid dapat larut dalam pelarut polar seperti etanol, metanol, butanol, aseton, air dan lain-lain (Markam, 1988). Daun Sambang Darah dapat dijadikan sebagai pewarna pada DSSC dengan diekstraksi terlebih dahulu. Ekstraksi dilakukan dengan menggunakan etanol karena etanol tidak bereaksi dengan titania dan merupakan pelarut yang murah dan mudah didapatkan (Prayoga *et al.*, 2014).

Senyawa *flavonoid* (seperti antosianin, klorofil, dan karoten) yang menerima tambahan energi dari cahaya matahari yang diserapnya akan menghasilkan elektron valensi (elektron bebas) yang digunakan untuk reaksi fotosintesis (Campbel *et al.*, 2007). Pada saat senyawa ini digunakan sebagai pewarna pada DSSC, senyawa ini akan menghasilkan elektron bebas yang digunakan sebagai pembawa muatan yang akan menimbulkan arus listrik dan sebagai energi tambahan yang akan mengisi celah pita energi dari material semikonduktor pada DSSC itu sendiri. Berdasarkan hal ini, peran pewarna sangat penting dalam menghasilkan besar kecilnya arus listrik (Jiao *et al.*, 2011: 136).

F. Indium Tin Oxide (ITO)

Kaca konduktif TCO (*Transparent Conducting Oxide*) merupakan material penting yang dibutuhkan dalam berbagai aplikasi teknologi di industri

modern. TCO ini digunakan mulai dari sel surya, layar LCD (*Liquid Crystal Display*), hingga sensor cahaya. Sifat konduktif dari TCO ini disebabkan karena adanya ikatan kimia yang dimiliki struktur penyusunnya berjenis ikatan ionik (ikatan antara atom logam dengan oksigen) yang memungkinkan atom terlepas dengan sendirinya dari posisi normal ke posisi lain. Dengan terlepasnya atom, maka elektron atom tersebut juga terlepas dari struktur oksida tersebut. Semakin banyaknya atom yang terlepas dari posisi normalnya, maka semakin banyak pula jumlah elektron bebas dalam material TCO tersebut, sehingga apabila material TCO tersebut dikenai medan listrik, maka elektron tersebut akan bergerak dan menghasilkan arus listrik. Karena pergerakan elektron dalam medan listrik, material TCO berubah sifat menjadi konduktif. Namun material TCO ini masih sulit didapatkan di Indonesia (Wibowo, 2013).

Salah satu material TCO yang umum digunakan adalah ITO (*Indium Tin Oxide*). ITO sendiri merupakan TCO yang paling banyak diaplikasikan pada piranti modern. TCO merupakan material yang sangat mahal, sehingga banyak peneliti berlomba-lomba untuk membuat TCO dengan komposisi yang berbeda-beda, namun mempunyai nilai jual yang relatif rendah dan kualitas yang baik (Arini dkk, 2017).

G. Metode *Doctor Blade*

Doctor Blade merupakan salah satu teknik yang banyak digunakan untuk memproduksi lapisan tipis pada permukaan area yang luas. Metode ini

merupakan metode dengan proses yang relatif baru yang pada awalnya dikembangkan selama tahun 1940-an sebagai metode pembentukan lembaran tipis bahan piezoelektrik dan kapasitor, hingga sekarang menjadi metode pelapisan yang dapat diterima (Howatt, 1947). Metode ini memanfaatkan bilah pisau atau pipa kaca pejal yang digunakan untuk meratakan bahan yang berbentuk sol-gel pada suatu permukaan substrat. Metode ini cukup sederhana untuk diaplikasikan, yaitu dengan menuangkan bahan sol-gel yang akan dilapiskan pada suatu permukaan substrat yang dibentangkan. Bahan sol-gel diratakan dengan bilah pisau atau pipa pejal kaca dengan cara ditarik, didorong atau diroll hingga menutupi seluruh permukaan substrat. Ketebalan yang dapat diciptakan dengan metode ini adalah duapuluh hingga beberapa ratus mikron bergantung pada kecepatan tarikan, dorongan atau pengerollan dari alat peratanya (Bernie *et al.*, 2014).

H. UV-Vis Spectrofotometer

Spektrofotometer UV-Vis merupakan spektrofotometer dengan sumber cahaya elektromagnetik pada rentang ultra ungu hingga cahaya tampak yang digunakan untuk mengukur kemampuan absorbansi, transmitansi, dan reflektansi suatu bahan. Spektrofotometer merupakan alat untuk mengukur energi secara relatif jika energi tersebut ditransmisikan, direfleksikan atau diemisikan sebagai fungsi dari panjang gelombang. Spektrofotometer terdiri dari spektrometer dan fotometer. Spektrometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur energi secara relatif apabila energi tersebut ditransmisikan,

direfleksikan, atau diemisikan sebagai fungsi dari panjang gelombang. Sedangkan fotometer merupakan alat pengukur cahaya yang ditransmisikan, direfleksikan maupun diabsorpsi (Khopkar, 1990).



Gambar 14. Spektrofotometer UV-Vis Hitachi UV-4250
(<http://www.hitachi-hightech.com>)

Prinsip dasar spektrofotometer yaitu apabila suatu sinar dengan karakteristik tertentu melalui sebuah senyawa (larutan, padatan maupun bubuk), maka senyawa tersebut akan menyerap sinar tersebut pada panjang gelombang tertentu (Suhartono, 1989). Ketika sinar tersebut (I_0) melewati senyawa tersebut, maka sinyal tersebut akan keluar dengan intensitas yang berbeda (I) karena adanya serapan oleh senyawa yang dilewati dengan intensitas tertentu (I_a). Gejala dari cahaya yang melewati senyawa tersebut disebut Transmittansi (T). Adapun Transmittansi dirumuskan sebagai berikut (Muhammad, 2016: 27):

$$I = TI_0$$

$$T = \frac{I}{I_0}$$

$$T = \frac{I_0 e^{-\alpha l}}{I_0}$$

$$T = e^{-\alpha l} \quad (2)$$

dengan T = transmitasi

I = intensitas cahaya yang melewati larutan

I_0 = intensitas cahaya mula-mula

α = koefisien absorpsi

l = ketebalan sampel (m)

Berdasarkan hukum *Lambert-Beer*, absorbansi dari suatu materi akan sebanding dengan ketebalan, konsentrasi, dan absorptivitas molar larutan tersebut. Apabila ketebalan dari suatu materi (b) atau konsentrasi materi (c) yang dilewati bertambah, maka intensitas cahaya yang diserap akan menjadi lebih banyak. Dengan begitu, absorbansi suatu materi berbanding lurus dengan ketebalan dan konsentrasi materi. Selain itu, faktor yang berpengaruh terhadap besar kecilnya absorbansi adalah absorptifitas molar (ϵ) dari materi yang diukur itu sendiri. Sehingga absorbansi juga dapat dirumuskan sebagai berikut (Fessenden, 1995):

$$A = \epsilon b c \quad (3)$$

Hasil dari uji karakterisasi dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis ini berupa grafik hubungan antara panjang gelombang dengan absorbansi. Dalam penelitian ini, spektrofotometer UV-Vis digunakan sebagai alat uji secara kualitatif yang akan menampilkan puncak absorbansi pada panjang gelombang tertentu. Puncak absorbansi panjang gelombang pada pengujian ekstrak daun Sambang Darah ini digunakan untuk menentukan pada spektrum apa daun Sambang Darah menyerap sejumlah energi foton untuk mengeksitasi elektron valensi yang akan digunakan sebagai elektron donor untuk DSSC

(Halme, 2002). Ekstrak daun Sambang Darah mempunyai puncak absorbansi pada panjang gelombang 200-400 nm yang merupakan spektrum UV (Markam, 1998) karena kandungan *flavonoid* yang banyak, sedangkan titania mempunyai puncak absorbansi pada rentang 380-450 nm (Okamoto *et al.*, 1985; Bruno, 2005).

I. *X-Ray Diffraction (XRD)*

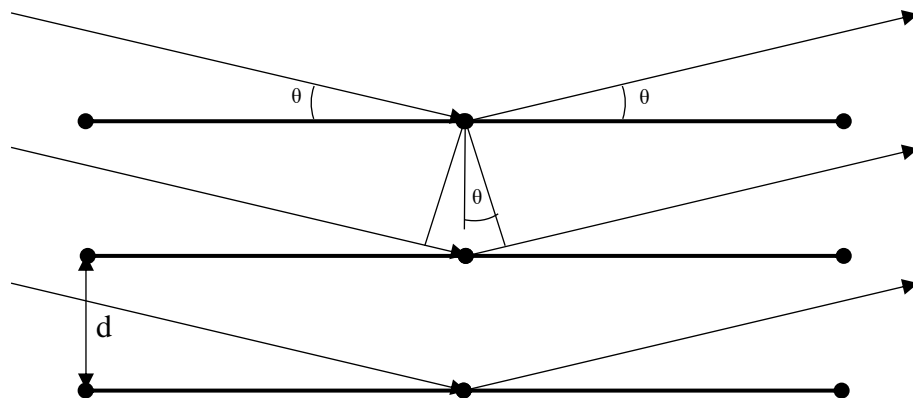
XRD atau *X-Ray Diffraction* merupakan suatu metode yang digunakan untuk menganalisa struktur suatu benda dengan memanfaatkan difraksi sinar-X. Sinar-X yang karakteristik mempunyai panjang gelombang yang seorde dengan jarak antar atom dalam suatu material.



Gambar 15. Alat XRD (*X-Ray Diffraction*) Shimadzu XRD-6000 (<http://www.shimadzu.com>)

Suatu material tersusun atas atom-atom yang memiliki posisi tertentu. Susunan material ini dibagi menjadi 2, yaitu kristal dan non kristal (*amorf*). Material kristal tersusun atas atom-atom yang memiliki posisi yang beraturan dan berkesinambungan. Sedangkan non kristal (*amorf*) merupakan material yang tersusun atas atom-atom dengan posisi yang tidak beraturan. Kegunaan

metode difraksi sinar-X antara lain untuk menentukan struktur material yang diuji berbentuk kristal atau non kristal, menentukan struktur kristal dalam bentuk dan ukuran sel satuan kristal, menentukan jumlah atom per sel satuan, menentukan indeks *miller* bidang kristal, analisis kimia dalam mengidentifikasi jenis kristal, menentukan kemurnian relatif dan derajat kristanilitas material, mendeteksi senyawa baru, dan mendeteksi kerusakan oleh suatu perlakuan. Di bawah ini merupakan gambar dari alat XRD.



Gambar 16. Difraksi Sinar-X Pada Bidang Kristal
(Suryanayarana, 1998: 50-52).

Gambar 16 menunjukkan suatu berkas sinar-X dengan panjang gelombang λ mengenai bidang kristal yang mempunyai jarak d dengan sudut θ . Sinar tersebut akan dipantulkan kembali dengan sudut yang sama dan keluar dari bidang kristal. Sinar-X yang dipantulkan dengan sudut θ hanya dapat terlihat jika berkas dari setiap bidang yang berdekatan saling menguatkan (berinterferensi konstruktif). Oleh sebab itu, jarak tambahan satu berkas yang dihamburkan dari setiap bidang yang berdekatan dan menempuh jarak yang sesuai dengan perbedaan kisi mempunyai nilai yang sama dengan panjang

gelombang $n\lambda$. Syarat pemantulan yang konstruktif (saling menguatkan) dinyatakan sebagai berikut:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4)$$

Dimana n = orde difraksi (bilangan bulat)

λ = panjang gelombang sinar-X (m)

d = jarak bidang kristal (m)

θ = sudut difraksi

Rumus diatas dikenal dengan hukum *Bragg*. Arah berkas sinar-X dipantulkan oleh geometri kisi kristal. Sedangkan geometri kisi kristal sendiri tersusun atas orientasi dan jarak antara bidang kristal. Untuk suatu kristal kubus simetrik, jika ukuran struktur sel satuan bernilai a , maka sudut-sudut dimana berkas sinar-X yang didifraksikan oleh bidang kristal (hkl) dapat dihitung melalui rumus jarak antar bidang (tetragonal):

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2+k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5)$$

Untuk memastikan bahwa hukum *Bragg* dapat terpenuhi dan pemantulan dari berbagai bidang kristal dapat terjadi, maka penting untuk memberikan nilai ambang pada harga θ dan λ (Kittle, 2005).

Pada XRD terdapat filamen katoda yang dipanaskan, sehingga diproduksi elektron bebas yang kemudian dikenai medan listrik antara anoda dan katoda. Karena pengaruh medan listrik, maka elektron bebas akan bergerak menuju anoda dengan kecepatan yang tinggi. Elektron kemudian menumbuk anoda, dan elektron pada atom atom anoda mengalami proses eksitasi dan deeksitasi elektron yang menyebabkan terjadinya sinar-X karakteristik. Akibat

peristiwa tumbukan ini, tentunya yang terbentuk bukan hanya sinar-X karakteristik saja, namun ada sinar-X kontinyu yang kemudian diberikan filter, supaya sinar yang keluar menuju target adalah sinar-X karakteristik. Sinar-X karakteristik kemudian dipaparkan pada sampel, dan terjadilah proses difraksi dimana berkas sinar-X akan ada yang ditransmisikan dan direfleksikan. Disekeliling target, akan ada detektor yang akan menangkap berkas sinar-X yang dipantulkan. Sinar-X yang dipantulkan kemudian diolah menjadi sinyal digital dan diproses oleh program yang menghasilkan grafik hubungan antara sudut 2θ dengan intensitas (Suhayana, 2012).

Difraksi sinar-X merupakan metode yang penting untuk mengkarakterisasi struktur kristal material, karena teknik ini biasanya digunakan untuk analisis parameter kisi kristal tunggal, tekstur atau bahkan stress analisis bahan polikristalin (seperti serbuk). Pola difraksi yang dihasilkan oleh setiap padatan kristalin sangat khas, bergantung pada kisi kristal, unit paramter, dan panjang gelombang sinar-X yang digunakan. Oleh sebab itu, sangat kecil kemungkinan dihasilkan pola difraksi yang sama untuk padatan kristalin yang berbeda (Warren, 1969).

XRD merupakan satu-satunya metode analitik yang mampu memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif tentang *compound* yang bersifat kristal (atau fasa) yang terdapat dalam suatu zat padat. Syarat-syarat yang dibutuhkan adalah

1. Jarak antar atom dalam suatu zat padat yang akan diteliti harus mempunyai nilai (orde) yang sama dengan panjang gelombang sinar-X.

2. Pusat penghamburan secara spasial harus terdistribusi dalam aturan yang diperbolehkan (lingkungan yang muncul dalam kristal).

Pada era perkembangan teknologi ini, teknik analisis yang digunakan untuk menganalisis data hasil XRD menggunakan *software* komputer. Dengan adanya beberapa *software* analisis XRD telah mengurangi pekerjaan dan waktu yang dibutuhkan untuk menganalisis struktur dan komposisi dari suatu material. *Software* yang digunakan pada penelitian ini untuk menganalisis hasil data XRD adalah *Match!*. Cara kerja dari program *Match!* adalah dengan membandingkan data antara hasil sampel dengan material yang telah diketahui pada ICDD (*International Center of Diffraction Data*) yang merupakan nama baru dari JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*).

Data dari JCPDS berbentuk kartu yang berisi parameter data kristal yang ditemukan perorangan, sedangkan pada ICDD berbentuk jurnal dan kartu data, sehingga terdapat penjelasan dari kristal yang diteliti oleh seseorang. Data dari ICDD sendiri telah digunakan untuk pengolahan data XRD pada program *Match!*. Analisis struktur dari suatu material meliputi pengukuran parameter kisi dari kristal (dimensi unit sel) dan model struktur kristal. Dalam teknik ini, penggunaan kristal tunggal merupakan metode yang dianjurkan jika memungkinkan. Untuk penggunaan serbuk dimana sampel yang akan diteliti merupakan polikristal yang terdiri dari arah bidang kristal acak (random) dalam jumlah yang sangat banyak juga dapat digunakan. Untuk material yang bersifat campuran, maka pola XRD yang dihasilkan merupakan penjumlahan dari masing-masing material (fasa). Oleh karena itu, pola difraksi dari fasa tunggal

dapat digunakan untuk mengidentifikasi fasa apa saja yang terdapat dalam suatu campuran.

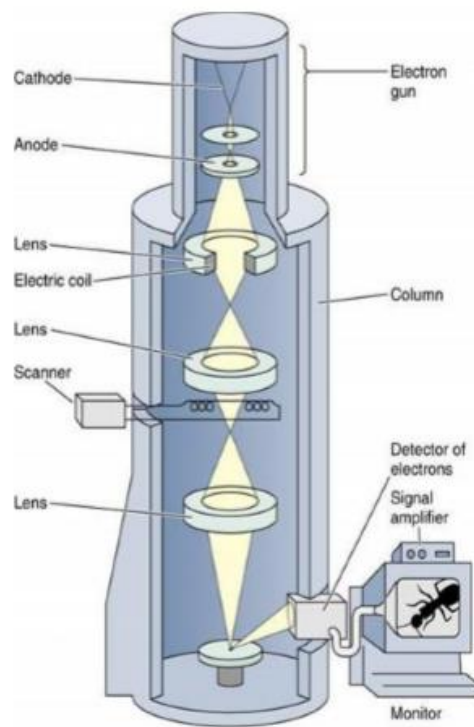
Kristal titania diidentifikasi dengan menggunakan *Crystallography Open Database* (COD) dengan nomor seri COD[96-900-8214] yang merupakan database resmi dari titanium dioksida untuk fase *anatase*. Pada COD[96-900-8214] ini, kristal titania berbentuk tetragonal pusat badan dengan parameter kisi a dengan nilai 3,78420 Å dan c dengan nilai 9,51460 Å . COD[96-900-8214] juga menampilkan sudut difraksi beserta bidang kristalnya yang akan dijadikan acuan untuk perhitungan parameter kisi (Horn, 1972).

J. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

SEM adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron yang ditembakkan ke permukaan dari material yang akan dianalisis untuk mendapatkan citra morfologi dari material yang diuji tersebut. Prinsip kerja SEM adalah dengan menggambarkan keadaan permukaan dari suatu material yang ditembak dengan berkas elektron dengan energi tinggi. Permukaan elektron yang ditembak dengan berkas elektron tersebut akan memantulkan kembali berkas elektron dengan energi tertentu. Berkas pantulan elektron tersebut kemudian ditangkap oleh detektor dan diolah dengan program pengolah citra dan menghasilkan citra permukaan material (Sujatno, 2015).

