



TUGAS AKHIR - TF091381

**OPTIMALISASI FRAKSI VOLUME TiO_2 ANATASE
DAN RUTILE TERHADAP EFISIENSI DSSC (*DYE
SENSITIZED SOLAR CELL*)**

BIBIT LESTARI
NRP. 2410 100 058

Dosen Pembimbing
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.
Dyah Sawitri, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TF091381

**OPTIMIZATION OF ANATASE-RUTILE TiO_2
VOLUME FRACTION TO DSSC (DYE
SENSITIZED SOLAR CELL) EFFICIENCY**

BIBIT LESTARI
NRP. 2410 100 058

Supervisor
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.
Dyah Sawitri, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

OPTIMALISASI FRAKSI VOLUME TiO₂ ANATASE DAN RUTILE TERHADAP EFISIENSI DSSC (*DYE SENSITIZED SOLAR CELL*)

Nama Mahasiswa : Bibit Lestari
NRP : 2410 100 058
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.
Dyah Sawitri, S.T., M.T.

Abstrak

Sinergi antara fase anatase dan rutile TiO₂ dapat meningkatkan pengumpulan cahaya dan efisiensi dari DSSC. Dye sensitized solar cell dibuat dari campuran fase anatase dan rutile TiO₂ nanopartikel yang disintesis menggunakan metode co-precipitation dengan prekursor TiCl₃. TiO₂ dikalsinasi pada suhu 400 °C dan 1000 °C untuk mendapatkan fase anatase dan rutile. Ukuran partikel fase anatase dan rutile yang didapatkan masing-masing 30 nm dan 44,9 nm. Penelitian ini menggunakan pewarna alami yang mengandung pigmen anthosianin, yaitu kulit manggis dan Rhoecy spatachea yang diekstrak dengan pelarut ethanol menggunakan soklet. Pewarna alami dikarakterisasi menggunakan UV-Vis, dari hasil UV-Vis didapatkan absorpsi panjang gelombang 392,5 nm untuk kulit manggis dan untuk pewarna Rhoecy spatachea sebesar 432 nm dan 658 nm. Dari hasil pengujian di bawah sinar matahari, DSSC yang menghasilkan efisiensi terbaik adalah DSSC yang menggunakan rasio anatase/rutile sebesar 90%:10% dengan efisiensi 0,076% untuk pewarna kulit manggis dan 0,063% untuk pewarna Rhoecy spatachea. Sedangkan DSSC dengan yang menggunakan campuran pewarna kulit manggis dan Rhoecy spatachea (20%:80%) menghasilkan efisiensi 0,088%. Efisiensi tinggi yang dihasilkan oleh rasio 90%:10% dikarenakan luas permukaannya yang besar (155,654 m²/g) dan ukuran partikelnya yang kecil (9,11 nm).

Kata kunci: *DSSC, anatase, rutile, kulit manggis, Rhoecy spatachea, Rasio*

OPTIMIZATION OF ANATASE-RUTILE TiO₂ VOLUME FRACTION TO DSSC (DYE SENSITIZED SOLAR CELL) EFFICIENCY

Name : Bibit Lestari
NRP : 2410 100 058
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.
Dyah Sawitri, S.T., M.T.

Abstract

*A synergistic effect between anatase and rutile TiO₂ is known to be able to improve light harvesting and efficiency of DSSC. Dye sensitized solar cell (DSSC) was fabricated using mixture of anatase–rutile phase of TiO₂ nanoparticles prepared through co-precipitation method with TiCl₃ precursors. TiO₂ was calcined at temperatures of 400 °C and 1000 °C to obtain anatase and rutile phases, respectively. The particles size obtained were 30 nm and 44,9 nm for anatase and rutile, respectively. Present research use natural dye containing anthocyanin pigment, namely *Garcinia mangostana* and *Rhoeo spatachea* extracted using ethanol solvent in a soxhlet. These dyes were characterized by using UV-Vis resulting in optimum absorbance at wavelenghts of 392.5 and 423-658 nm for *Garcinia mangostana* and *Rhoeo spatachea*, respectively. The best DSSC performance has anatase/rutile ratio of 90%:10%, with highest conversion efficiencies of 0,076% and 0,063% were obtained for samples sensitized with *Garcinia mangostana* extract and *Rhoeo spatachea* extract, respectively. While, DSSC employing mixed *Garcinia mangostana* and *Rhoeo spatachea* extract has efficiency of 0,088%. The ratio 90%:10% has the largest surface area (155, 654 m²/g) and smallest particle size (9,11 nm).*

Keywords: *DSSC, anatase, rutile, garcinia mangostana, Rhoeo spatachea, ratio*

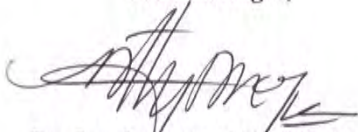
**OPTIMALISASI FRAKSI VOLUME TiO₂ ANATASE
DAN RUTILE TERHADAP EFISIENSI DSSC (DYE
SENSITIZED SOLAR CELL)**