Karakterisasi bahan dengan menggunakan SEM dimanfaatkan untuk melihat struktur morfologi permukaan, ukuran butiran penyusun bahan, cacat struktural, dan komposisi pencemaran pada suatu bahan. Hasil yang diperoleh

dari karakterisasi ini dapat dilihat secara langsung berupa *Scanning Electron Micrograph*, yang menyajikan bentuk tiga dimensi berupa gambar atau foto. Untuk mempelajari suatu objek, secara umum SEM mampu melakukan perbesaran antara 1.000 – 50.000 kali.



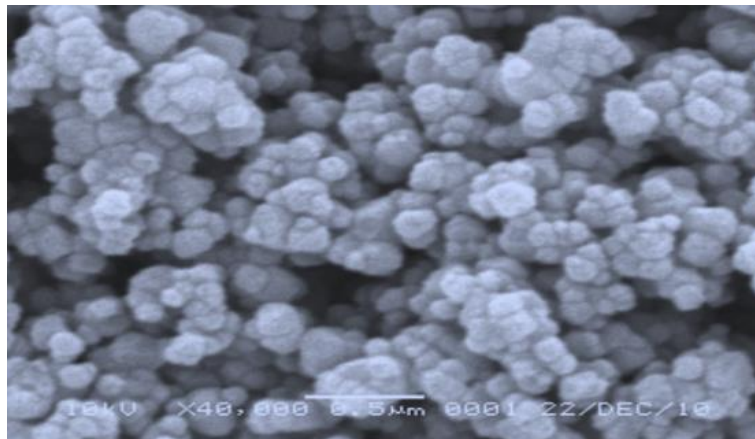
Gambar 17. Skema Dasar SEM (Sujatno, 2015)

Electron diproduksi dari filamen (katoda) yang dialiri sumber tegangan dan dipanaskan, biasanya terbuat dari tungsten, yang memiliki titik lebur yang tinggi. Karena pengaruh medan listrik yang ditimbulkan oleh anoda, maka elektron akan bergerak menuju specimen secara tidak teratur melewati suatu celah (*grid*) dan elektron yang telah bergerak tersebut telah bergerak dengan arah tertentu melewati anoda kemudian melewati lensa kondensor. Lensa kondensor merupakan lensa elektronik berupa kumparan yang berbentuk melingkar yang menghasilkan medan magnet untuk memfokuskan berkas

elektron. Berkas elektron melewati lensa kondensor, kemudian melewati kumparan scan yang mempunyai peran penting untuk memfokuskan titik penembakan dari elektron. Elektron kemudian akan mengenai spesimen (bahan), dan atom pada bahan tersebut akan mengalami eksitasi dan deeksitasi elektron serta memancarkan sinar-X karakteristik dengan energi tertentu. Elektron dan sinar-X ini kemudian akan ditangkap oleh dioda dan diubah menjadi sinyal listrik. Sebelum masuk ke program pengolah citra, sinyal listrik tersebut diperkuat dengan menggunakan *amplifier* (rangkain penguat sinyal) (Sujatno, 2015).

Hasil karakterisasi SEM adalah foto permukaan dari suatu material. Dari foto tersebut akan nampak bentuk partikel daripada material dengan susunan yang homogen maupun non homogen. Foto hasil uji dari SEM dapat diolah dengan menggunakan software *ImageJ*. *ImageJ* mampu menganalisis ukuran partikel pada suatu gambar dan menampilkannya dalam bentuk *datasheet* yang kemudian dapat diolah secara grafik dengan software pengolah data seperti *Ms.Excel*, *OriginLab*, dan lain-lain.

Karakterisasi SEM juga digunakan untuk lapisan titania dan lapisan titania yang telah disisipi pewarna, hal ini untuk mengukur diameter partikel dari titania dan juga pewarna serta melihat dampak pewarna terhadap susunan morfologi permukaan dari lapisan titania. Penelitian dari Rita (2011) menjadi acuan untuk menggambarkan morfologi permukaan lapisan titania. Hasil morfologi permukaan dari lapisan titania ditunjukkan oleh Gambar 18 sebagai berikut:



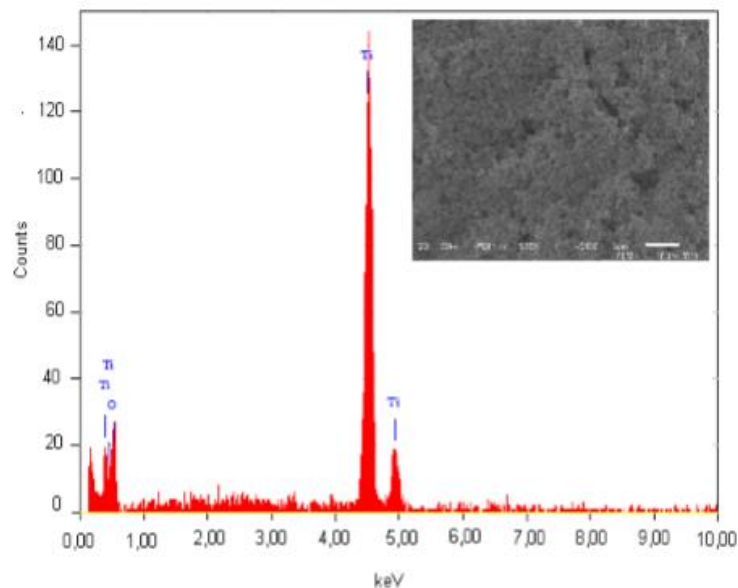
Gambar 18 . Morfologi Permukaan Lapisan Aktif TiO_2 pada Perbesaran 40.000x (Rita, 2011)

Berdasarkan Gambar 18, partikel titania berbentuk butiran (*grain*) dengan persebarannya yang homogen. Hasil foto morfologi dianalisis secara grafis dan matematis sehingga dapat ditentukan ukuran diameter butiran titania adalah 180 nm. O’Hyre dkk (2006) menyatakan bahwa ukuran partikel titania dengan diameter 50-200 nm mendukung unjuk kerja sel surya untuk menjadi lebih baik (Rita, 2011).

K. *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)*

EDS atau EDX (*Energy Dispersive X-Ray*) merupakan perangkat analisis yang biasanya berpasangan dengan SEM dalam satu panel analitis, sehingga mempermudah proses analitis dan lebih efisien. Pada dasarnya SEM-EDS merupakan pengembangan dari SEM. Prinsip kerja dari EDS, yaitu dengan menangkap energi dan intensitas sinar-X yang timbul dari proses deeksitasi elektron saat proses karakterisasi SEM dilakukan. Sinar-X yang timbul merupakan sinar-x karakteristik K_α dan K_β yang ditimbulkan saat elektron

dengan energi tertentu menumbuk suatu atom. Tentunya energi tersebut berbeda tiap unsur, sehingga dibutuhkan adanya tabel EDAX, yang digunakan untuk membandingkan nilai energi yang diperlukan untuk menimbulkan sinar-x karakteristik tersebut. Sinar-X karakteristik yang ditangkap oleh detektor dan diubah menjadi sinyal listrik yang kemudian diperkuat dengan rangkaian penguat sinyal. Sinyal yang telah diperkuat diolah dengan program pengolah sinyal. Hasil dari EDS berupa suatu grafik hubungan antara energi dengan intensitas. Selain grafik, juga ditunjukkan parameter seperti persentase berat dan persentase penyusun atom pada bahan (Goldstein, 2003).



Gambar 19. Hasil EDS Lapisan TiO₂ (Rita, 2011)

Gambar 19 merupakan hasil uji EDS pada lapisan TiO₂ oleh Rita Prasetyowati (2011). Hasil uji EDS menampilkan grafik hubungan antara energi sinar-x dengan intensitas energi. Berdasarkan data ini, muncul puncak-puncak energi yang mengindikasikan unsur penyusun senyawa pembentuk material dari sampel. Pada penelitian yang dilakukan Rita, unsur yang

ditemukan pada lapisan titania yang disintesis yaitu unsur Ti dengan persentase atom penyusun sebesar 54,25% dan unsur O dengan persentase atom penyusun sebesar 45,75% (Rita, 2011).

L. Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V)

Sel surya merupakan sebuah perangkat yang dapat mengkonversi secara langsung energi cahaya menjadi energi listrik, tanpa menghasilkan limbah atau residu yang dapat menimbulkan polusi udara, dengan kata lain, sel surya merupakan sumber energi yang bersih. Agar sel surya bisa menjadi sumber energi yang mampu menyaingi sumber energi lain secara kompetitif, berbagai upaya dilakukan untuk meningkatkan efisiensinya. Salah satu besaran yang menjadi parameter unjuk kerja sel surya adalah faktor pengisian atau biasa disebut *fill factor* (FF). Faktor pengisian sel surya merupakan besaran tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara daya maksimum yang dihasilkan oleh sel surya dengan perkalian antara V_{oc} dan I_{sc} menurut persamaan

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (6)$$

dengan FF = Faktor Pengisian

V_m = Tegangan Pada Titik Kerja Maksimum

I_m = Arus Pada Titik Kerja Maksimum

V_{oc} = Tegangan Rangkaian Terbuka

I_{sc} = Arus Hubung Singkat

Semakin besar harga FF suatu sel surya, maka unjuk kerja sel surya tersebut akan semakin tinggi (Moller, 1993).

Uji karakteristik I-V ini dilakukan dimana sel surya dipaparkan cahaya dari lampu dengan daya tertentu. Hal ini digunakan untuk menentukan harga efisiensi dari konversi energi sel surya tersebut. Efisiensi pengkonversian energi dari sel surya dirumuskan sebagai berikut

$$\eta = \frac{FFV_{oc}I_{sc}}{P_{in}A} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}A} \times 100\% \quad (7)$$

Dengan η adalah efisiensi kerja sel surya dan P_{in} adalah daya input cahaya lampu yang digunakan untuk pengujian dan A adalah luas penampang sel surya (Mialhe, 1983).



Gambar 20. I-V Meter Keithley 2401

H. Kerangka Berpikir

DSSC merupakan sel surya generasi ketiga yang memanfaatkan material selain silikon. DSSC memanfaatkan semikonduktor dan pewarna yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. DSSC pada

umumnya menggunakan semikonduktor titania (TiO_2) yang mempunyai *bandgap* 3,0-3,2 eV yang menyerap cahaya pada spektrum UV untuk menghasilkan pasangan *hole*-elektron yang akan menimbulkan arus listrik. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi DSSC yaitu dengan memperlebar kemampuan absorbansi DSSC pada rentang panjang gelombang cahaya tampak. Salah satu cara yang digunakan adalah dengan menambahkan pewarna karena pewarna akan memberikan sumbangan elektron bebas akibat menyerap energi yang dibawa oleh cahaya pada panjang gelombang tertentu. Pewarna yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi DSSC adalah pewarna organik karena murah, mudah didapatkan dan tidak bersifat toksik.

Sambang Darah juga merupakan tanaman yang umum terdapat di Indonesia, terutama di pulau Jawa serta memiliki harga jual yang masih rendah, karena fungsi tanaman ini yang hanya sebagai tanaman hias pagar saja. Sambang Darah merupakan sebuah tanaman dengan warna daun yang unik, di bagian atas daun berwarna hijau. Hal ini disebabkan terdapat kandungan *flavonid* yang melimpah yang diantaranya adalah antosianin, klorofil dan karoten. Daun Sambang Darah mempunyai puncak absorbansi pada spektrum UV. Berdasarkan fakta ini, daun Sambang Darah berpotensi menjadi pewarna pada DSSC untuk meningkatkan unjuk kerja DSSC dalam mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik.

Pewarna diekstrak dari daun Sambang Darah yang dilarutkan dengan etanol dengan variasi massa daun 5 gram, 10 gram, dan 15 gram. Pewarna diuji menggunakan uji UV-Vis untuk mengetahui karakteristik kemampuan

absorbansi pewarna. Lapisan aktif direndam didalam pewarna dengan konsentrasi 10 gram, kemudain dilakukan uji UV-Vis untuk mengetahui pelebaran kemampuan absorbansi lapisan aktif titania oleh karena konsentrasi penyisipan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah, uji XRD untuk mengetahui apakah ada perubahan struktur kristal setelah TiO_2 disisipi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah dengan variasi konsentrasi. Pada uji XRD ini, struktur kristal yang diharapkan dari titania yang terbentuk adalah kristal titania dengan fase *anatase* dan bentuk kristal tetragonal pusat badan. Pengujian SEM-EDS dilakukan untuk mengetahui perubahan morfologi permukaan dan susunan komposisi kimia dari DSSC oleh karena konsentrasi penyisipan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah. Hasil yang diharapkan dari uji SEM-EDS ini adalah partikel titania yang berbentuk butiran (*grain*) dengan diameter partikel dalam rentang 50-200 nm dan dengan unsur penyusun utama material adalah Ti dan O.

Komponen DSSC disusun dari lapisan aktif, pewarna, elektrolit, dan elektroda lawan dengan variasi konsentrasi pewarna 0 gram, 5 gram, 10 gram, dan 15 gram. DSSC diuji karakteristik arus-tegangannya untuk mengetahui perubahan efisiensi daya listrik dari DSSC oleh karena konsentrasi penyisipan pewarna ekstrak daun Sambang Darah.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

1. Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni hingga Desember 2018

2. Tempat Penelitian

- a. Pembuatan Lapisan Tipis TiO₂ dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah dilakukan di Laboratorium Fisika Koloid FMIPA UNY
- b. Pengujian karakteristik absorbansi panjang gelombang untuk larutan ekstrak daun Sambang Darah, TiO₂ dan lapisan TiO₂ dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah dengan menggunakan UV-Vis di Laboratorium Kimia FMIPA UGM
- c. Analisis struktur material pada lapisan TiO₂ dan TiO₂ yang disisipi *dye* ekstrak daun Sambang Darah menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Terpadu UNS
- d. Pengujian karakteristik struktur morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan komposisi kimia material menggunakan *Energy Disperstion Spectrocopy* (EDS) di BPTBA LIPI Gunung Kidul
- e. Karakterisasi Arus-Tegangan sel surya dilaksanakan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi FMIPA UGM

B. Alat dan Bahan

1. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian terdiri dari perangkat preparasi dan perangkat karakterisasi lapisan TiO₂ yang meliputi :

a. Perangkat Preparasi

1. Oven merek Mitseida *Electric Oven* dengan batas ukur 250°C (1 buah)
2. *Furnace* merek Barnstead Thermolyne seri 47900
3. Penggerus
4. Neraca Ohaus Digital merek Scout Pro dengan batas ukur 2000 mg dan ketelitian 0,1 gram (1 buah)
5. *Beaker Glass* 50 ml merek Hera (4 buah)
6. Gelas Ukur merek Hera dengan batas ukur 50 ml dan ketelitian 1 ml (1 buah)
7. Botol Sampel 10 ml (20 buah)
8. Pipet (2 buah)
9. Pengaduk (2 buah)
10. Thermometer merek *Digital Thermometer* tipe P101
11. *Hot Plate Magnetic Stirrer* merek *Magnetic Stirrer* tipe SH-2
12. ITO (*Indium Tin Oxide*) dengan ukuran 4 × 3 cm
13. Lempeng Tembaga dengan ukuran 4 × 3 cm
14. *Ultrasonicbath* merek *Digital Ultrasonic Cleaner* seri PS-10A
15. Pemotong Kaca

b. Perangkat Karakteristik

1. UV-Vis *Spectrofotometer* merk Shimadzu seri UV-4250 untuk cairan
2. UV-Vis *Spectrofotometer* merk Shimadzu seri UV-1700 untuk padatan dan lapisan tipis
3. *X-Ray Diffraction* (XRD) merk Shimadzu seri XRD-6000 untuk padatan dan lapisan tipis
4. *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersion Spectroscopy* (SEM-EDS) merk Hitachi seri SU 3500
5. Seperangkat alat uji Arus-Tegangan merk Keithley seri 2401

2. Bahan Penelitian

- a. Daun Sambang Darah (50 gram)
- b. Serbuk Titanium Dioksida (TiO_2) (0,5 gram)
- c. Ethanol 96% (1 liter)
- d. *Polyvinyl Alcohol* (PVA) (1,5 gram)
- e. Kalium Iodida (KI) (0,8 gram)
- f. *Acetonitrile* (10 ml)
- g. *Iodine* (0,127 gram)
- h. *Aquades* (5 liter)

C. Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel penelitian yang muncul bersumber dari pengujian ekstrak daun Sambang Darah, lapisan titania, lapisan titania dengan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah, dan pengujian tegangan sel surya

1. Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang dapat divariasikan selama percobaan berlangsung. Dalam penelitian ini, variabel bebasnya adalah konsentrasi larutan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah yang digunakan.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas selama percobaan berlangsung. Dalam penelitian ini, variabel terikatnya adalah

1. Panjang gelombang pada puncak absorbansi dari hasil uji *UV-Vis*
2. Parameter kisi struktur kristal hasil uji XRD
3. Gambar morfologi permukaan dan komposisi kimia hasil uji SEM-EDS untuk memperoleh ukuran diameter partikel dan kandungan unsur dalam lapisan sampel
4. Performansi sel surya yang meliputi efisiensi kerja daya listrik dan nilai faktor pengisian pada uji karakteristik arus-tegangan (I-V)

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dikondisikan tetap selama percobaan dilakukan. Dalam penelitian ini, variabel kontrolnya adalah

1. Ukuran daun yang digunakan yaitu panjang 8-10 cm dan lebar 4-6 cm dengan warna daun hijau tua pada bagian muka dan merah tua pada bagian punggung
2. Lama waktu perendaman lapisan titania pada larutan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah
3. Massa serbuk Titanium Dioksida dan PVA
4. Volume pelarut *Ethanol* yang digunakan untuk ekstraksi daun Sambang Darah

D. Teknik Pengambilan Data

1. Pembuatan ekstrak daun Sambang Darah sebagai pewarna

Pembuatan ekstrak daun Samabang Darah dilakukan dengan menggerus 5 gram, 10 gram, dan 15 gram daun kering dengan menggunakan mortar. Setelah itu, serbuk daun yang telah halus dilarutkan dengan pelarut ethanol 96% dengan volume 50 ml. Larutan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu ruang selama 30 menit hingga larutan berwarna hijau pekat dan serbuk daun yang mengendap berubah warna menjadi putih. Larutan disaring dengan menggunakan kertas saring dan dimasukkan dalam botol sampel dengan warna gelap dan disimpan ditempat yang gelap sebagai pewarna.

2. Pengujian kemampuan absorbansi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah

Pewarna diuji kemampuan absorbansinya dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 200-800 nm.

3. Persiapan ITO dan tembaga sebagai elektroda

ITO dan tembaga dipotong dengan ukuran $2,5 \times 3$ cm. Kemudian dibersihkan dengan direndam pada aquades selama 15 menit dan alkohol 70% selama 30 menit yang digetarkan dengan *ultrasonicbath*.

4. Pembuatan lapisan aktif titania

Lapisan titania dibuat dengan membuat larutan *binder* terlebih dahulu. Larutan *binder* dibuat dengan mencampurkan 0,1 gram PVA dan 10 ml aquades yang diaduk selama 2 jam pada suhu 80°C hingga larutan mengental dengan menggunakan *magnetic stirer*. Larutan *binder* yang telah mengental ditambah serbuk Titanium Dioksida sebanyak 1 gram dan diaduk selama kurang lebih 1 jam dengan *magnetic stirer*. Larutan *binder* tersebut dideposisikan ke substrat ITO dengan metode *doctor blade*. Substrat dipanaskan diatas *hotplate* yang ada pada *magnetic stirer* secara terbuka pada suhu 100°C selama kurang lebih 30 menit. Substrat kemudian dipanaskan di dalam Furnace pada suhu 450°C selama 30 menit sebagai lapisan titania.

5. Pengujian karakteristik absorbansi dan struktur kristal lapisan titania

Lapisan titania diuji kemampuan absorbansinya dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada rentang panjang gelombang 200–800 nm

dan dikarakterisasi menggunakan uji *X-Ray Diffraction* untuk menentukan parameter kisi struktur kristalnya.

6. Deposisi pewarna pada lapisan titania

Lapisan titania direndam pada larutan pewarna selama 2 jam yang dilakukan ditempat yang lembab dan gelap.

7. Pengujian karakteristik absorbansi dan struktur kristal lapisan titania yang telah disisipi dengan pewarna

Lapisan titania yang telah disisipi dengan pewarna diuji dengan menggunakan uji UV-Vis untuk mengukur kemampuan absorbansi terhadap cahaya serta uji XRD untuk menentukan parameter kisi pada struktur kristalnya.

8. Pengujian karakteristik morfologi permukaan dan komposisi kimia lapisan titania dan lapisan titania yang telah disisipi dengan pewarna

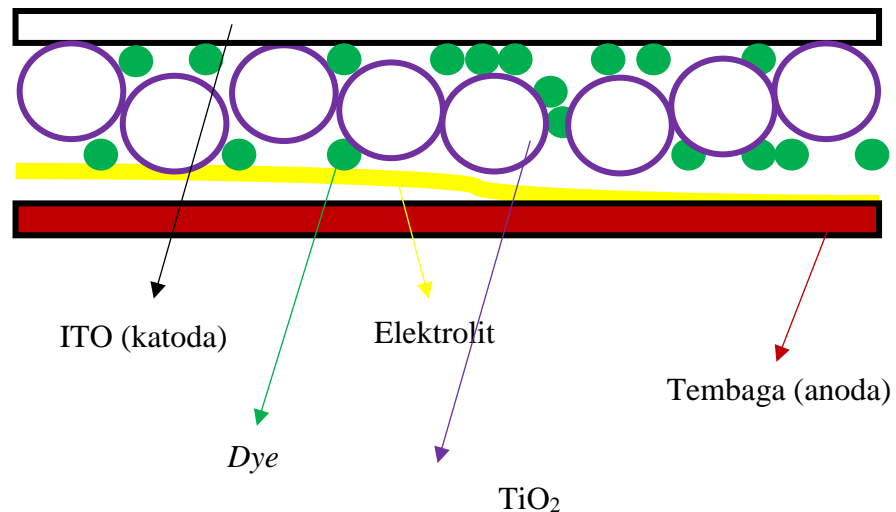
Lapisan titania dan lapisan titania yang telah disisipi dengan pewarna diuji dengan SEM-EDS untuk menentukan gambar struktur morfologi permukaan material yang digunakan untuk mengukur ukuran partikel dan komposisi kimia dari material.

9. Pembuatan elektrolit

Pembuatan elektrolit dilakukan dengan mencampurkan 0,8 gram kalium iodida dengan 10 ml *acetonitrile*. Larutan ditambah dengan 0,127 gram *iodine* dan diaduk hingga merata selama kurang lebih 10 menit. Larutan disimpan dalam botol gelap.

10. Pembuatan DSSC

Pembuatan sel surya yaitu dengan menyusun komponen DSSC dimulai dari substrat ITO, lapisan titania yang disisipi pewarna, elektrolit dan substrat tembaga seperti *sandwich* yang ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 21. Susunan Komponen DSSC

11. Pengujian karakteristik arus-tegangan pada DSSC

DSSC diuji dengan menggunakan alat uji arus-tegangan dibawah penyinaran dengan daya 18W/m^2 .

E. Metode Analisis Data

Data yang diperoleh dari karakterisasi UV-Vis berupa grafik antara panjang gelombang dan absorbansi. Data dibandingkan antara lapisan titania dengan lapisan titania yang disisipi pewarna, dan mengukur pengaruh konsentrasi pewarna terhadap kemampuan absorbansi dari lapisan titania.

Data yang diperoleh dari karakterisasi XRD berupa difaktogram sebagai fungsi intensitas dan sudut difraksi (2θ). Data dari XRD kemudian diolah

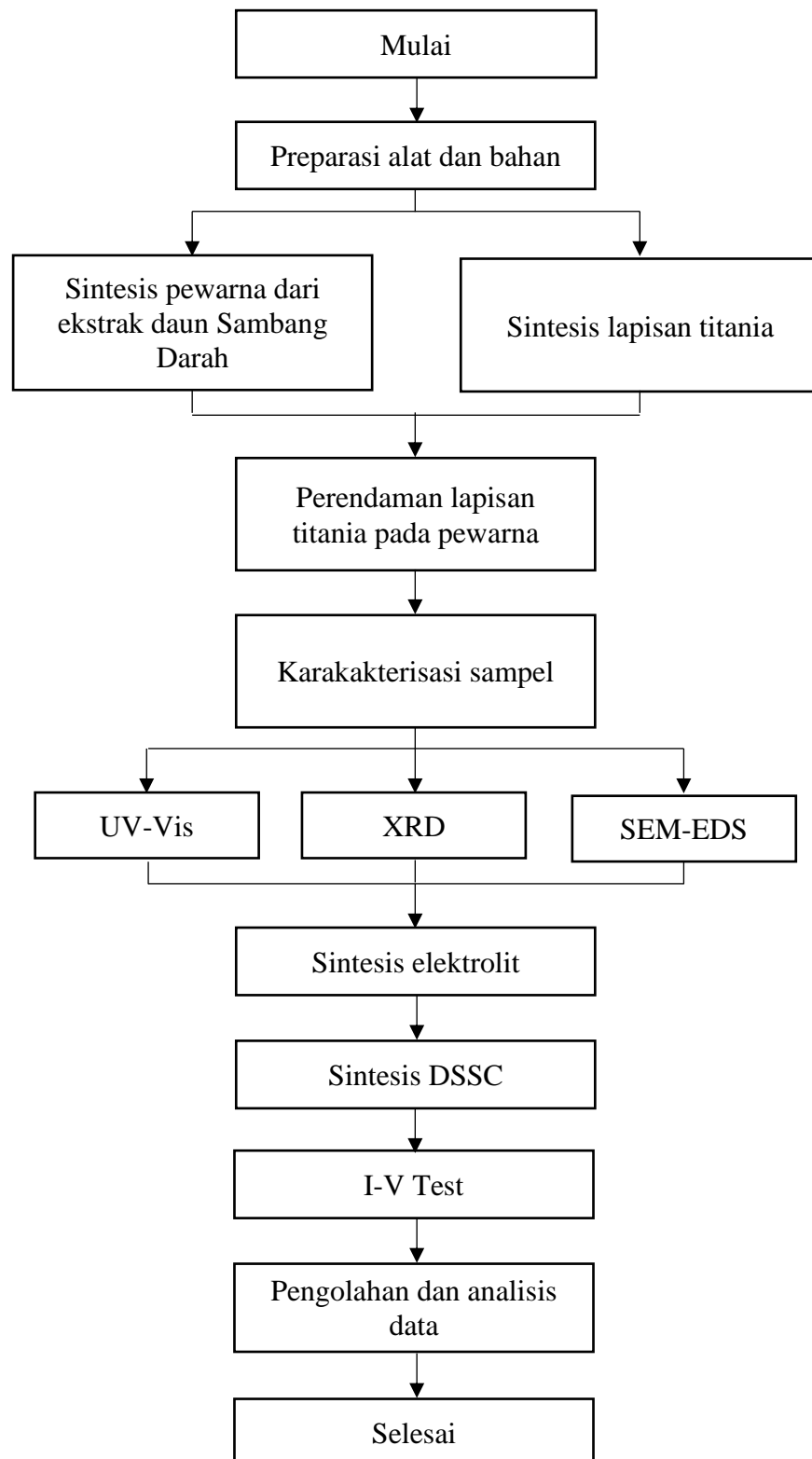
dengan menggunakan software *Match!*, yang mempunyai fungsi untuk membandingkan data hasil eksperimen dengan data ICDD (*International Center for Diffraction Data*). Dari hasil perbandingan data, didapatkan nilai *hkl* untuk melakukan perhitungan dalam mencari nilai parameter kristal *a* dan *c*. Nilai parameter kisi ini akan dibandingkan dengan data acuan, apakah lapisan yang dibentuk sesuai dengan acuan atau tidak.

Data yang diperoleh dari uji SEM adalah gambar morfologi permukaan dari lapisan titania dan lapisan titania yang disisipi pewarna dalam beberapa perbesaran. Gambar diolah dengan menggunakan program *Match!* dan *OriginPro* untuk mendapatkan ukuran partikel pada kedua sampel. Berdasarkan hasil analisis ukuran partikel tersebut, disimpulkan bahwa lapisan yang terbentuk berhasil disintesis sesuai acuan atau tidak.

Data yang diperoleh dari uji EDS adalah grafik antara energi dengan intensitas energi sinar-X yang muncul akibat adanya tumbukan antar elektron sekunder dengan atom material. Data EDS ini menunjukkan unsur-unsur penyusun sampel dengan persentase berat dan jumlah atom penyusun. Data ini kemudian dibandingkan dengan data acuan yang menentukan apakah sampel tersebut berhasil disintesa atau tidak.

Data yang terakhir adalah data dari uji karakteristiuk arus-tegangan, yang menghasilkan grafik antara arus dan tegangan yang diuji pada DSSC dibawah penyinaran dengan daya 18 W/m^2 . Dari data ini dilakukan perhitungan untuk mengukur nilai FF (Faktor Pengisian) dan juga nilai efisiensi kerja daya listrik (η) dari DSSC.

F. Diagram Alir Tahap Penelitian



Gambar 22. Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Ekstraksi Daun Sambang Darah

Proses ekstraksi daun Sambang Darah dilakukan dengan menggunakan pelarut etanol supaya tidak merusak zat warna flavonoid yang merupakan senyawa polar. Proses ekstraksi ini dilakukan dengan 3 variasi konsentrasi massa daun Sambang Darah, yaitu 5 gram, 10 gram, dan 15 gram. Gambar 23 menunjukkan hasil ekstraksi daun Sambang Darah dengan variasi konsentrasi.

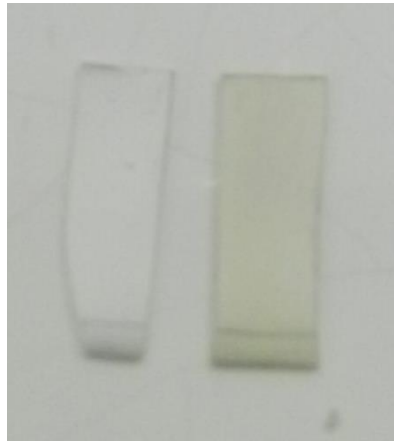


Gambar 23. Larutan Ekstrak Daun Sambang Darah Dengan Variasi Konsentrasi

Berdasarkan Gambar 23, terdapat adanya perbandingan warna larutan ekstrak daun Sambang Darah untuk setiap konsentrasi larutan. Perbedaan warna dapat terlihat dari kiri ke kanan pada warna larutan ekstrak daun Sambang Darah yang semakin pekat. Semakin besar konsentrasi larutan, maka warna larutannya juga semakin pekat, yaitu dari hijau bening pada konsentrasi 5 gram hingga hijau pekat pada konsentrasi 15 gram.

B. Hasil Sintesis Lapisan Aktif

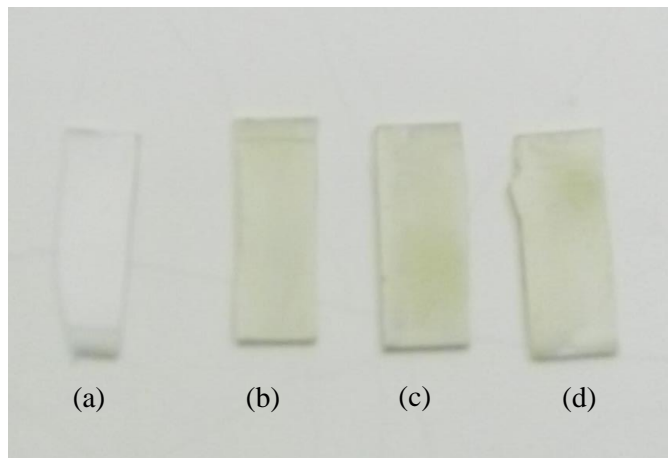
Sintesis lapisan aktif dilakukan dengan mendeposisikan pasta TiO_2 pada substrat ITO dengan menggunakan metode *Doctor Blade Coating*. Hasil dan proses sintesis lapisan aktif ditunjukkan pada Gambar 24



Gambar 24. Lapisan Aktif TiO_2 Sebelum Dipanaskan Didalam Furnace (Kiri) dan Setelah Dipanaskan Didalam Furnace (Kanan)

Gambar 24 merupakan hasil lapisan TiO_2 yang disintesis dengan menggunakan metode *Doctor Blade Coating*. Warna lapisan TiO_2 sebelum dipanaskan di dalam Furnace berwarna putih, namun setelah dipanaskan didalam Furnace berwarna putih kekuning kuning. Hal ini disebabkan karena penguapan dari PVA dan aquades yang menjadi bahan pasta TiO_2 .

Hasil sintesis selanjutnya adalah lapisan TiO_2 yang disisipi dengan larutan ekstrak daun Sambang Darah dengan variasi konsentrasi 0 gram, 5 gram, 10 gram dan 15 gram. Penyisipan dilakukan dengan cara merendam lapisan aktif pada larutan ekstrak daun Sambang Darah selama 2 jam. Hasil perendaman ditunjukkan pada Gambar 25



Gambar 25. Perbandingan Lapisan Aktif TiO_2 Yang Disisipi Larutan Ekstrak Daun Sambang Darah: (a) Konsentrasi 0 gram (b) Konsentrasi 5 gram (c) Konsentrasi 10 gram (d) Konsentrasi 15 gram

Gambar 25 menunjukkan perbandingan sampel lapisan aktif TiO_2 yang telah disisipi dengan larutan ekstrak daun Sambang Darah dengan variasi konsentrasi. Pada Gambar (b), (c), dan (d) memiliki warna yang hampir sama, sedangkan untuk lapisan TiO_2 tanpa pewarna mempunyai warna putih. .