TUGAS AKHIR

Oleh :
Bibit Lestari
NRP : 2410 100 058

Surabaya, 03 Juni 2014
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I ,



Dr.-Ing. Doty Dewi R., S.T., M.T.
NIPN. 19740903 199802 2 001

Pembimbing II ,



Dyah Sawitri, S.T., M.T.
NIPN. 19700101 199512 2 001



**Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTL-ITS**

Dr. Ir. Totok Sohartanto, DEA
NIPN. 19650309 199002 1 001

**OPTIMALISASI FRAKSI VOLUME TiO₂ ANATASE
DAN RUTILE TERHADAP EFISIENSI DSSC (DYE
SENSITIZED SOLAR CELL)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Bahan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

BIBIT LESTARI
NRP. 2410 100 058

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr.-Ing. Doty Dewi R., S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Dyah Sawitri, S.T., M.T. (Pembimbing II)
3. Ir. Zulkifli, M.Sc. (Penguji I)
4. Ir. Agung Budiono, M.Eng. (Penguji II)
5. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc. (Penguji III)
6. Hendra Cordova, S.T., M.T. (Penguji IV)
7. Ruri Agung W, S.T., M.T. (Penguji V)

**SURABAYA
JUNI 2014**

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Optimalisasi Fraksi Volume TiO₂ Anatase dan Rutile Terhadap Efisiensi DSSC (Dye Sensitized Solar Cell)**”. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS dan Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D selaku dosen wali penulis yang telah sabar memberikan petunjuk, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat.
2. Ibu Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, ST, MT. dan Ibu Dyah Sawitri ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Zulkifli, MSc selaku kepala Laboratorium Rekayasa Bahan yang telah memberikan dukungan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
5. Bapak Ruri Agung Wahyuono, ST., MT. yang sudah sabar memberi petunjuk kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini
6. Bapak Paidi, Ibu Suli, adek Wijati, mbk Sulastri dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberi motivasi dan mendoakan penulis dimanapun berada.
7. Laboratorium Energi, Laboratorium XRD, Laboratorium Lingkungan LPPM ITS, Laboratorium XRD, Jurusan Material dan Metalurgi, Laboratorium Elektrokimia dan Korosi, Jurusan Teknik Kimia yang telah membantu melakukan pengujian dalam Tugas Akhir ini.

8. Laboratorium Fotonik dan Laboratorium Pengukuran Fisis, Teknik Fisika ITS yang telah memberikan pinjaman alat untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang Rekayasa Bahan, Rista, Robert, Kiki, Iqbal, Riris, mas Fendi, mas Hak, mas Ewing, mas Dimas, mas Faisal dan mas Farhan.
10. Mbak Icha, Nindy, Renda, Izza, Sally, Ika, Ulfa, Widi, Kintung, Putri, Nailil dan teman-teman 2010 lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 03 Juni 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
COVER	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Titanium Dioksida (TiO_2)	5
2.2 <i>Dye Sensitized Solar Cell</i>	10
2.3 Komponen DSSC.....	12
2.4 Performansi DSSC	17
2.5 Efisiensi Konversi Cahaya Menggunakan IPCE.....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Skema Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Persiapan Alat dan Bahan.....	22
3.3 Ekstraksi Pewarna Kulit Manggis dan Daun <i>Rhoeo</i> <i>spatachea</i>	23
3.4 Sintesis TiO_2 dengan Metode <i>Co-Precipitation</i>	24
3.5 Pengujian UV-vis <i>Spectrophotometer</i> Pewarna Kulit Manggis dan <i>Rhoeo spathacea</i>	25
3.6 Pengujian XRD TiO_2	27
3.7 Pengujian BET Serbuk TiO_2	29
3.8 Pelapisan TiO_2 pada Kaca TCO	30
3.9 Pengujian AFM TiO_2	32

3.10 Perendaman Kaca TCO Berlapis TiO ₂ di Larutan Pewarna.....	33
3.11 Perakitan DSSC	34
3.12 Pengujian Performansi DSSC.....	35
3.13 Skema Penelitian.....	36
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Pengujian XRD Serbuk TiO ₂	37
4.2 Pengujian UV-vis Pewarna Kulit Manggis dan <i>Rhoeo</i> <i>spathacea</i>	38
4.3 Hasil Pengujian BET Serbuk TiO ₂	42
4.4 Hasil Pengujian AFM Lapisan TiO ₂	45
4.5 Spektrum IPCE DSSC.....	46
4.6 Performansi DSSC	48
BAB V KESIMPULAN.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN A (KONSTANTA 1240)	
LAMPIRAN B (EFISIENSI TANPA KARBON)	

DAFTAR TABEL

		Hal
Tabel 2.1	Senyawa pengganti pada struktur antosianin dan tipe antosianin	15
Tabel 3.1	Rancangan penelitian	36
Tabel 4.1	Komposisi TiO ₂ dan ukuran partikel	38
Tabel 4.2	Pita celah cahaya tampak	40
Tabel 4.3	Sifat fisis fraksi volume TiO ₂	43
Tabel 4.4	Porositas dan <i>roughness factor</i> dari masing-masing fraksi	44
Tabel 4.5	Hasil pengukuran <i>Jsc</i> , <i>Voc</i> , <i>Fill factor</i> dan efisiensi	51
Tabel 4.6	Perbandingan hasil pengukuran DSSC dengan menggunakan campuran pewarna dan satu pewarna	54

DAFTAR GAMBAR

	Hal	
Gambar 2.1	Nanokristal TiO ₂ (a) Anatase (b) Rutile (c) Brookite	5
Gambar 2.2	Kurva pengaruh porositas terhadap arus dan tegangan	8
Gambar 2.3	Kurva pengaruh porositas terhadap daya maksimum	8
Gambar 2.4	Pita energi anatase dan rutile	10
Gambar 2.5	Skema proses fotoelektrokimia pada DSSC	11
Gambar 2.6	Tanaman yang mengandung <i>Anthocyanin</i> (a) Buah manggis pada kulitnya (b) <i>Rhoeo spatachea</i>	14
Gambar 2.7	Struktur <i>Anthocyanin</i>	14
Gambar 2.8	Kurva arus tegangan (I-V)	17
Gambar 2.9	Pengaruh hambatan seri terhadap arus-tegangan	18
Gambar 2.10	Rangkaian listrik ekivalen untuk mengukur nilai arus dan tegangan	19
Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian	22
Gambar 3.2	Bubuk kulit manggis	23
Gambar 3.3	Soklet	23
Gambar 3.4	Proses sintesis TiO ₂ (a) Larutan saat ditambah HCl 37% (b) Larutan saat ditambah NH ₄ OH 25% (c) Larutan mulai menghasilkan endapan	25
Gambar 3.5	Prinsip kerja UV-Vis <i>spectrophotometer</i>	25
Gambar 3.6	UV1100 <i>spectrophotometer</i>	27
Gambar 3.7	XRD Philips X'pert MPD	28
Gambar 3.8	NOVA Quantachrome Instrument Version 10.01	30
Gambar 3.9	Pelapisan pasta TiO ₂ pada kaca TCO (<i>Transparent Conducting Oxide</i>) dengan menggunakan metode <i>doctor blade</i>	31
Gambar 3.10	Hasil pelapisan TiO ₂ pada kaca TCO	31

Gambar 3.11	Prinsip kerja AFM	32
Gambar 3.12	Brüker N8 NEOS	33
Gambar 3.13	Perendaman kaca TCO berlapis TiO ₂ pada pewarna (a) Kulit manggis (b) <i>Rhoeo spatachea</i>	34
Gambar 3.14	Perakitan DSSC	34
Gambar 3.15	Skema pengujian IPCE	35
Gambar 3.16	Pengukuran arus dan tegangan dari DSSC	36
Gambar 4.1	Hasil XRD TiO ₂ fase anatase dan rutile	37
Gambar 4.2	Hasil pengujian UV-Vis pewarna kulit manggis dan <i>Rhoeo spatachea</i>	39
Gambar 4.3	Hasil UV-Vis pewarna campuran kulit manggis dan <i>Rhoeo spatachea</i>	41
Gambar 4.4	Kurva adsorpsi-desorpsi serbuk TiO ₂ dengan kandungan TiO ₂ anatase 90% dan 70%	42
Gambar 4.5	Luas permukaan TiO ₂ dari fraksi anatase/rutile sebesar 100%:0% sampai 0%:100%	45
Gambar 4.6	Topografi permukaan TiO ₂ dengan fraksi 90%:10%	45
Gambar 4.7	Topografi permukaan TiO ₂ dengan fraksi 70%:30%	46
Gambar 4.8	Spektrum IPCE pewarna kulit manggis	47
Gambar 4.9	Spektrum IPCE pewarna <i>Rhoeo spathacea</i>	48
Gambar 4.10	Kurva I-V DSSC dengan pewarna kulit manggis	49
Gambar 4.11	Kurva I-V DSSC dengan pewarna <i>Rhoeo spathacea</i>	49
Gambar 4.12	Kurva P-V DSSC dengan pewarna kulit manggis	52
Gambar 4.13	Kurva P-V DSSC dengan pewarna <i>Rhoeo spatachea</i>	52
Gambar 4.14	Efisiensi DSSC dengan fraksi volume 100%:0% sampai 0%:100%	53

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Persediaan energi fosil (minyak, gas, batu bara) dunia dari tahun ke tahun semakin berkurang sedangkan kebutuhan energi semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk. Saat ini kebutuhan energi dunia mencapai 10 terra watt (3×10^{20} Joule/ tahun) dan diprediksi jumlah ini akan terus meningkat hingga mencapai 30 Terra Watt pada tahun 2030 (Yuliarto, 2011). Energi alternatif terbarukan yang sangat menjanjikan dalam mengatasi masalah tersebut adalah sel surya, mengingat energi matahari yang sampai ke permukaan bumi mencapai $2,6 \times 10^{24}$ Joule/tahun (Yuliarto, 2011).