C. Pengaruh Penyisipan Konsentrasi Pewarna Ekstrak Daun Sambang Darah Pada DSSC Berdasarkan Hasil Karakterisasi UV-Vis, XRD, SEM-EDS, dan I-V Test

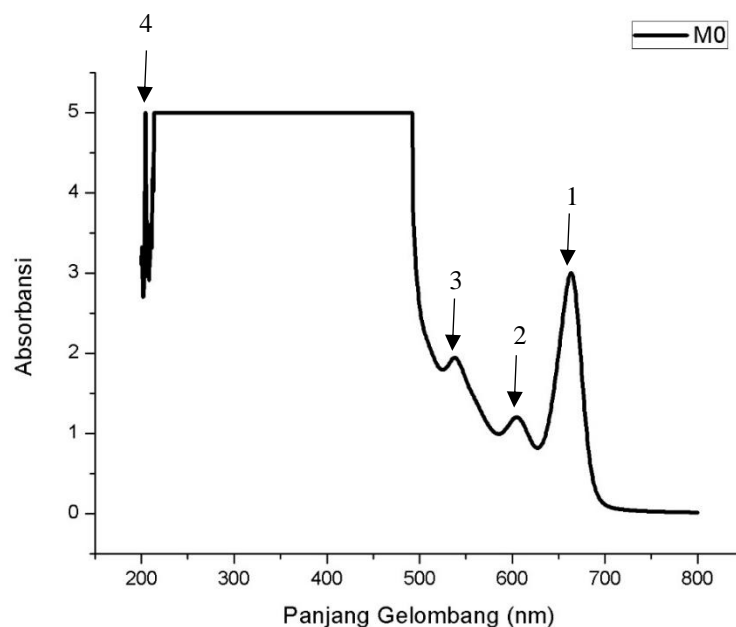
1. Karakterisasi UV-Vis

Karakterisasi pertama yang dilakukan adalah karakterisasi kemampuan absorbansi atau kemampuan menyerap cahaya dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada ekstrak daun Sambang Darah, lapisan aktif TiO_2 , serta lapisan aktif TiO_2 yang telah direndam menggunakan *dye* ekstrak daun Sambang Darah. Hasil dari pengujian

Spektrofotometer UV-Vis ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik yang dihasilkan menunjukkan hubungan antara kemampuan absorbansi dari bahan yang diuji terhadap panjang gelombang yang dikenai dari bahan yang diuji. Hasil dari pengujian dengan spektrofotometer UV-Vis :

a. Ekstrak daun Sambang Darah

Ekstrak daun Sambang Darah dengan konsentrasi 10 gram diencerkan hingga $\frac{1}{128}$ kali sebelum dilakukan uji UV-Vis. Hal ini dikarenakan uji UV-Vis pada konsentrasi 10 gram menunjukkan adanya absorbansi pada rentang panjang gelombang tertentu mempunyai nilai absorbansi yang melebihi batas pengukuran alat. Nilai data yang ditampilkan merupakan nilai batas maksimum pengukuran pada alat ukur. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 26. Hasil Uji UV-Vis Pada Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 gram

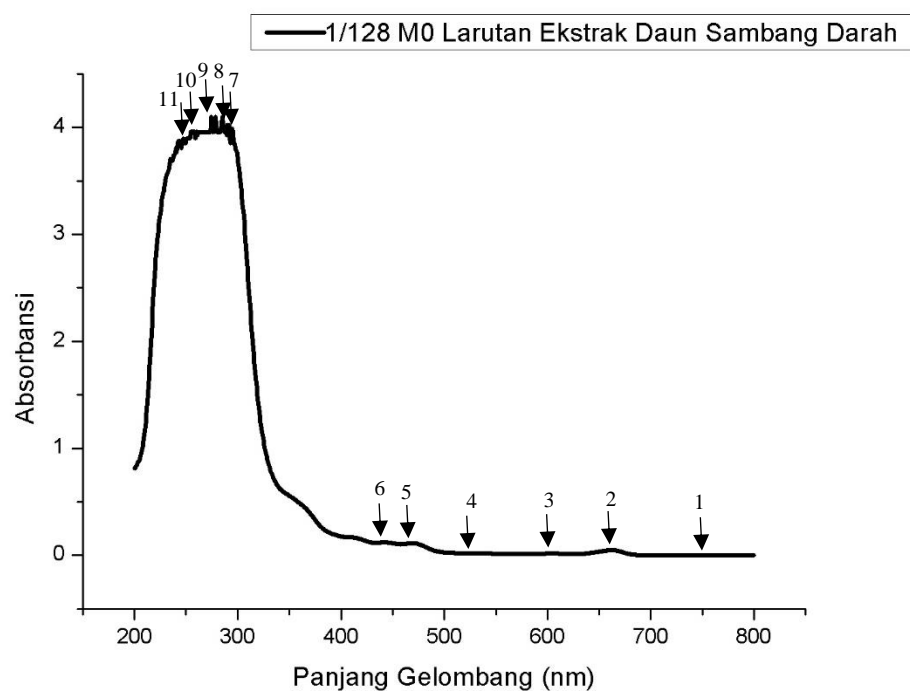
Keterangan Gambar

1. 663,5 nm
2. 605 nm
3. 538 nm
4. 204 nm

Pada Gambar 26 menunjukkan data absorbansi dalam rentang 213,5 – 492 nm tidak dapat menunjukkan puncak-puncak serapan. Hal ini disebabkan karena adanya absorbansi yang besar yang dilakukan pada larutan ekstrak daun Sambang Darah yang melebihi batas pengukuran absorbansi pada alat. Berdasarkan hal ini, pengukuran absorbansi pada larutan ekstrak daun Sambang Darah dengan konsentrasi 5 gram, 10 gram, dan 15 gram belum dapat dilakukan. Gambar 26 mempunyai puncak-puncak absorbansi yang menyatakan kandungan senyawa dalam daun. Puncak pada panjang gelombang 663,5 nm menandakan adanya kandungan klorofil a (Lichtenthaler, 1987), puncak pada panjang gelombang 605 nm menunjukkan adanya antosianin (Alvionita dkk, 2016), puncak pada panjang gelombang 538 nm menunjukkan adanya antosianin (Harbone, 1957), dan puncak pada panjang gelombang 204 nm menunjukkan adanya alkaloid (Harbone, 1996). Klorofil, antosianin dan alkaloid merupakan pigmen pada daun yang masing masing menyerap cahaya dengan warna tertentu. Saat menyerap cahaya,

pigmen pada daun akan mengeksitasi elektron yang akan digunakan untuk proses pertumbuhan dan keberlangsungan hidup pada daun. Pada DSSC, pigmen digunakan untuk memproduksi elektron bebas yang akan digunakan untuk memperbesar arus listrik pada DSSC (Jiao *et al.*, 2011).

Agar pengukuran dapat dilakukan, maka dilakukan pengenceran sebesar 1/128 terhadap pewarna dengan konsentrasi massa 10 gram. Hasil UV-Vis pada pewarna hasil dari pengenceran dapat dilihat dari Gambar 27.



Gambar 27. Hasil Uji UV-Vis Pada Ekstrak Daun Sambang Darah 1/128 Konsentrasi 10 gram

Keterangan Gambar:

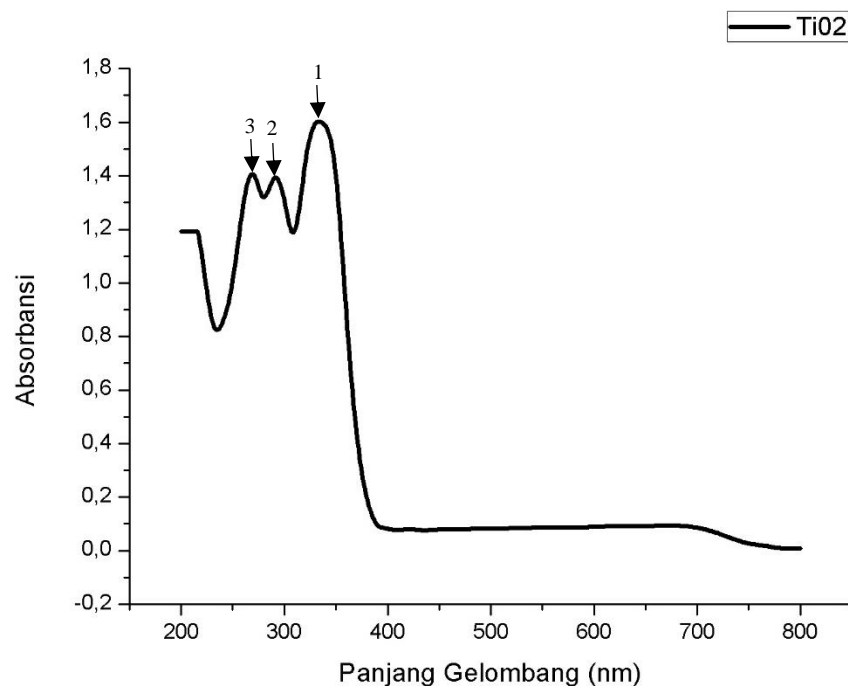
1. 750,5 nm
2. 662 nm
3. 605 nm
4. 535 nm
5. 469,5 nm
6. 441,5 nm
7. 295 nm
8. 285 nm
9. 260 nm
10. 254,4 nm
11. 242,5 nm

Tabel 1. Puncak-Puncak Absorbansi Pada Uji UV-Vis Ekstrak Daun Sambang Darah

No.	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
1	750,5	0,002
2	662,0	0,051
3	605,0	0,019
4	535,0	0,020
5	469,5	0,115
6	441,5	0,123
7	295,0	3,989
8	285,0	4,102
9	260,0	3,961
10	254,5	3,961
11	242,5	3,873

Tabel 1 menampilkan puncak puncak absorbansi dan intensitas absorbansi oleh larutan ekstrak daun Sambang Darah. Puncak dengan absorbansi tertinggi didapatkan pada panjang gelombang 254,5 nm dan 260 nm. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ekstrak daun Sambang Darah mempunyai kemampuan absorbansi yang tinggi pada rentang cahaya UV-C (100-280 nm). Dengan data yang telah diperoleh, maka ekstrak daun Sambang Darah akan bekerja secara maksimum sebagai pewarna DSSC dengan menyerap cahaya pada rentang panjang gelombang 100-280 nm atau rentang cahaya UV-C, sehingga menghasilkan elektron bebas yang akan menjadi arus listrik.

b. Lapisan aktif TiO_2



Gambar 28. Hasil Uji UV-Vis Pada Lapisan Aktif TiO_2

Keterangan Gambar :

1. 333 nm
2. 292 nm
3. 269 nm

Gambar 28 merupakan grafik hasil uji Spektrofotometer UV-Vis pada substrat kaca ITO yang sudah dideposisikan lapisan aktif TiO_2 . Pengujian ini dilakukan pada rentang panjang gelombang 200 – 800 nm. Grafik tersebut menunjukkan adanya puncak-puncak absorbansi yang ditunjukkan pada Tabel 2.

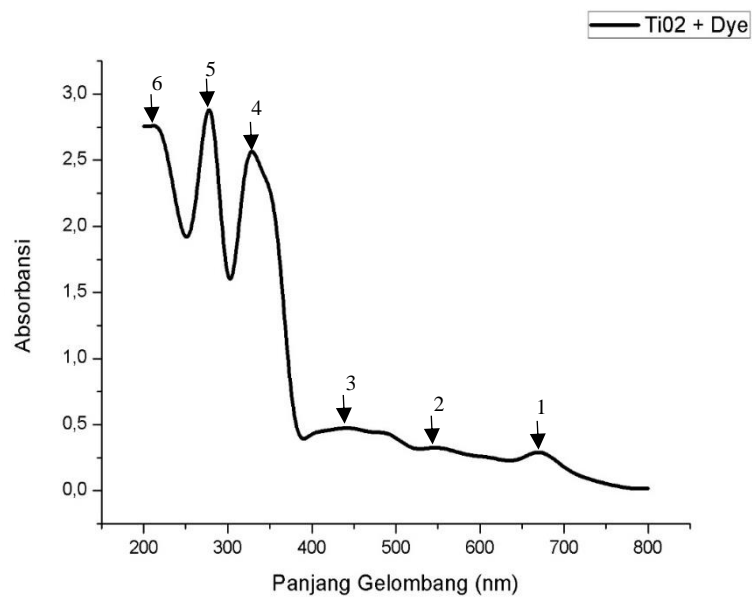
Tabel 2. Puncak-Puncak Absorbansi Pada Uji UV-Vis Lapisan TiO_2

No.	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
1	333	1,602
2	292	1,393
3	269	1,407

Tabel 2 menunjukkan bahwa lapisan TiO_2 mempunyai puncak absorbansi tertinggi pada panjang gelombang 333 nm. Ketiga puncak pada gambar 28 menunjukkan bahwa material dominan pada lapisan adalah TiO_2 dimana TiO_2 mempunyai puncak absorbansi pada rentang 200-380 nm (Nakata & Fujishima, 2012). Dari data ini, ditunjukkan bahwa TiO_2 mempunyai kemampuan absorbansi yang tinggi pada cahaya UV (*Ultra Violet*) yaitu pada rentang 100–380 nm. Pada titik

puncak absorbansi inilah terjadinya proses pengisian pada celah energi TiO_2 , yaitu pada rentang 3,0–3,2 eV yang menimbulkan elektron bebas.

- c. Lapisan aktif TiO_2 yang telah direndam dalam *dye* ekstrak daun Sambang Darah



Gambar 29. Hasil Uji UV-Vis Pada Lapisan Aktif TiO_2 Yang Disisipi *Dye* Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 Gram

Keterangan Gambar :

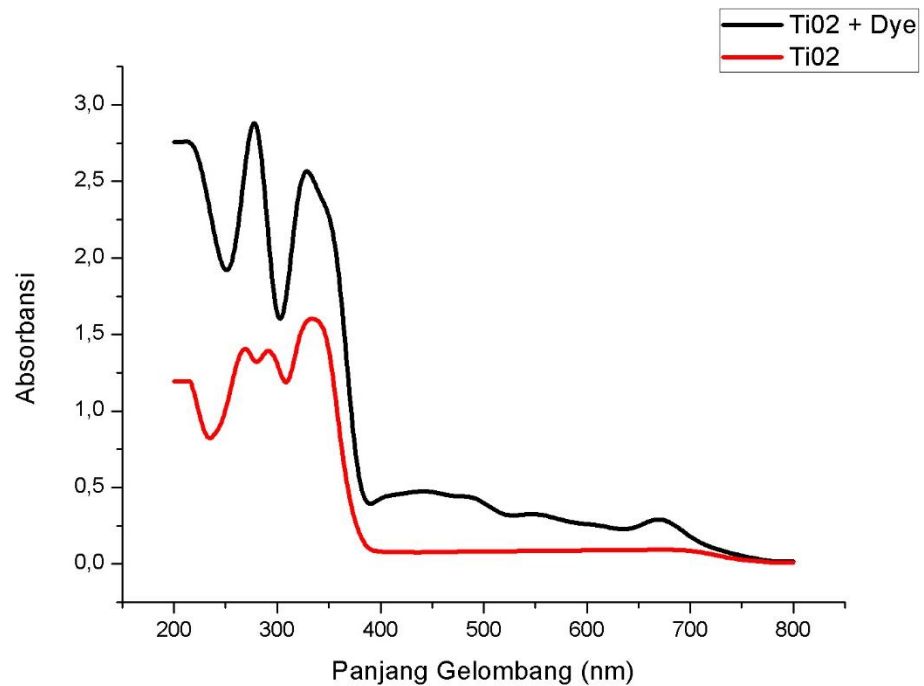
1. 669 nm
2. 547 nm
3. 442 nm
4. 329 nm
5. 278 nm
6. 212 nm

Gambar 29, menampilkan adanya peningkatan absorbansi dari Gambar 28. Pada Grafik di atas, terdapat 6 puncak absorbansi yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Puncak-Puncak Absorbansi Pada Uji UV-Vis Lapisan TiO₂ Dengan *Dye* Ekstrak Daun Sambang Darah

No.	Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi
1	669	0,290
2	547	0,326
3	442	0,475
4	329	2,566
5	278	2,881
6	212	2,759

Puncak absorbansi tertinggi terjadi pada panjang gelombang 278 nm dengan nilai absorbansi sebesar 2,881. Data ini menunjukkan adanya peningkatan nilai absorbansi akibat pengaruh dari penyisipan pewarna yang dapat ditunjukkan dengan membandingkan Gambar 28 dan Gambar 29 yang ditunjukkan pada Gambar 30. Puncak pada panjang gelombang 669 nm menandakan adanya peningkatan absorbansi lapisan oleh klorofil a. Puncak pada panjang gelombang 547 nm menandakan adanya peningkatan absorbansi lapisan oleh antosianin. Puncak pada panjang gelombang 442 nm menunjukkan peningkatan absorbansi oleh klorofil b (Lichtenthaler, 1987). Puncak 329 nm, 278 nm, dan 212 nm menunjukkan adanya peningkatan nilai absorbansi oleh senyawa flavonid (100-400 nm).



Gambar 30. Perbandingan Grafik Hasil Uji UV-Vis Pada Lapisan TiO₂ Dengan Lapisan TiO₂ Disisipi Pewarna Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 gram

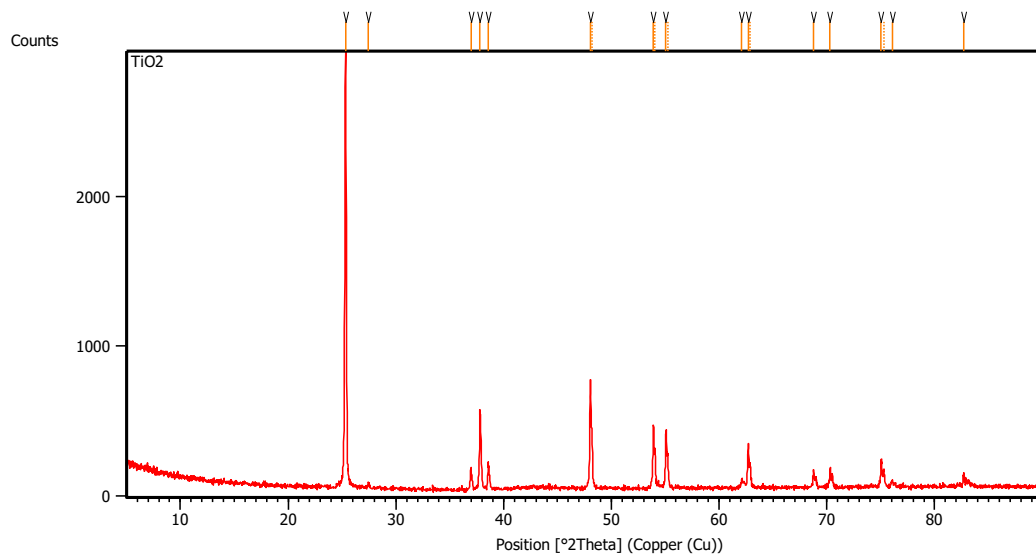
Berdasarkan Gambar 30 dapat diamati bahwa terdapat peningkatan absorbansi hampir 2 kali lipat pada lapisan aktif TiO₂ yang telah disisipi dengan pewarna ekstrak daun Sambang Darah dengan konsentrasi 10 gram. Hasil dari puncak absorbansi ini menunjukkan adanya celah energi pada lapisan. Celah energi ini yang akan diisi oleh cahaya dengan panjang gelombang tertentu, kemudian menempatkan elektron pada pita valensi menuju pita konduksi yang membuatnya bersifat seperti bebas yang akan menjadi arus listrik. Hasil distribusi absorbansi yang meningkat, terutama pada rentang panjang gelombang 200–400 nm menunjukkan adanya interferensi

konstruktif penyerapan cahaya pada lapisan, yang berarti intensitas cahaya yang diabsorpsi pada rentang tersebut menjadi lebih besar.

2. Karakterisasi Struktur Kristal Dengan Menggunakan XRD

Data yang dihasilkan dari karakterisasi XRD berupa difraktogram, yaitu grafik hubungan antara sudut hamburan (2θ) dengan intensitas spektrum (kristal) (I). Difraktogram menampilkan puncak-puncak intensitas dari sinar-X yang dihamburkan oleh bidang kristal. Dari data puncak intensitas ini, maka dapat ditentukan parameter kisi kristal dari sampel yang diuji.