Saat ini sel surya konvensional terbuat dari silikon. Jenis sel surya ini harganya mahal mengingat proses pembuatan yang sulit dan jumlah bahan baku di alam yang sangat terbatas. Hal ini mendorong para peneliti untuk menemukan bahan baru sebagai pengganti silikon yang harganya murah dan mudah didapatkan. Pada tahun 1991 ditemukan pengganti sel surya silikon yang mudah pembuatannya dan biayanya murah yaitu *dye sensitized solar cell* oleh Grätzel dan O'Regan (O'Regan dan Grätzel, 1991). *Dye sensitized solar cell* terdiri dari molekul pewarna, semikonduktor oksida yang memiliki pita celah lebar, *transparent conducting oxide* (TCO) dan elektrolit (Lee, 2011). Komponen yang paling terpenting adalah molekul pewarna, karena spektrum cahaya yang diserap pewarna dan melekatnya pewarna di dalam permukaan semikonduktor sangat menentukan efisiensi dari DSSC (Wongcharee, dkk., 2007). Pewarna yang menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 11-12 % adalah *ruthenium complex* (Chiba, dkk., 2006). Namun *ruthenium complex* mengandung logam berat yang dapat mencemari lingkungan, serta proses sintesisnya sangat rumit dan membutuhkan biaya yang mahal. Alternatif pewarna yang ramah lingkungan dan biayanya cukup murah adalah pewarna alami (Wongcharee, dkk., 2007). Beberapa tanaman yang digunakan sebagai pewarna alami adalah buah

delima dengan efisiensi 1,5 %, buah naga dengan efisiensi 0,22 %, bunga bugenvil dengan efisiensi 0,36 %, bunga mawar kuning dengan efisiensi 0,26 %, bunga lili dengan efisiensi 0,17 %, kulit manggis dengan efisiensi 1,17 %, bunga mawar cina dengan efisiensi 0,27 % , buah kopi dengan efisiensi 0,33%, bayam dengan efisiensi 0,13 % dan tanaman *Rhoeo spatachea* dengan efisiensi 1,49 % (Narayan, 2011).

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan seleksi pewarna dari bahan kulit manggis dan *Rhoeo spathacea*, hal ini dikarenakan kulit manggis dan *Rhoeo spathacea* mengandung zat antosianin (Agustini, 2013). Antosianin sendiri merupakan zat yang dapat menyerap cahaya matahari pada panjang gelombang 530 nm (Zyoud, dkk., 2011). Manggis dan *Rhoeo spatachea* yang berasal dari meksiko merupakan jenis tanaman lokal yang menjanjikan untuk digunakan sebagai *fotosensitizer* pada DSSC, mengingat jumlah kedua tanaman ini melimpah di Indonesia. Hasil panen buah manggis di Indonesia mencapai 79.073 ton (Direktorat Jenderal Pengolahan dan Pemasaran Hasil Pertanian, 2006). Sedangkan untuk *Rhoeo spatachea* jumlah belum diketahui secara pasti, akan tetapi jenis tanaman ini mudah tumbuh dimana saja dan mudah berkembang sehingga jumlahnya banyak di Indonesia.

Komponen DSSC yang mempengaruhi efisiensi DSSC selain molekul pewarna adalah semikonduktor oksida. Contoh semikonduktor oksida adalah TiO_2 , ZnO , SnO_2 , In_2O_3 dan Nb_2O_3 .

TiO_2 merupakan semikonduktor yang baik untuk DSSC dengan pita celah sebesar 3,2 eV untuk fase *anatase* dan 3,0 eV untuk fase *rutile* (Narayan, 2011). Secara umum, TiO_2 memiliki tiga fase yaitu *anatase*, *rutile* dan *brookite*. Dari ketiga fase tersebut, fase yang sering digunakan sebagai DSSC adalah *rutile* dan *anatase*, sedangkan fase *brookite* tidak digunakan karena sulit untuk diproduksi (Narayan, 2011).

DSSC dengan menggunakan semikonduktor TiO_2 *anatase* (nanopartikel) saja dan *rutile* (*nanorods*) saja masing-masing memiliki efisiensi sebesar 0,57 % dan 0,87 %, sedangkan ketika

kedua fase tersebut dicampur dengan komposisi anatase dan rutil sebesar 95%:5% efisiensinya sebesar 1,91%, perbandingan 87%:13% efisiensinya sebesar 2,11%, perbandingan 81%:19% efisiensinya 1,81% dan perbandingan 60%:40% efisiensinya sebesar 1,21% (Li, dkk., 2009). DSSC dengan menggunakan semikonduktor TiO_2 *anatase* dan *rutile* yang dicampur menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan DSSC yang hanya menggunakan *anatase* saja maupun *rutile* saja.