Uji yang pertama dilakukan untuk bahan lapisan aktif TiO_2 . Hasil difraktogram untuk TiO_2 dapat dilihat pada Gambar 25 dengan pengujian dilakukan pada rentang sudut hamburan dari 0° hingga 90° . Berdasarkan Gambar 31, puncak-puncak data yang terbentuk mempunyai susunan yang sama dengan puncak-puncak data pada kristal TiO_2 dengan jenis anatase. Data ini dibandingkan dengan data COD (*Crystal Open Database*) dengan nomor COD[96-900-8214].

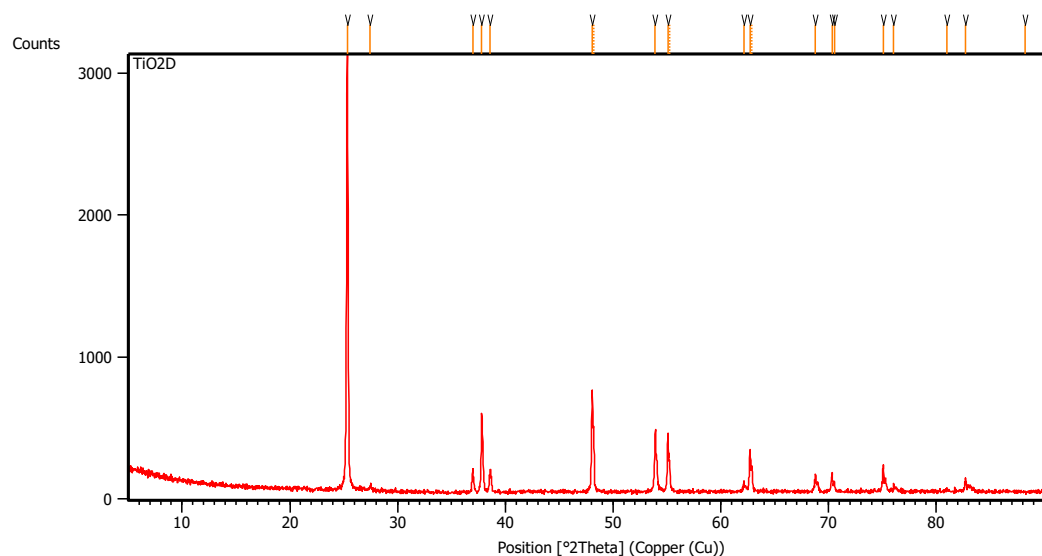


Gambar 31. Difraktogram Uji XRD Pada Lapisan Aktif TiO₂

Data dari hasil uji XRD diolah dengan menggunakan program *Match!*, dimana data eksperimen dibandingkan dengan database COD (*Crystallography Open Database*) yang bersumber dari ICDD. Struktur yang terbentuk adalah struktur kristal dengan bentuk tetragonal dengan parameter kisi a sebesar 3,783663 Å dan c sebesar 9,467756 Å.

Selanjutnya, difraktogram untuk lapisan aktif TiO₂ dengan pewarna ekstrak daun Sambang dapat dilihat pada Gambar 32, sebagaimana pengujian dilakukan pada rentang sudut hamburan dari 0° hingga 90° dengan CuK_α sebesar 1,540598 Å. Berdasarkan Gambar 32, puncak-puncak data yang terbentuk juga mempunyai susunan yang sama dengan puncak-puncak data pada kristal TiO₂ dengan jenis anatase pada data COD (*Crystal Open Database*) dengan nomor COD[96-900-8214]. Struktur

yang terbentuk adalah struktur kristal dengan bentuk tetragonal dengan parameter kisi a sebesar 3,773759 Å dan c sebesar 9,467222 Å.

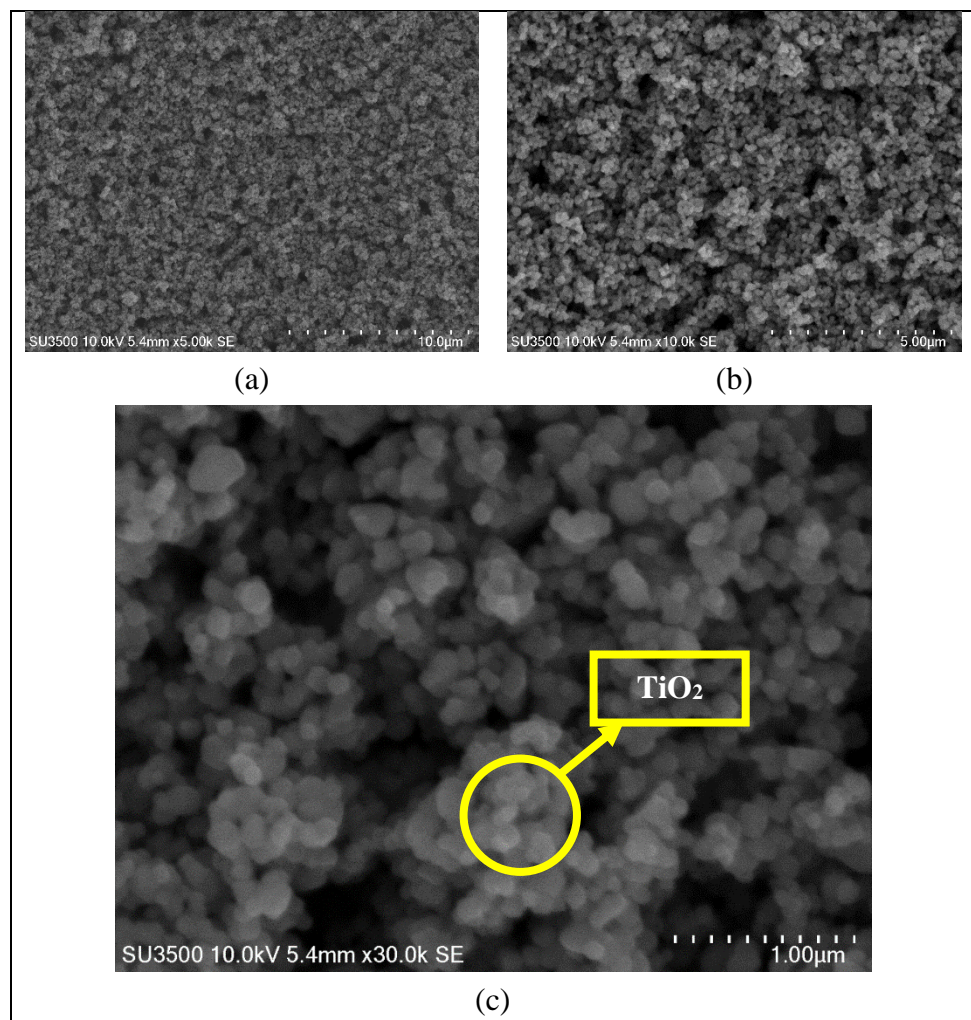


Gambar 32. Difraktogram Uji XRD Pada Lapisan Aktif TiO₂ Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, apabila dibandingkan dengan COD[96-900-8214], parameter a dan c memiliki hasil yang serupa. Dari analisis ini, material TiO₂ berhasil disintesis dengan baik sesuai dengan parameter COD[96-900-8214]. Penambahan pewarna ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan TiO₂ tidak mempengaruhi struktur kristal dari TiO₂, karena komposisi penyusun pewarna pada kristal yang mempunyai persentase 2% dan 98%-nya merupakan kristal TiO₂ *anatase* dengan bentuk tetragonal. Berdasarkan hal ini, penyisipan pewarna pada lapisan TiO₂ tidak merusak ikatan atom-atom TiO₂ dan pewarna hanya diadsorpsi pada permukaan TiO₂ saja.

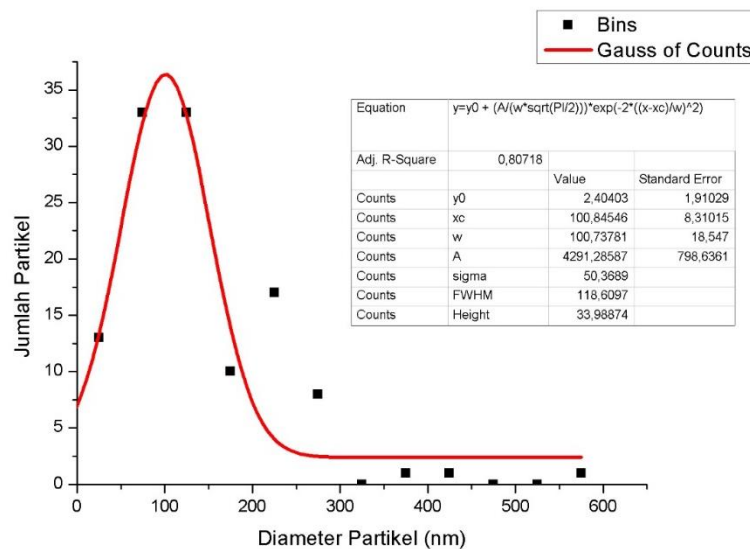
3. Karakterisasi Morfologi Permukaan Dengan Menggunakan SEM

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan pada kristal lapisan TiO_2 . Gambar 33 dan Gambar 35 menampilkan hasil *scanning* morfologi permukaan dari lapisan aktif TiO_2 dan lapisan aktif TiO_2 dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah.



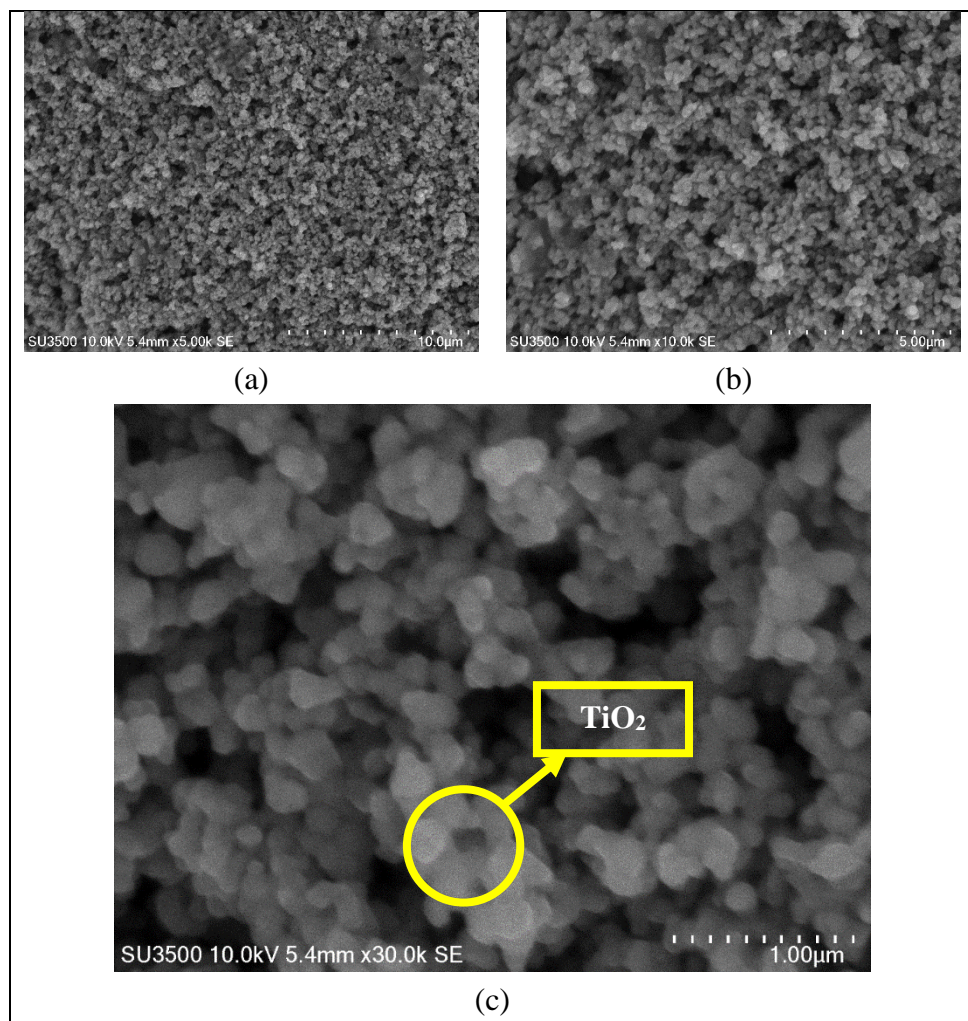
Gambar 33. Foto Morfologi Permukaan Lapisan TiO_2 Dari Hasil Uji SEM: (a) Perbesaran 5000x (b) Perbesaran 10000x (c) Perbesaran 30000x

Gambar 33 menunjukkan uji SEM untuk lapisan aktif TiO₂ dengan 3 perbesaran yaitu (a) perbesaran 5000x, (b) perbesaran 10000x, dan (c) perbesaran 30000x. Pada perbesaran 5000x, yakni pada Gambar 33(a), dapat dilihat bahwa persebaran material cukup merata, namun masih terdapat rongga-rongga hitam yang menunjukkan adanya ketidakrataan pada permukaan. Hal ini dikarenakan metode yang digunakan untuk membuat lapisan menggunakan metode *Doctor Blade*, sehingga permukaan yang terbentuk menjadi tidak rata. Pada Gambar 33(b), yakni pada perbesaran 10000x, ditunjukkan semakin jelas terbentuk rongga-rongga hitam pada permukaan. Pada Gambar 33(c), perbesaran 30000x, ditunjukkan susunan partikel berbentuk bulat tidak beraturan yang saling menggumpal. Hasil SEM ini kemudian diolah dengan menggunakan program *Match!* dan *OriginPro* untuk mengukur diameter partikel dari TiO₂.



Gambar 34. Grafik Hubungan Antara Diameter Partikel Dengan Jumlah Partikel Pada Lapisan TiO₂

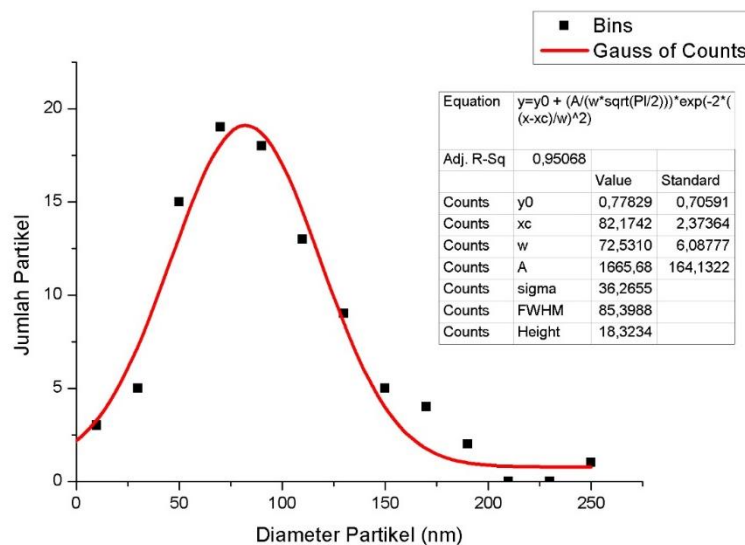
Berdasarkan Gambar 34, ukuran partikel dengan jumlah terbanyak berada pada rentang 50 hingga 150 nm. Dimana ukuran diameter partikel rata-ratanya adalah 100,84 nm.



Gambar 35. Foto Morfologi Permukaan Lapisan TiO_2 Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah Dari Hasil Uji SEM:
(a) Perbesaran 5000x (b) Perbesaran 10000x
(c) Perbesaran 30000x

Berdasarkan Gambar 35 (a) dan (b), ditunjukkan permukaan lapisan TiO_2 dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah mempunyai rongga-rongga hitam, yang menunjukkan adanya ketidakrataan permukaan. Belum nampak adanya citra dari *dye* ekstrak daun Sambang darah pada kedua foto

ini. Pada Gambar 35(c), nampak bentuk partikel TiO_2 yang berbentuk bulat tidak sempurna dan masih menggumpal tidak teratur satu sama lain. Gambar 33(c) ini kemudian diolah dengan program *Match!* dan juga *OriginPro*, dan menghasilkan Grafik Gaussian sebagai berikut:



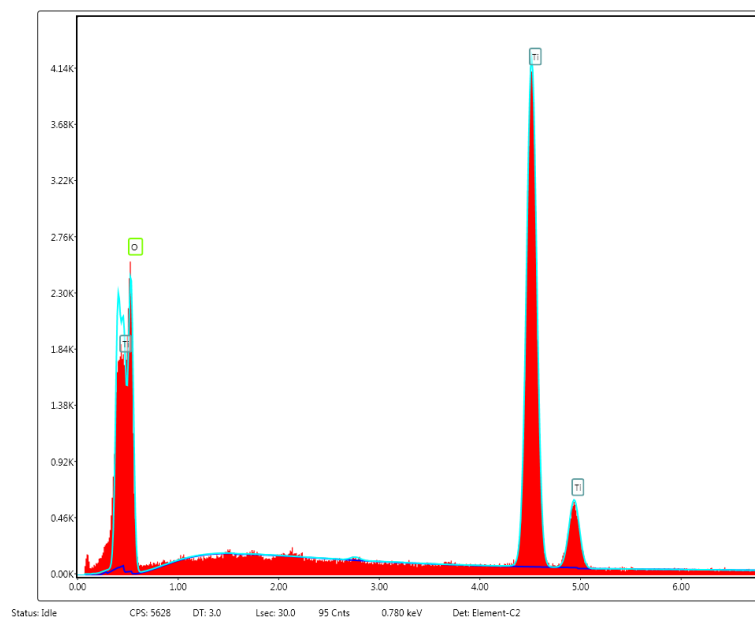
Gambar 36. Grafik Hubungan Antara Diameter Partikel Dengan Jumlah Partikel Pada Lapisan TiO_2 Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah

Gambar 36, menjelaskan jumlah dari partikel TiO_2 terbanyak berada pada diameter dengan rentang 50 hingga 100 nm. Ukuran diameter rata-ratanya adalah 82,17 nm. Data tersebut sesuai dengan penelitian Rita (2011), dimana bentuk dan ukuran terbaik dari partikel TiO_2 yang digunakan sebagai pewarna pada DSSC merupakan partikel TiO_2 dengan bentuk bulatan (mempunyai area permukaan yang luas untuk adsorpsi pewarna dan absorpsi cahaya), saling menggumpal, dan mempunyai diameter dengan rentang 50-200 nm (O'Hyre *et al.*, 2006). Berdasarkan

hasil uji SEM, lapisan TiO_2 yang telah disintesa telah memenuhi kriteria sebagai DSSC.

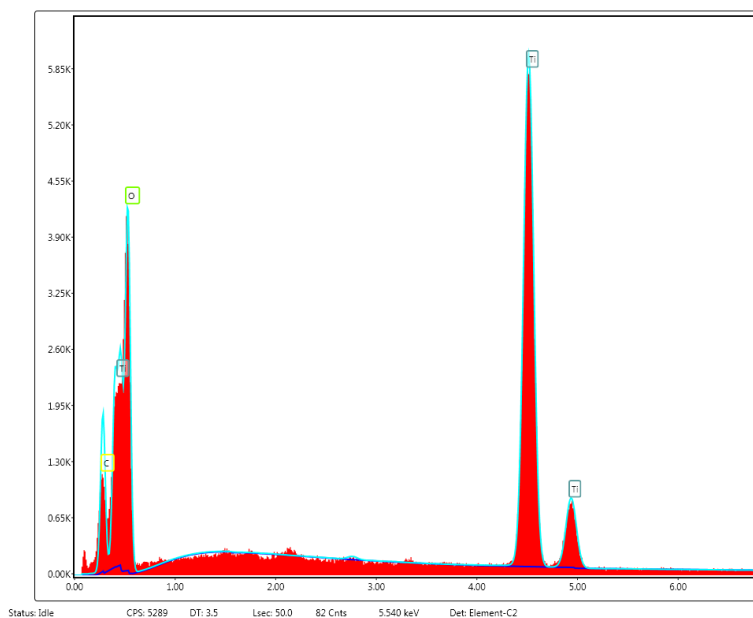
4. Karakterisasi Komposisi Kimia Dengan Menggunakan EDS

Pada Uji EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*), menghasilkan grafik yang menyatakan energi dari sinar-X yang muncul akibat tumbukan elektron sekunder dengan intensitas sinar-X. Prinsip kerja EDS adalah menangkap dan mengolah sinyal sinar-X yang keluar ketika berkas elektron mengenai suatu daerah pada sebuah sampel. Sebagian berkas elektron mengenai suatu daerah pada sebuah sampel. Sebagian berkas elektron yang jatuh akan diserap dan menembus suatu bahan sampel, sedangkan berkas elektron lainnya akan dihamburkan. Dari grafik ini dapat diketahui unsur unsur apa saja yang terkandung dalam material.



Gambar 37. Hasil Uji EDS Pada Lapisan Aktif TiO_2

Hasil dari uji EDS pada lapisan aktif TiO_2 terpapar pada Gambar 37 dimana ditunjukkan bahwa unsur dominan yang terdapat pada material adalah unsur Ti dan O. Unsur Ti ditandai dengan energi K_α sebesar 4,510 keV serta jumlah intensitas sebesar 4157, K_β dengan energi 4,931 keV serta jumlah intensitas sebesar 601, dan L_α dengan energi 0,452 keV serta jumlah intensitas sebesar 1692. Unsur O ditandai dengan energi K_α sebesar 0,523 keV dan jumlah intensitas energinya 2388. Hasil EDS lapisan aktif TiO_2 menunjukkan persentase massa dari Ti sebesar 63,49% dan O sebesar 36,51%. Namun untuk persentase penyusun atom dalam lapisan TiO_2 untuk Ti 36,74% dan untuk O 63,26%. Dengan data ini, maka jumlah atom O dua kali lebih banyak dari jumlah atom Ti, hal ini menyatakan bahwa unsur yang diuji merupakan TiO_2 .



Gambar 38. Hasil Uji EDS Pada Lapisan Aktif TiO_2 Yang Disisipi Dye Ekstrak Daun Sambang Darah

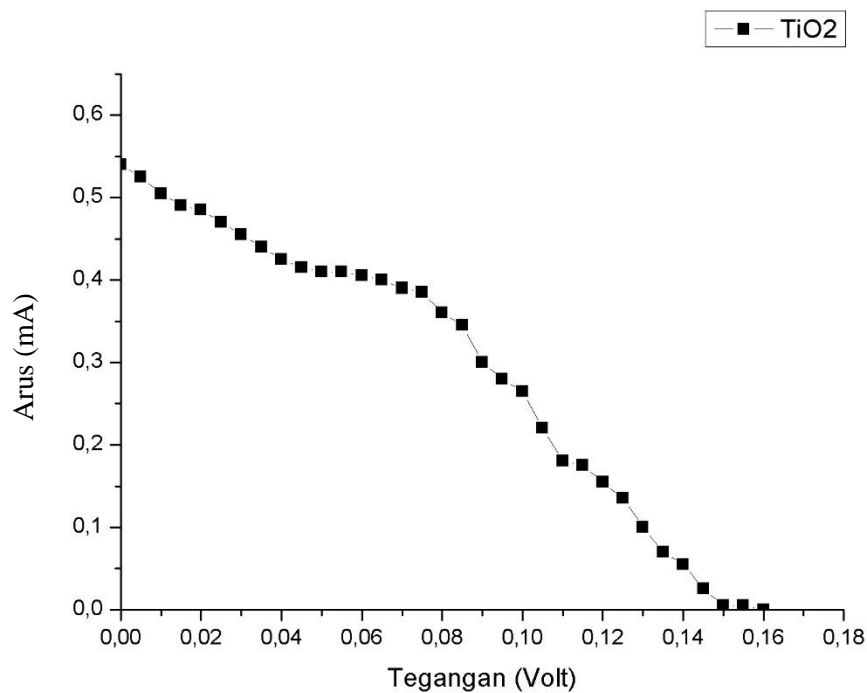
Hasil uji EDS pada lapisan aktif TiO₂ dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah ditunjukkan pada Gambar 38 dimana unsur dominan yang terdapat pada material adalah unsur Ti, O, dan C. Unsur Ti ditandai dengan energi K_α sebesar 4,510 keV serta jumlah intensitas sebesar 5881, K_β dengan energi 4,931 keV serta jumlah intensitas sebesar 865 , dan L_α dengan energi 0,452 keV serta jumlah intensitas sebesar 2067. Unsur O ditandai dengan energi K_α sebesar 0,523 keV dan jumlah intensitas energinya 3938. Unsur C ditandai dengan energi K_α sebesar 0,277 keV dan jumlah intensitas energinya 1154. Hasil EDS lapisan aktif TiO₂ dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah menunjukkan persentase massa dari Ti sebesar 56,04%, O sebesar 37,69%, dan C sebesar 6,27%. Namun untuk persentase penyusun atom dalam lapisan TiO₂ untuk Ti 28,90%, untuk O 58,19%, dan untuk C 12,91%. Adanya tambahan unsur C ini menunjukkan adanya penyisipan pewarna ekstrak daun Sambang Darah pada lapisan TiO₂ yang mengandung *flavonoid* yang merupakan senyawa yang terdiri dari 15 atom karbon (Halhbrock, 1981).

5. Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V)

Pengujian yang terakhir adalah uji arus-tegangan pada DSSC. Pengukuran Tegangan dilakukan dengan menggunakan mesin *Keithly 2041*. Sumber cahaya yang digunakan mempunyai daya sebesar 18 W/m². Sedangkan ukuran penampang dari DSSC yang diuji mempunyai lebar 2,5

cm dan panjang 3 cm, sehingga luas penampangnya adalah $0,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

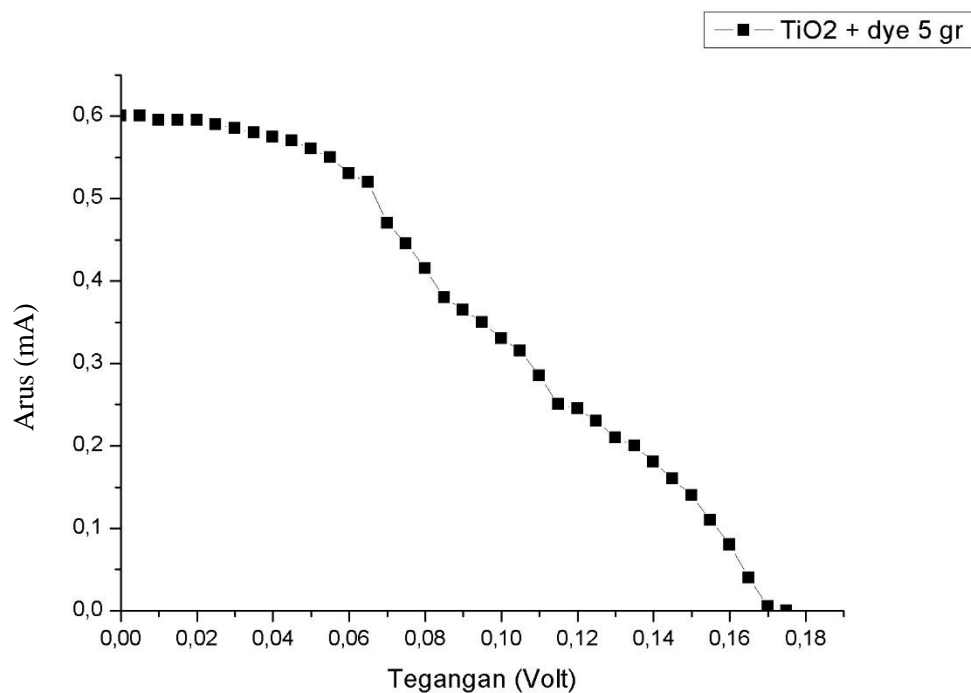
Dengan begitu daya yang masuk pada DSSC adalah 0,0135 Watt.



Gambar 39. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan Pada Sel Surya TiO_2 Tanpa *Dye*

Berdasarkan Gambar 39, lapisan aktif Titanium Dioksida tanpa *dye* mempunyai nilai V_{oc} (tegangan rangkaian terbuka) sebesar $0,16 \pm 0,001$ Volt dan I_{sc} (arus hubung singkat) sebesar $0,54 \pm 0,001$ mA. Sedangkan untuk V_m (tegangan pada titik kerja maksimum) sebesar $0,085 \pm 0,001$ Volt dan I_m (arus pada titik kerja maksimum) sebesar $0,345 \pm 0,001$ mA. Dari data ini, dapat dihitung faktor pengisian (FF) untuk DSSC. Nilai FF untuk DSSc ini adalah 0,33941 dengan efisiensi (η) kerjanya sebesar 0,22%.

Data ini menunjukkan bahwa TiO_2 yang terbentuk mempunyai efisiensi yang rendah karena TiO_2 bekerja lebih efektif pada cahaya ultraviolet, sehingga untuk titik absorbansi pada rentang panjang gelombang yang lain tidak maksimum.

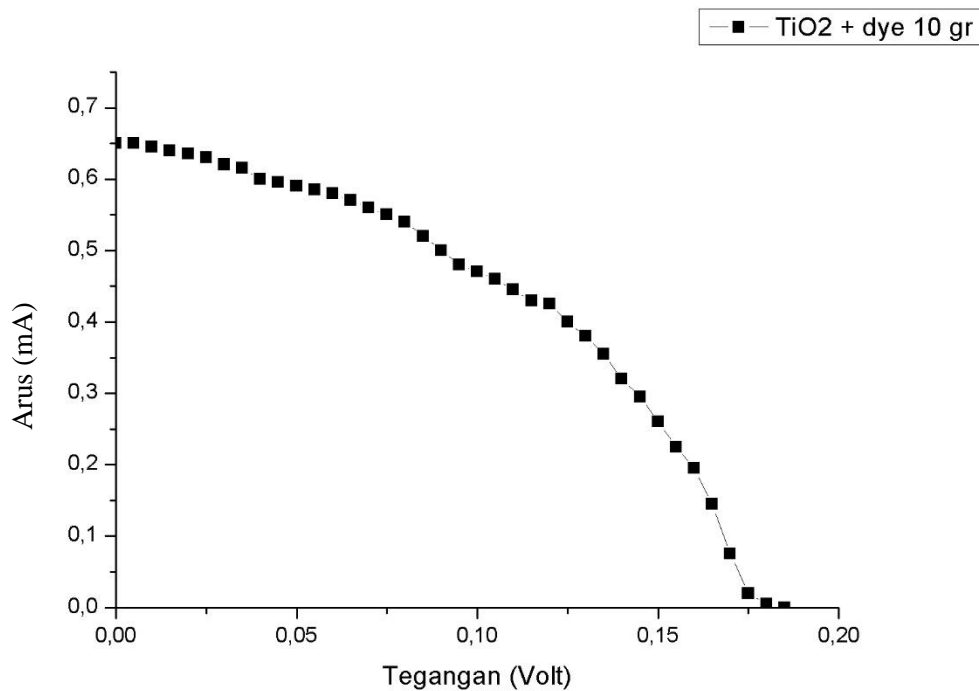


Gambar 40. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan Pada DSSC Dengan *Dye* Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 5 gram

Berdasarkan Gambar 40, DSSC dengan *dye* ekstrak daun sambang Darah konsentrasi 5 gram mempunyai nilai V_{oc} (tegangan rangkaian terbuka) sebesar $0,175 \pm 0,001$ Volt dan I_{sc} (arus hubung singkat) sebesar $0,60 \pm 0,001$ mA. Sedangkan untuk V_m (tegangan pada titik kerja maksimum) sebesar $0,065 \pm 0,001$ Volt dan I_m (arus pada titik kerja maksimum) sebesar $0,52 \pm 0,001$ mA. Dari data ini, dapat dihitung faktor

pengisian (FF) untuk DSSC. Nilai FF untuk DSSc ini adalah 0,32191 dengan efisiensi (η) kerjanya sebesar 0,25%.

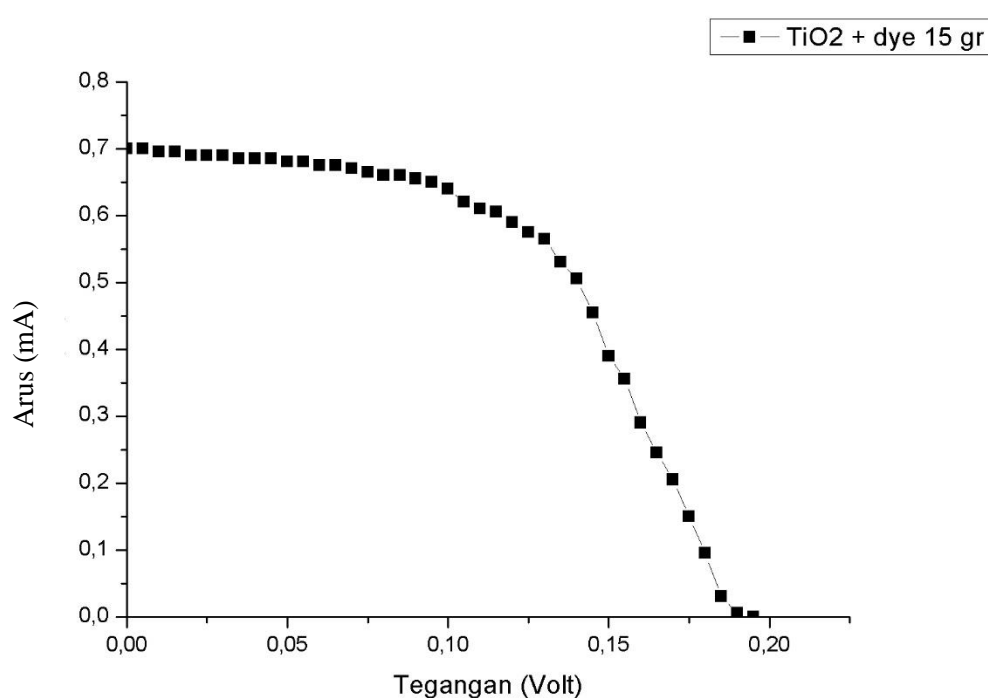
Dengan data ini, ditunjukkan bahwa DSSC mempunyai peningkatan efisiensi karena adanya penambahan *dye* ekstrak daun Sambang Darah. Efisiensi (η) DSSC yang bernilai dari 0,22% menjadi 0,25%. Namun untuk nilai faktor pengisiannya (FF) mengalami penurunan dari 33941 menjadi 0,32191.



Gambar 41. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan Pada DSSC Dengan *Dye* Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 10 gram

Berdasarkan Gambar 41, DSSC dengan *dye* ekstrak daun sambang Darah konsentrasi 10 gram mempunyai nilai V_{oc} (tegangan rangkaian terbuka) sebesar $0,185 \pm 0,001$ Volt dan I_{sc} (arus hubung singkat) sebesar

$0,65 \pm 0,001$ mA. Sedangkan untuk V_m (tegangan pada titik kerja maksimum) sebesar $0,12 \pm 0,001$ Volt dan I_m (arus pada titik kerja maksimum) sebesar $0,425 \pm 0,001$ mA. Dari data ini, dapat dihitung faktor pengisian (FF) untuk DSSC. Nilai FF untuk DSSc ini adalah 0,42441 dengan efisiensi (η) kerjanya sebesar 0,38%.



Gambar 42. Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan DSSC Dengan *Dye* Ekstrak Daun Sambang Darah Konsentrasi 15 gram

Berdasarkan Gambar 42, DSSC dengan *dye* ekstrak daun sambang Darah konsentrasi 15 gram mempunyai nilai V_{oc} (tegangan rangkaian terbuka) sebesar $0,195 \pm 0,001$ Volt dan I_{sc} (arus hubung singkat) sebesar $0,65 \pm 0,001$ mA. Sedangkan untuk V_m (tegangan pada titik kerja

maksimum) sebesar $0,125 \pm 0,001$ Volt dan I_m (arus pada titik kerja maksimum) sebesar $0,575 \pm 0,001$ mA. Dari data ini, dapat dihitung faktor pengisian (FF) untuk DSSC. Nilai FF untuk DSSC ini adalah 0,56706 dengan efisiensi (η) kerjanya sebesar 0,53%.