Pada penelitian sebelumnya, DSSC yang menggunakan semikonduktor TiO_2 dengan fraksi *anatase* dan *rutile* sebesar 75%:25% serta menggunakan pewarna kulit manggis dan pewarna *Rhoeo spathacea*, masing-masing memiliki efisiensi sebesar 0,037% dan 0,013% (Agustini, 2013). Salah satu usaha untuk meningkatkan efisiensi dari DSSC dapat dengan cara mengoptimalkan fraksi *anatase* dan *rutile*. Oleh karena itu pada penelitian ini fraksi *anatase* dan *rutile* dari semikonduktor TiO_2 yang digunakan adalah disekitar 75%:25%. Pewarna yang digunakan adalah antosianin dari kulit manggis dan *Rhoeo spathacea*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui fraksi *anatase* dan *rutile* yang paling optimal untuk mendapatkan efisiensi DSSC yang maksimal.

1.2 Permasalahan

Permasalahan pada penelitian tugas akhir ini adalah pada fraksi volume TiO_2 *anatase* dan *rutil* berapa yang optimal agar dihasilkan efisiensi DSSC maksimal?

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh fraksi volume TiO_2 *anatase* dan *rutile* terhadap efisiensi yang dihasilkan DSSC.

1.4 Batasan masalah

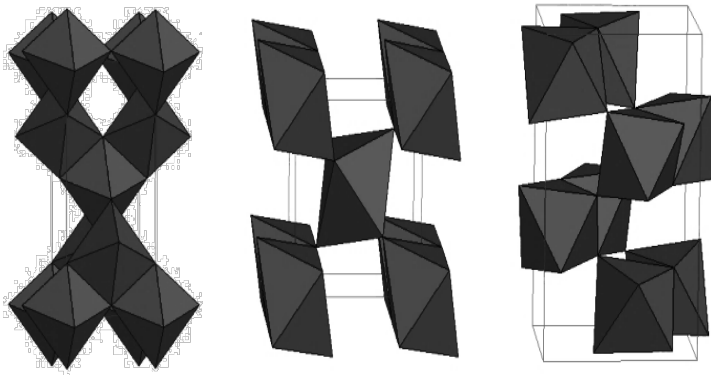
Batasan masalah yang digunakan dalam pelaksanaan tugas akhir ini adalah :

- a. Pelapisan TiO_2 pada kaca TCO menggunakan metode *doctor blade*.
- b. TiO_2 yang digunakan mempunyai variasi fraksi volume *anatase* : *rutile* yaitu 65%:35%, 70%:30%, 80%:20%, 85%:15%, 90%:10% dan 95%:5%. Pemilihan fraksi ini berdasarkan pada hasil yang telah diperoleh pada penelitian sebelumnya (Agustini, 2013).
- c. Kulit manggis dan *Rhoeo spathacea* diekstrak menggunakan metode soklet.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Titanium Dioksida (TiO_2)

Titanium dioksida merupakan jenis material semikonduktor yang tidak terdapat di alam secara alami, namun diekstrak dari *leucocene* dan bijih *ilmenite*. Untuk mendapatkan fase *rutile*, *ilmenite* FeTiO_3 direduksi oleh grafit/carbon di dalam hidrogen pada suhu 510°C (Dewan, dkk., 2010). Selain itu titanium dioksida bisa didapatkan dengan menggunakan proses sintesis, ada beberapa metode sintesis yang bisa digunakan yaitu metode sol gel yang menggunakan larutan *titanium alkoxides*, metode hidrotermal, metode sonokimia (Timuda, 2010), metode *solvothermal*, metode oksidasi langsung, metode *microwave* (Bryanvand, dkk., 2013) dan metode *co precipitation* (Wahyuono, 2013).



Gambar 2.1 Nanokristal TiO_2 (a) *Anatase*, (b) *Rutile*, (c) *Brookite*
(<http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.htm>)

Nanopartikel, *nanorods*, *nanotube*, *nanowire* dan *struktur mesoporous* merupakan macam-macam morfologi yang dimiliki oleh titanium dioksida (Bryanvand, dkk., 2013). Secara umum

TiO₂ memiliki tiga struktur kristal yaitu *anatase*, *rutile* dan *brookite* tampak pada gambar 2.1. *Anatase* merupakan fase TiO₂ yang terbentuk ketika dikalsinasi pada suhu rendah, fase ini memiliki struktur *tetragonal* dengan densitas sebesar 3830 kg/m³. Untuk fase *rutile* didapatkan ketika dikalsinasi pada suhu tinggi, fase ini memiliki struktur *tetragonal* dengan densitas sebesar 4240 kg/m³. Sedangkan *brookite* merupakan fase yang sulit ditemukan, fase *brookite* memiliki struktur *rhombohedral* dengan densitas sebesar 4170 kg/m³ (Diebold, 2002). Transisi perubahan fase *anatase* ke fase *rutile* terjadi pada suhu antara 600 °C – 700 °C (Avcı, dkk., 2009).