Berdasarkan data yang telah didapatkan, *dye* ekstrak daun Sambang Darah mampu meningkatkan efisiensi DSSC dimana sebanding dengan naiknya konsentrasi larutan *dye*. Hal ini dibuktikan dengan nilai efisiensi pada DSSC tanpa *dye* sebesar 0,22%, kemudian meningkat menjadi 0,25% saat disisipkan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 5 gr, meningkat lagi menjadi 0,38% saat disisipkan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 10 gr, dan terakhir menjadi 0,53% saat disisipi *dye* ekstrak daun Sambang Darah 15 gr. Perbandingan performansi dari tiap tiap sampel ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Tabel Nilai Faktor Pengisian dan Efisiensi Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan

No.	Sel Surya	Faktor Pengisian	Efisiensi (%)
1	TiO ₂ (Tanpa <i>dye</i>)	0,33941	0,22
2	DSSC (TiO ₂ + <i>dye</i> 5 gram)	0,32191	0,25
3	DSSC (TiO ₂ + <i>dye</i> 10 gram)	0,42441	0,38
4	DSSC (TiO ₂ + <i>dye</i> 15 gram)	0,56706	0,53

Berdasarkan tabel 4, DSSC tanpa pewarna sudah memiliki konversi daya listrik dengan efisiensi 0,22%. Hal ini dikarenakan TiO₂ sebagai

material semikonduktor yang mempunyai celah energi sebesar 3,2 eV (anatase) dan mampu mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung. Nilai efisiensi ini bergantung pada ketebalan lapisan TiO_2 , material elektroda lawan yang digunakan, dan tingkat aktifitas elektrolit yang digunakan (Jiao *et al.*, 2011). Penambahan pewarna dengan variasi konsentrasi pada lapisan TiO_2 meningkatkan unjuk kerja dari DSSC, walaupun nilainya tergolong kecil. Pewarna meningkatkan absorpsi cahaya pada lapisan TiO_2 dengan peran memproduksi elektron bebas yang digunakan untuk mengisi celah energi TiO_2 maupun berfungsi sebagai muatan bebas yang akan menjadi arus listrik karena terkena medan listrik elektroda. Adanya tambahan elektron ini meningkatkan arus listrik yang timbul pada DSSC dan meningkatkan daya listrik pada DSSC (Haque *et al.*, 2005). Hal ini sesuai dengan penelitian Prayoga (2014), TiO_2 mempunyai efisiensi konversi daya listrik diatas 0,04%. Semakin meningkat konsentrasi pewarna, efisiensi daya listrik DSSC juga meningkat, seperti yang ditunjukkan pada tabel 5, hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Rakhman (2011). Berdasarkan data yang telah diperoleh, konsentrasi pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah mempengaruhi unjuk kerja daya listrik DSSC berbasis titania dimana semakin meningkat konsentrasi pewarna yang disisipkan pada DSSC, maka semakin meningkat efisiensi daya listrik dari DSSC.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari karakterisasi dan analisis terhadap penyisipan *dye* ekstrak Daun Sambang Darah pada lapisan aktif titania, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil uji UV-Vis, lapisan aktif TiO_2 mempunyai puncak tertinggi pada panjang gelombang 333 nm dengan nilai absorbansi 1,602; sedangkan pada lapisan TiO_2 yang disisipi *dye* ekstrak daun Sambang Darah mempunyai puncak tertinggi pada panjang gelombang 278 nm dengan nilai absorbansi 2,881; dan panjang gelombang 329 nm mempunyai puncak absorbansi 2,566. Hal ini menandakan penyisipan pewarna daun ekstrak daun Sambang Darah meningkatkan kemampuan absorbansi lapisan TiO_2 .
2. Lapisan aktif TiO_2 yang terbentuk mempunyai struktur kristal jenis anatase dengan bentuk kristal tetragonal serta mempunyai parameter kisi a bernilai 3,783663 Å dan c bernilai 9,467756 Å. Setelah disisipkan *dye* ekstrak daun Sambang darah, TiO_2 yang terbentuk mempunyai struktur kristal jenis anatase dengan bentuk kristal tetragonal serta mempunyai parameter kisi a bernilai 3,773759 Å dan c bernilai 9,467222 Å, sehingga penyisipan *dye* ekstrak daun Sambang Darah tidak mempengaruhi struktur kristal dari lapisan aktif TiO_2 .

3. Hasil uji SEM, antara TiO₂ dengan TiO₂ yang disisipi *dye* ekstrak daun Sambang Darah, menunjukkan bentuk morfologi permukaan yang hampir sama dengan bentuk partikel berupa butiran yang saling menggumpal dan masih terdapat rongga-rongga kosong pada permukaan. Ukuran diameter rata-rata partikel pada TiO₂ adalah 100,84 nm, sedangkan pada TiO₂ yang disisipi *dye* ekstrak daun Sambang Darah adalah 82,17 nm. Dari hasil EDS, persentase partikel penyusun dari TiO₂ adalah Ti sebesar 36,74% dan O sebesar 63,26%, dengan persentasi masa penyusun Ti sebesar 63,49% dan O sebesar 36,51%. Untuk persentase partikel penyusun dari TiO₂ yang disisipi *dye* ekstrak daun Sambang Darah adalah Ti sebesar 46,04%, O sebesar 37,69% dan C sebesar 6,27%, dengan persentasi masa penyusun Ti sebesar 56,04%, O sebesar 58,19%, dan C sebesar 12,91%, sehingga penyisipan pewarna dari ekstrak daun Sambang Darah tidak mempengaruhi morfologi permukaan dan komposisi kimia lapisan titania.
4. Penyisipan *dye* ekstrak daun Sambang Darah mempengaruhi performansi sel surya fotoelektrokimia berbasis titania. Hali ini ditunjukkan berdasarkan hasil uji arus-tegangan pada sel surya TiO₂ tanpa *dye* menghasilkan nilai FF sebesar 0,33941 dan efisiensi kerja sebesar 0,00022 \pm 0,0000003 %, pada DSSC dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 5 gr menghasilkan nilai FF sebesar 0,32191 dan efisiensi kerja sebesar 0,00025 \pm 0,0000004 %, pada DSSC dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 10 gr menghasilkan nilai FF sebesar 0,42441 dan efisiensi kerja sebesar 0,00038 \pm 0,0000003 %, dan pada DSSC dengan *dye* ekstrak daun

Sambang Darah 15 gr menghasilkan nilai FF sebesar 0,56706 dan efisiensi kerja sebesar $0,00053 \pm 0,0000004 \%$.

B. Saran

Saran yang dapat peneliti sampaikan untuk penelitian yang selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukannya analisis tentang jumlah kandungan flavonoid, panjang gelombang absorbansi flavonoid pada pelarut ethanol.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengukur ketebalan lapisan titania.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk nilai resistivitas pada material TiO_2 yang akan diuji beserta perlakuannya.
4. Perlu dilakukan penelitian lanjut untuk mengukur *bandgap* lapisan titania yang telah disisipi *dye*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulah, M.. (2009). *Pengantar Nanosains*. Bandung: Penerbit ITB.
- Alvionita, J., Darwis, D., & Efendi, M. (2016). Ekstraksi dan Identifikasi Senyawa Antosianin dari Jantung Pisang Raja (*Musa X paradisiaca L*) Serta Uji Aktivitas Antioksidan. Skripsi. Universitas Andalas.
- Arini, T., Lalasari, L.H., Yuwono, A.H., *et al.* (2017). Pengaruh Waktu Deposisi dan Temperatur Substrat Terhadap Pembuatan Kaca Konduktif FTO (*Fluorine-Doped Tin Oxide*). *Metalurgi*, 1, 1-8.
- Ariswan. (2010). *Semikonduktor, Handout Kuliah*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Ashraf, M., El-Fattah, Dardir, M. M. (2014). Synthesis and characterization of titanium oxide nanotubes and its performance in epoxy nanocomposite coating. *Journal of Progress in Organic Coating*, 78, 83-89.
- Andrew, Medea. (2015) Analisis Ekonomi Penggunaan Inverter Sel Surya Suatu Pelanggan Rumah Tangga Terhubung dengan Jaringan PLN. Teknik Elektro Universitas Diponegoro.
- Berger, Lev I., (1997). *Semiconductor Material*. Boca Raton: CRC Press.
- Berni, A., Mennig, M., & Schmidt, H. (2004). *Doctor Blade*. New York: Springer Science Business Media.
- Bruno, T.J., & Svoronos, P.N. (2005). *CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts*. CRC Press.
- Campbell, W. M., Jolley K.W., Wagner, P., *et al.* (2007). *Highly Efficient Porphyrin Sensitizer for Dye-Sensitized Solar Cells*. *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 111, No. 32, pp. 11760-11762.
- Dalimartha, Setiawan. (2007). *Atlas Tumbuhan Obat Indonesia*. Jakarta: Puspa Swara.
- Diputra, Wibeng. (2008). Simulator Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya Pada Rangkaian Modul Surya. Depok: Universitas Indonesia
- Diebolt, U. (2003). *The Surface Science of Titanium Dioxide*. *Surface Science Reports*, Vol. 48, 53-229
- Dongsun, Y., Ki, I., Kim, S., *et al.* (2007). *Effect of Annealing Temperature and Method on Structural and Optical Properties of TiO₂ films prepared by RF magnetron Sputtering at Room Temperature*. Republic of Korea: Department of Physics, Changwon National University

- Fessenden, R. J. & Fessenden, J. S. (1995). *Kimia Organik*. Jakarta: Erlangga.
- Goldstein, J., Newbury, D. E., Joy, D. C., et al. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: Third Edition*. USA: Springer US.
- Gupta, N., Alpatt, G.F., Podila, R. (2009). *Prospect of Nanostructure-Based Solar Cells for Manufacturing Future Generations of Potovoltaic Modules. International Journals of Photoenergy*, 3.
- Halhbrock, K. (1981). *Flavonoids. The Biochemistry of Plants*, Vol. 7, 425-426. New York: Academic Press.
- Harbone, J.B. (1957). *Spectral Method of Characterization Anthocyanins. Spectra of Anthocyanins*, Vol. 70, 22-28.
- Harbone, J.B. (1996). Metode Fitokimia Penuntun Cara Modern Menganalisis Tumbuhan. Diterjemahkan oleh Kosasih Padmawinata dan Imam Sudiro, Edisi II. Bandung: ITB.
- Hardin, B. E., Yum, J. H., Hoke, E. T., et al. (2010). High Excitation Transfer Efficiency from Energy Relay Dyes in Dye-Sensitized Solar Cell. *Nano Letters*, Vol.10, 3077-3083, ISSN 1530-6984.
- Haque, J.M., Green, A.N., Palomares, E., et al. (2005). *Charge Transport Versus Recombination in Dye-Sensitized Solar Cells Employing Nanocrystalline TiO₂ and SnO₂ films. Journal of Physics Chemistry B*, Vol 109, 25, 12525-12533.
- Hasimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A.(2005). TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects. *Japanes Journal of Apllied Phyics Vol.44, No.12* (2005), 8269-8285.
- Heyne, K. (1913). *De Nuttige Planten van Nederlandsch-Indie*. Batavia: Ruygrock & Co.
- Hoffman, M.R., Martin, S.T.,Choi, W., Bahneman, D.W., 1995. *EnviromentalApplications of Semiconductor Photocatalysis*, *Chem. Rev.*, 95, 69-96.
- Horn, M., Schwerdtfeger C.F., & Meager, E.P. (1972). *Refinement of The Struture of Anatase at Several Temperatures Sample. Zeitschrift fur Kristallographie*, 136, 273-281.
- Howatt, G. & Breckenridge, R. (1947). *Fabrication of Thin Ceramic Sheet for Capacitor. J. Brownlow, J. Am. Ceram. Soc.*, 30, 327
- Jiao, Yang; Zhang, Fan; & Meng, Sheng. (2011). *Dye Sensitized Solar Cells Principles and New Design*. Beijing: Chinese Academy of Science.

- Khopkar, S.M. 1990. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physic*. New York: John Wiley & Sons.
- Konno, A., Kumara, G. R. A., Kaneko, S. (2007). Solid-State Solar Cell Sensitized With Indoline Dye. *Chemistry Letters Vol.36, No.6 (June 2006)*, 716-717, ISSN 0366-7022.
- Lichtenthaler, H. K. (1982). Synthetis of prenyllipids in vascular plants (including chlorophylls, carotenoids, prenylquinones). *In CRC Handbook of Biosolar Resources, Vol.1*, 405-421.
- Markham, K.R. (1988). Cara Mengidentifikasi Flavonoid. Bandung: ITB.
- Mark, N.M., Chivkunova, O. B., Melo, T.B., *et al.* (2002). *Does a Leaf Absorb Radiation Near Infrared (790-900 nm) Region? A New Approach to Quantitying Optical Reflection, Absorbtion and Transmission Leaves. Photosynthesis Research*, 72, 263-270.
- Mathew, S., Yella, A., Gao, P., *et al.* (2014). *Dye Sensitized Solar Cells with 13% Efficiency Achieved Through The Molecular Engineering of Porphyrin Sensitizer. Nature Chemistry*, 6, 242-247.
- Matthews, R.W., McEvoy, S.R. (1992). *A Comparison of 254 nm and 350 nm Excitation of TiO₂ in Simple Photocatalytic Reactors. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. Vol. 66*, 355-366
- Meng, S.; Ren, J. & Kaxiras, E. (2008). Natural Dyes Adsorbed on TiO₂ Nanowire for Photovoltaic Applicaitons: Enhanced Light Absorption and Ultrafast Electron Injection. *Nano Letters, Vol.8, No.10 (September 2008)*, 3266-3272, ISSN 15306984.
- Mialhe, P. & Charette, J. (1983). Experimental Analysis of I-V Characteristic of Sollar Cells. *Am. J. Phys.*, 51, 68-70.
- Mintorogo, D.S. (2000). Strategi Aplikasi Sel Surya (*Photovoltaic Cells*) Pada Perumahan dan Bangunan Komersial. Surabaya: Universitas Kristen Petra.
- Moller, H.J. (1993). *Semiconductor for Solar Cells*. London: Artech House Inc.
- Muhammad, Rully Fakhry. (2016). Studi Pengaruh Suhu Substrat Terhadap Sifat Fisis Listrik dan Optik Bahan Semikonduktor Lapisan Tipis *Tin Sulfide* (SnS) Hasil Preparasi dengan Teknik Vakum Evaporasi. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Moller, H. J. (1993). *Semiconductor For Sollar Cells*. London: Artech House Inc.

- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). *TiO₂ Photocatalysis: Design and Applications*. *J Photochem Photobiol C* C13:169-18. *Journal of Photochemistry and Photobiology: C Photochemistry*, 3, 169-189.
- Nurhalim, Firdaus, Lysbetti, N., et al. (Oktober 2017). *Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Tegangan Keluaran Modul Sel Surya*. Makalah disajikan dalam Seminar Nasional Teknik Elektro (FORTEI 2017), di Universitas Negeri Gorontalo.
- Okamoto, K., Yamamoto, Y., Tanaka, M., et al. (1985). *Heterogeneous Photocatalytic Decomposition of Pherol Over TiO₂ Powder*. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, Vol 58, 2015-2022.
- O'Hyre, B.R., Nanu, M., Schoonman, J., et al. (2006). *The Influence of TiO₂ Particle Size in TiO₂/CuInS₂ Nanocomposite Solar Cells*, *Adv. Funct. Mater.* 16, 1566-1576.
- O'Regan, B. & Gratzel, M. (1991). A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ films. *Nature*, 335, 737-740.
- Pagliaro, M., Palmisano, G., & Ciriminna, R. (2008). *Flexible Solar Cells*. New York: John Wiley.
- Prayoga, Akhmad F., Eka Maulana, & Pramono, Sholeh H. (2014). Pengujian Dan Analisis Performasi *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) Terhadap Cahaya. *Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya*.
- Raditya, G. (2017). *Sejarah Sel Surya Dan Perkembangannya Hingga Hari Ini*. Diakses pada tanggal 3 September 2018, pukul 09.47 WIB. <https://janaloka.com/sejarah-sel-surya/>
- Rakhman, D.F. (2014). Pengaruh Konsentrasi Klorofil Terhadap Daya Keluaran *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Skripsi. Universitas Brawijaya.
- Ramadhani, Robi. (2012). *Semikonduktor*. Malang: FMIPA Universitas Negeri Malang.
- Rio, R. & Lida, M. (1980). *Fisika dan Teknologi Seikonduktor*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Rita Prasetyowati. (2011). Studi Pengembangan Sel Surya Berbasis TiO₂ Melalui Penyisipan Logam Fe dengan Metode Elektroplating. *Tesis*. Institut Teknologi Bandung.
- Sastrapradja, S. & Bimantoro, R. (1983). *Tanaman Pagar Edisi 26*. Jakarta: LBN.
- Sinamo, Senina, A., (2007). *Mengenal Solar Cell Sebagai Energi Alternatif*. Puslitbang Iptekhan Balitbang Dephan.

- Smallman, R. E. & Bishop, R. J. (2000). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering Science, Process, Applications, Sixth Edition*. New York: Butterworth-Heinemann.
- Smith, J. J. (1922). *Sierheesters V: Euphorbiaceae Teysmannia*. Batavia: G. Kolff & Co.
- Stepanov, A. L., Xiao, X., & Ren, F. (2013). *Implantation of Titanium Dioxide with Transition Metal Ions*. New York: Nova Science Publisher.
- Suhartono, M. T. (1989). *Petunjuk Laboratorium Dasar Biokimia*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Suharyana. (2012). *Dasar-dasar dan Pemanfaatan Difraksi Sinar-X*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyama, et al. (2015). Studi Scanning Electron Microscopy (SEM) Untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, Vol.2, No.2 (November 2015)
- Sumarna. (2016). *Bahan Kuliah Fisika Semikonduktor*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Suryanarayana, C. & Norton, M. G. (1998). *X-Ray Diffraction A Practical Approach*. New York: Plenum Press.
- Suwitra, N. (1989). *Pengantar Fisika Zat Padat*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan
- Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Wiley & Sons.
- Tanaka, K., Capule, M., & Hisanaga, T, (1991). *Effect of Crystallinity of TiO₂ on its Photocatalytic Action*. *Chemical Physics Letters*, Vol. 187, 73-76.
- Wahyu Lestari (2016). Preparasi dan Karakterisasi Lapisan Tipis Sn(S_{0.5}Te_{0.5}) dengan Teknik Evaporasi Vakum. *Skripsi*. Yogyakarta: UNY
- Warren, B. E. (1969). *X-Ray Diffraction*. Amerika: Addition-Wesley Series.
- Wibowo, R.A. (2007). *Transparan seperti Gelas, Konduktif layaknya Logam*. Artikel diakses pada tanggal 19 Agustus 2018, pukul 9.37 WIB. <http://energisurya.wordpress.com/2007/04/23/trasnparan-seperti-gelas-konduktif-layaknya-logam/>.
- Wibowo, R.A. (2013). *Seputar kaca transparan-konduktif oksida – Karakteristik dan pembuatan Indium-Tin Oxide*. Artikel diakses pada tanggal 19 Agustus 2018 , pukul 10.45 WIB.