Fase TiO₂ *anatase* lebih fotoaktif dibandingkan dengan fase *rutile*, hal ini dikarenakan luas permukaan *anatase* lebih besar dari pada *rutile* sehingga sisi aktif *anatase* lebih besar dibandingkan yang dimiliki *rutile*. Sedangkan fase *brookite* merupakan fase yang paling tidak stabil (Narayan, 2011). TiO₂ pada fase *anatase* umumnya stabil pada ukuran partikel kurang dari 11 nm, fase *brookite* pada ukuran partikel 11 – 35 nm, dan fase *rutile* di atas 35 nm (Zhang, dkk., 2000).

Kelebihan semikonduktor titanium dioksida adalah tidak beracun, tersedia secara luas dan biaya proses pembuatannya cukup rendah/murah (Grätzel, 2003). Sehingga titanium dioksida digunakan dalam berbagai aplikasi. Antara lain sebagai fotokatalis contohnya adalah *self cleaning*, sebagai sel surya untuk menghasilkan energi listrik, sebagai sensor biologi dan kimia, sebagai pengendalian korosi dengan menggunakan metode pelapisan, sebagai pigmen putih untuk cat atau produk kosmetik, sebagai pelapis optik, sebagai campuran keramik dan sebagai devais elektrik (Diebold, 2002), sebagai campuran pasta gigi, sebagai *lotions* kulit, sebagai kapasitor dan pewarna makanan (Bryanvand, dkk., 2013).

Dalam aplikasi semikonduktor untuk *dye sensitized solar cell*, semikonduktor dioksida merupakan jantung dari DSSC itu sendiri, karena semikonduktor oksida digunakan untuk mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Ukuran partikel semikonduktor oksida yang digunakan harus

dalam skala nano, karena jika ukuran partikel dalam skala nano maka luas permukaan partikel secara keseluruhan akan semakin besar, sehingga menaikkan jumlah pewarna yang terserap dan akan menaikkan jumlah cahaya yang teradsorpsi dan membuat efisiensi DSSC akan meningkat. Selain itu semikonduktor yang digunakan memiliki morfologi yang berpori, agar pewarna dapat masuk ke sela-sela pori dan bisa terjerap ke semua permukaan partikel TiO_2 (Timuda, 2010). Untuk mengetahui besar/kecilnya luas permukaan internal dari lapisan nanopartikel dapat menggunakan *roughness factor*. *Roughness factor* sendiri adalah total luas lapisan per luas substrat (μm). Lapisan nanopartikel yang baik memiliki *roughness factor* sekitar ~ 1000 , karena ketika nilai *roughness factor* ~ 1000 , lapisan nanopartikel dapat menjebak/menyerap pewarna yang cukup agar menghasilkan adsorpsi cahaya yang tinggi pada daerah UV-Vis (Law, dkk., 2005). Berikut adalah persamaan dari *roughness factor* (Beckstein, dkk., 2003).

$$R = \rho(1 - P)S \quad (2.1)$$

Dengan:

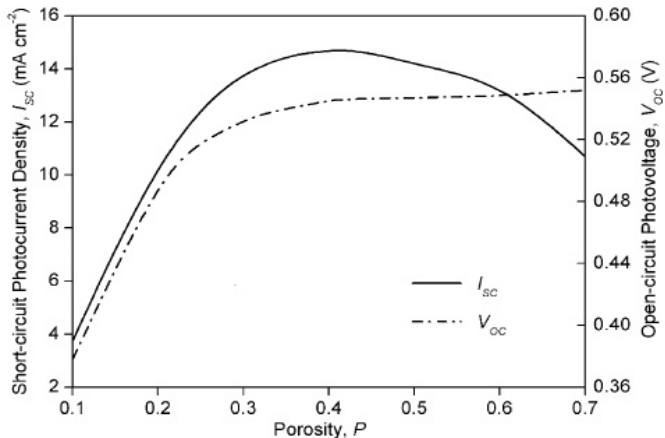
ρ = Massa jenis TiO_2 (g/cm^2)

P = Porositas (%)

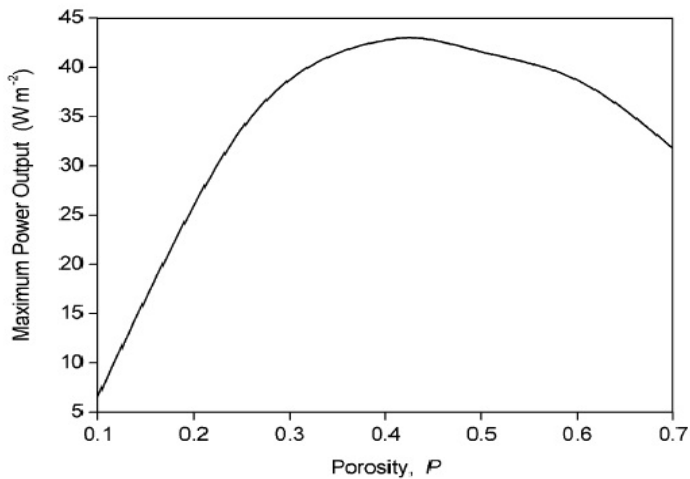
S = Luas permukaan (m^2/g)

Porositas dari lapisan semikonduktor sangat mempengaruhi performansi dari DSSC. Hal ini dikarenakan porositas mempengaruhi koefisien adsorpsi cahaya (α) dan koefisien difusi elektron (D) sehingga akan mempengaruhi arus dan tegangan (I-V) yang dihasilkan. Semakin kecil nilai porositas maka koefisien adsorpsi cahaya semakin meningkat. Ketika koefisien adsorpsi cahaya meningkat maka arus dan tegangan yang dihasilkan juga akan meningkat, sedangkan ketika koefisien difusi elektron meningkat maka arus yang dihasilkan akan meningkat akan tetapi tegangan yang dihasilkan akan menurun. Secara keseluruhan ketika nilai porositas meningkat maka arus dan tegangan yang

dihasilkan oleh DSSC akan meningkat pula (Gambar 2.2). Porositas yang baik digunakan untuk DSSC adalah sekitar 0,41, karena ketika porositasnya 0,41 nilai daya maksimum (P_{MPP}) yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan yang lain (Gambar 2.3) (Ni, dkk., 2005).



Gambar 2.2 Kurva Pengaruh Porositas terhadap arus dan tegangan (Ni, dkk., 2005)



Gambar 2.3 Kurva pengaruh porositas terhadap daya maksimum (Ni, dkk., 2005)

Untuk mengetahui nilai porositas dari sebuah semikonduktor nanopartikel dapat menggunakan persamaan dibawah ini (Beckstein, dkk., 2003).

$$P = \frac{V_p}{(\rho^{-1} + V_p)} \quad (2.2)$$

Dengan:

P = porositas

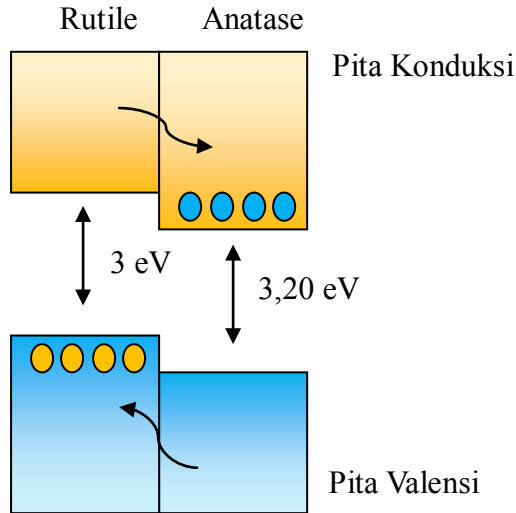
V_p = Volume pori (cm^3/g)

ρ^{-1} = Invers dari massa jenis TiO_2 ($0,2364 \text{ cm}^3/\text{g}$)

Dari berbagai jenis semikonduktor oksida seperti TiO_2 , ZnO , CdSe , CdS , WO_3 , Fe_2O_3 , SnO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , In_2O_3 dan Nb_2O_3 . TiO_2 merupakan semikonduktor oksida yang sering digunakan, karena TiO_2 memiliki memiliki pita celah yang besar ($>3,00 \text{ eV}$) sehingga mampu menyerap energi foton pada sebagian besar spektrum cahaya matahari (Yuwono, dkk. 2011). Pita celah dari TiO_2 *rutile* adalah $3,0 \text{ eV}$ setara dengan energi cahaya dengan panjang gelombang 413 nm , sedangkan pita celah dari TiO_2 anatase adalah $3,2 \text{ eV}$ setara dengan energi cahaya dengan panjang gelombang 388 nm (Kalyanasundaram dan Grätzel, 1998 d dalam Narayan, 2011). Ketika fase *anatase* dan *rutile* dicampur maka pita celah yang dihasilkan berada pada rentang pita celah *rutile* dan *anatase*. Perbandingan fraksi *anatase* dan *rutile* $88\%:12\%$ mempunyai pita celah sebesar $3,15 \text{ eV}$ sedangkan untuk fraksi $2\%:98\%$ mempunyai pita celah sebesar $3,03 \text{ eV}$ (Toyoda, dkk., 2012). Semakin banyak fase *rutile* yang ditambahkan maka akan membuat pita celah yang dihasilkan mengalami penurunan mendekati pita celah *rutile*.