<http://energisurya.wordpress.com/2013/10/02/seputar-kaca-transparan-konduktif-oksida-karakteristik-dan-pembuatan-indium-tin-oxide/#more-449>.

Wolf. M, Noel. G. T., & Stirn R. J. (1977). *Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells*. IEEE Trans Electron Dev.

Yu, Z.; Li, et al. (2009). Research and Development of Dye-Sensitized Solar Cells. *Materials China*, Vol.28, No.7-8, (August 2009), 7-15, ISSN 1674-3962.

Yuliarto, B. (2008). *Teknologi Sel Surya untuk Energi Masa Depan*. Artikel diakses pada tanggal 19 Januari 2018, pukul 13.07 WIB.
<http://dosen.tf.itb.ac.id/brian/2008/06/01/teknologi-sel-surya-untuk-energi-masa-depan/>

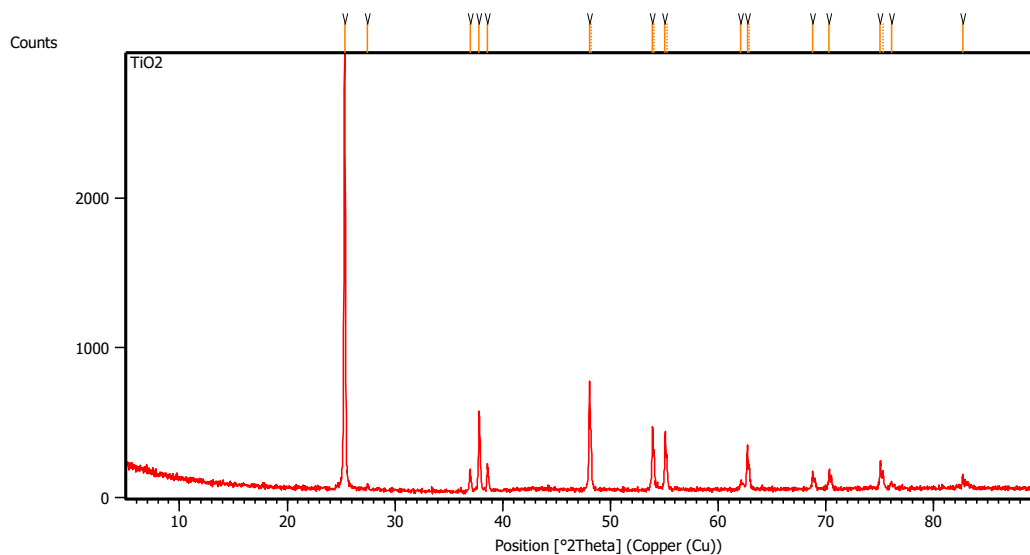
Yusmiati, E.S. (2014). *Energy SupplySolar Cell Pada Sistem Pengendali Portal Parkir Otomatis Berbasis Mikrokontroler AT89S52*. Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya.

Zeng, W., Cao, Y., Bai, Y., et al. (2010). Efficient Dye-Sensitized Solar Cell with an Organic Photosensitizer Featuring Orderly Conjugated Ethylenedioxythiophene and Dithienosilole Blocks. *Chemistry of Materials*, Vol.22, No.5 (March 2010), 1915-1925, ISSN 0897-4756.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Karakterisasi XRD

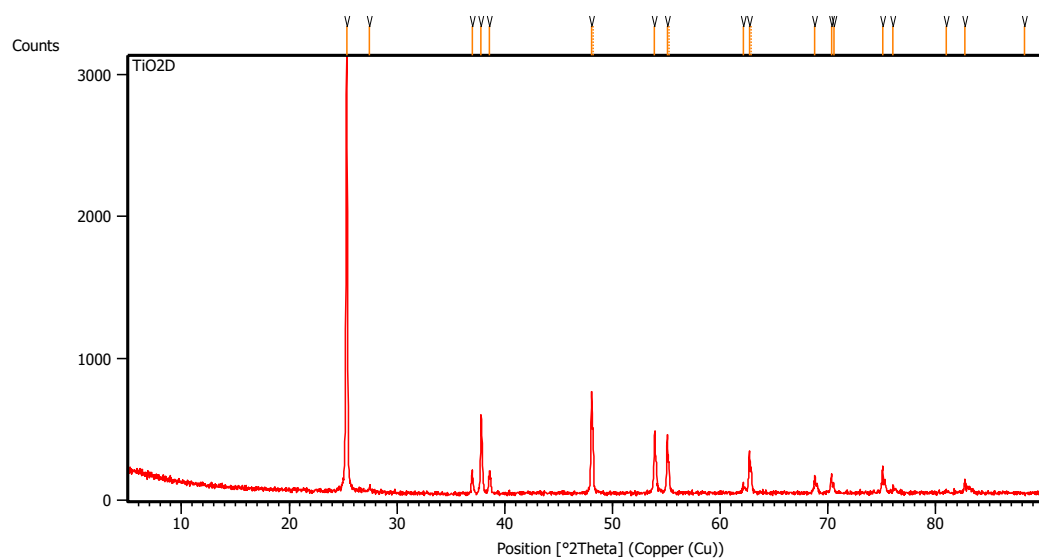
1. Difraktogram Lapisan Aktif TiO₂



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.3289	2925.58	0.1338	3.51639	100.00
27.4561	38.16	0.1004	3.24860	1.30
36.9614	144.12	0.0836	2.43209	4.93
37.7989	530.77	0.1171	2.38011	18.14
38.5835	181.01	0.0669	2.33350	6.19
48.0545	724.82	0.1020	1.89183	24.78
48.2112	323.36	0.0816	1.89073	11.05
53.9004	422.36	0.1020	1.69963	14.44
54.0560	244.23	0.0612	1.69932	8.35
55.0632	376.10	0.0816	1.66646	12.86
55.2321	219.63	0.0816	1.66589	7.51
62.1068	58.64	0.1224	1.49330	2.00
62.7077	291.60	0.0816	1.48043	9.97

62.8883	156.76	0.0816	1.48028	5.36
68.7746	121.77	0.1224	1.36388	4.16
70.2916	120.13	0.1224	1.33812	4.11
75.0420	188.18	0.1224	1.26475	6.43
75.2956	100.99	0.1224	1.26425	3.45
76.0585	39.59	0.1632	1.25036	1.35
82.6645	70.07	0.1020	1.16637	2.39

2. Difraktogram Lapisan aktif TiO₂ dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.3291	3097.48	0.1338	3.51637	100.00
27.4622	32.83	0.1004	3.24790	1.06
36.9798	164.68	0.0669	2.43092	5.32
37.8038	537.38	0.1004	2.37981	17.35
38.6035	165.61	0.1004	2.33234	5.35
48.0619	716.44	0.1020	1.89156	23.13
48.1886	422.79	0.0816	1.89157	13.65

53.9124	438.56	0.1020	1.69928	14.16
55.0842	409.93	0.1224	1.66587	13.23
55.2540	202.27	0.0816	1.66528	6.53
62.1322	77.61	0.0612	1.49275	2.51
62.6954	304.94	0.1020	1.48069	9.84
62.8772	169.59	0.1020	1.48051	5.48
68.7911	116.42	0.1428	1.36360	3.76
70.3229	135.67	0.0612	1.33760	4.38
70.5295	67.47	0.1020	1.33419	2.18
75.0744	182.24	0.1224	1.26428	5.88
76.0422	46.78	0.1020	1.25058	1.51
80.9577	12.61	0.4896	1.18660	0.41
82.6932	94.53	0.1632	1.16604	3.05
88.2377	5.52	0.1632	1.10651	0.18

Lampiran 2. Perhitungan Parameter Kisi Kristal TiO₂ dan TiO₂ dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah

Perhitungan parameter kisi lapisan aktif TiO₂ dengan menggunakan metode analitik. Lapisan aktif TiO₂ identik dengan kisi anatase TiO₂ pada COD[96-900-8214] yang mempunyai bentuk struktur kristal berupa tetragonal. Jarak antar bidang struktur tetragonal dihitung dengan persamaan:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2+k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}}} \quad (11)$$

Persamaan (11) disubstitusikan ke persamaan (7) Hukum *Bragg*

$$2d = \lambda \sin \theta \quad (12)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4d^2} \quad (13)$$

Substitusi persamaan (11) ke persamaan (13), sehingga menjadi

$$\sin^2 \theta = \frac{(\lambda h)^2}{4a^2} + \frac{(\lambda k)^2}{4a^2} + \frac{(\lambda l)^2}{4c^2} \quad (14)$$

Apabila : $A = \frac{\lambda^2}{4a^2}$ dan $C = \frac{\lambda^2}{4c^2}$, maka

$$\sin^2 \theta = Ah^2 + Al^2 + Ck^2 \quad (15)$$

Sehingga parameter kisi a dan c dapat dituliskan

$$a = \sqrt{\frac{\lambda^2}{4A}} \text{ dan } c = \sqrt{\frac{\lambda^2}{4C}}$$

Tabel Perbandingan Puncak Data Antara TiO₂ Hasil Eksperimen Dengan COD[96-900-8124]

No.	Jarak antar bidang (d) Å		Sudut hamburan 2θ	Hkl
	Eksperimen	COD[96-900-8124]		
1	3,51639	3,5163	25,3289	011
2	2,43209	2,4307	36,9614	013
3	2,38011	2,3786	37,7989	004
4	2,33350	2,3322	38,5835	112
5	1,89183	1,8921	48,0545	020

Untuk TiO₂ dipilih pada sudut 48,0545 (020) dan 25,3289 (011)

1. Untuk $2\theta = 48,0545$ (020) dan $\text{CuK}\alpha = 1,540598\text{Å}$

$$\sin^2\theta = Ah^2 + Al^2 + Ck^2$$

$$\sin^2\left(\frac{48,0545}{2}\right) = A(0)^2 + A(2)^2 + C(0)^2$$

$$\sin^2(24,02725) = 4 \frac{(1,540598)^2}{4a^2}$$

$$a = 3,783663 \text{ Å}$$

2. Untuk $2\theta = 25,3289$ (011) dan $\text{CuK}\alpha = 1,540598\text{Å}$

$$\sin^2\theta = Ah^2 + Al^2 + Ck^2$$

$$\sin^2\left(\frac{25,3289}{2}\right) = A(0)^2 + A(1)^2 + C(1)^2$$

$$\sin^2(12,66445) = \frac{(1,540598)^2}{4(3,783663)^2} + \frac{(1,540598)^2}{4c^2}$$

$$c = 9,467756 \text{ \AA}$$

Tabel Perbandingan Puncak Data Antara TiO₂ Hasil Eksperimen Dengan COD[96-900-8124]

No.	Jarak antar bidang (<i>d</i>) Å		Sudut hamburan 2θ	hkl
	Eksperimen	COD[96-900-8124]		
1	3,51637	3,5163	25,3291	011
2	2,43092	2,4307	36,9798	013
3	2,37981	2,3786	37,8038	004
4	2,33234	2,3322	38,6035	112
5	1,89156	1,8921	48,0619	020

Untuk TiO₂ dipilih pada sudut 48,0545 (020) dan 25,3289 (011)

1. Untuk $2\theta = 48,1886$ (020) dan $\text{CuK}\alpha = 1,540598 \text{ \AA}$

$$\sin^2 \theta = Ah^2 + Al^2 + Ck^2$$

$$\sin^2 \left(\frac{48,1886}{2} \right) = A(0)^2 + A(2)^2 + C(0)^2$$

$$\sin^2(24,0943) = 4 \frac{(1,540598)^2}{4a^2}$$

$$a = 3,773759 \text{ \AA}$$

2. Untuk $2\theta = 25,3291$ (011) dan $\text{CuK}\alpha = 1,540598 \text{ \AA}$

$$\sin^2 \theta = Ah^2 + Al^2 + Ck^2$$

$$\sin^2 \left(\frac{25,3291}{2} \right) = A(0)^2 + A(1)^2 + C(1)^2$$

$$\sin^2(12,66455) = \frac{(1,540598)^2}{4(3,773759)^2} + \frac{(1,540598)^2}{4c^2}$$

$$c = 9,467222 \text{ \AA}$$

Lampiran 3. Data COD[96-900-8214]

Entry # 96-900-8214

Phase classification

Name	
Mineral Name	Anatase
Formula	O ₂ Ti
I/Ic	5.440000
Sample Name	9008213
Quality	C (calculated)

References

Publication

Bibliography

Horn M., Schwerdtfeger C. F., Meagher E. P., "Refinement of the structure of anatase at several temperaturesSample: T = 25
Locality: Legenbach quarry, Binnatal, Switzerland", Zeitschrift fur Kristallographie **136**, 273-281 (1972)

Origin of data

Source of entry

COD (Crystallography Open Database)

Link to orig. entry

9008213

Crystal structure

Crystallographic data

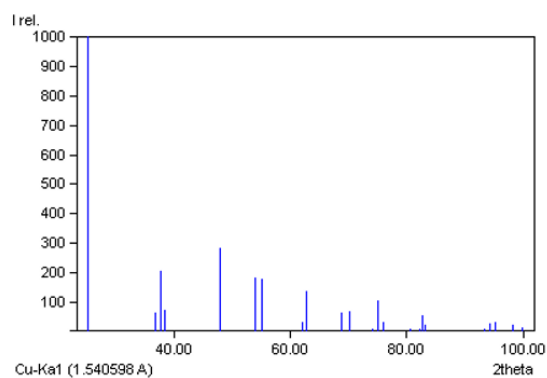
Space group	I 41/a m d (141)																					
Crystal system	tetragonal																					
Cell parameters	a= 3.78420 Å c= 9.51460 Å																					
Cell meas. conditions	T= 298.1 K																					
Atom coordinates	<table><tr><th>Element</th><th>Oxid.</th><th>x</th><th>y</th><th>z</th><th>Bi</th><th>Focc</th></tr><tr><td>Ti</td><td></td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.390000</td><td>1.000000</td></tr><tr><td>O</td><td></td><td>0.000</td><td>0.000</td><td>0.208</td><td>0.612000</td><td>1.000000</td></tr></table>	Element	Oxid.	x	y	z	Bi	Focc	Ti		0.000	0.000	0.000	0.390000	1.000000	O		0.000	0.000	0.208	0.612000	1.000000
Element	Oxid.	x	y	z	Bi	Focc																
Ti		0.000	0.000	0.000	0.390000	1.000000																
O		0.000	0.000	0.208	0.612000	1.000000																

Diffraction data

Diffraction lines

d [Å]	Int.	h	k	l	Mult.
3.5163	1000.0	0	1	1	8
2.4307	62.9	0	1	3	8
2.3786	202.4	0	0	4	2
2.3322	71.3	1	1	2	8
1.8921	280.7	0	2	0	4
1.7001	179.2	0	1	5	8
1.6662	175.6	1	2	1	16
1.4931	29.6	1	2	3	16
1.4808	136.8	0	2	4	8
1.3642	60.3	1	1	6	8
1.3379	66.5	2	2	0	4
1.2792	5.3	0	1	7	8
1.2646	102.4	1	2	5	16
1.2505	27.5	0	3	1	8
1.1893	4.7	0	0	8	2
1.1721	6.7	0	3	3	8
1.1661	51.8	2	2	4	8
1.1605	19.8	1	3	2	16
1.0597	6.7	1	2	7	16
1.0514	26.3	0	3	5	8
1.0432	30.0	2	3	1	16
1.0182	20.1	0	1	9	8
1.0069	12.4	0	2	8	8

Diffraction pattern graphics



Experimental

Physical Properties

Calc. density 3.89400 g/cm³

Remarks

Remarks

Comments - Diffraction pattern calculated by Match!.
- I/Ic calculated by Match!.
- Space group has been derived from given symmetry operations.

Lampiran 4. Perhitungan Parameter Uji Arus Tegangan pada DSSC tanpa *dye* dan DSSC dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah

1. DSSC tanpa *dye*

Perhitungan Faktor Pengisian (FF)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

$$FF = \frac{0,085 \times 0,345 \times 10^{-3}}{0,16 \times 0,54 \times 10^{-3}}$$

$$FF = 0,33941$$

Perhitungan Efisiensi Kerja (η)

$$\eta = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{P_{in} A}$$

$$\eta = \frac{0,33941 \times 0,16 \times 0,54 \times 10^{-3}}{18 \times 0,75 \times 10^{-3}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,22\%$$

2. DSSC dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 5 gr

Perhitungan Faktor Pengisian (FF)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

$$FF = \frac{0,065 \times 0,52 \times 10^{-3}}{0,175 \times 0,60 \times 10^{-3}}$$

$$FF = 0,32191$$

Perhitungan Efisiensi Kerja (η)

$$\eta = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{P_{in} A}$$

$$\eta = \frac{0,32191 \times 0,175 \times 0,60 \times 10^{-3}}{18 \times 0,75 \times 10^{-3}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,25\%$$

3. DSSC dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 10 gr

Perhitungan Faktor Pengisian (FF)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

$$FF = \frac{0,12 \times 0,425 \times 10^{-3}}{0,185 \times 0,65 \times 10^{-3}}$$

$$FF = 0,42441$$

Perhitungan Efisiensi Kerja (η)

$$\eta = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{P_{in} A}$$

$$\eta = \frac{0,42441 \times 0,185 \times 0,65 \times 10^{-3}}{18 \times 0,75 \times 10^{-3}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,38\%$$

4. DSSC dengan *dye* ekstrak daun Sambang Darah 15 gr

Perhitungan Faktor Pengisian (FF)

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

$$FF = \frac{0,0125 \times 0,575 \times 10^{-3}}{0,195 \times 0,65 \times 10^{-3}}$$

$$FF = 0,56706$$

Perhitungan Efisiensi Kerja (η)

$$\eta = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{P_{in} A}$$

$$\eta = \frac{0,56706 \times 0,195 \times 0,60 \times 10^{-3}}{18 \times 0,75 \times 10^{-3}} \times 100\%$$

$$\eta = 0,53\%$$

Lampiran 5. Dokumentasi Penelitian