Anatase memiliki tegangan pita datar $0,2 \text{ eV}$ lebih negatif dibandingkan *rutile*, Hal ini menunjukkan bahwa pita konduksi *anatase* $0,2 \text{ eV}$ lebih besar dibandingkan *rutile*. Gambar 2.4 menunjukkan diagram pita energi *anatase/rutile*, pada gambar

tersebut terlihat bahwa ketika *anatase* dan *rutile* dicampur elektron akan berpindah dari pita konduksi *rutile* ke pita konduksi *anatase*. Campuran ini memiliki pita penjarangan sebesar 0,4 eV, hal ini akan menaikkan *photoactivity*-nya (Scanlon, dkk., 2013).



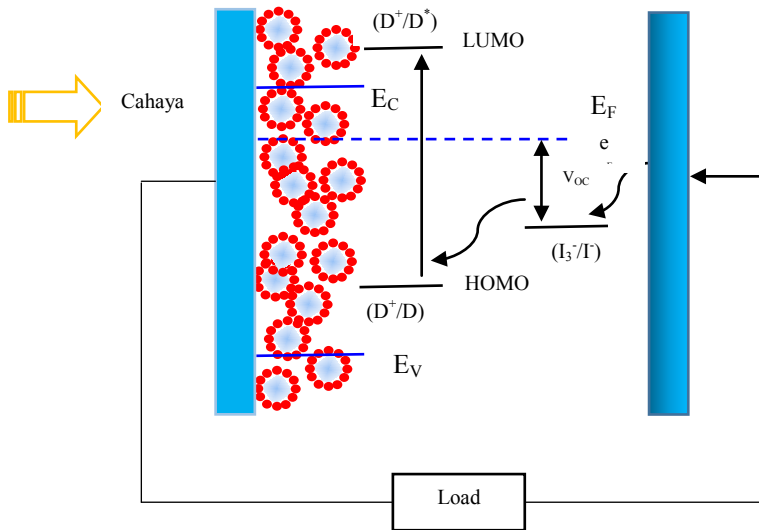
Gambar 2.4 Band energi *anatase* dan *rutile* (Scanlon, dkk., 2013)

Titanium dioksida merupakan semikonduktor oksida yang memiliki stabilitas kimia yang baik dibawah sinar cahaya tampak (Luque dkk, 2003 d alam Narayan, 2011). Pita konduksi dari titanium dioksida sangat cocok untuk pewarna antosianin, dimana hal ini mempengaruhi injeksi elektron dari molekul pewarna ke dalam semikonduktor oksida (Kay dan Grätzel, 1996).

2.2 Dye Sensitized Solar Cell

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) adalah devais yang digunakan untuk mengkonversi energi cahaya tampak ke energi listrik, berdasarkan sensitivitas dari lebar celah pita semikonduktor (Wongcharee, dkk., 2007). DSSC memiliki

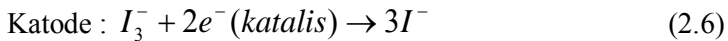
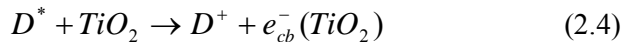
kelebihan dibandingkan dengan sel surya konvensional yaitu ramah lingkungan, biaya pembuatannya murah dan mudah serta mempunyai performansi yang tinggi (Lee, dkk., 2011). Efisiensi DSSC tergantung dengan tingkat penyerapan spektrum cahaya oleh pewarna dan pelekatan pewarna pada permukaan semikonduktor.



Gambar 2.5 Skema proses fotoelektrokimia pada DSSC

Siklus kerja *Dye sensitized solar cell* ditunjukkan pada gambar 2.5. Foton akan diserap oleh molekul pewarna yang ada di permukaan semikonduktor titanium dioksida dan elektron akan tereksitasi (D^*) dari tingkat *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) ke tingkat *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO) ketika molekul pewarna menyerap sejumlah foton dengan energi yang sesuai. Setelah itu elektron akan diinjeksikan ke semikonduktor titanium dioksida dan meninggalkan pewarna (D^+). Kemudian elektron menuju kontak pada sisi bagian belakang yang terbuat dari *transparent conducting oxide* (TCO) (elektroda negatif/anoda), dari TCO elektron menuju ke sirkuit

eksternal dan akhirnya menuju ke elektroda lawan (elektroda positif/katoda). Setelah dari elektroda lawan, elektron ditransfer ke elektrolit triiodide dan menghasilkan iodine, siklus ditutup dengan proses reduksi yang dialami pewarna yang teroksidasi oleh iodine dalam elektrolit (Halme, 2002). Berikut adalah siklus operasi pada DSSC dalam bentuk reaksi kimia.



Nilai arus saat kondisi *short circuit* (I_{sc}) tergantung dengan jumlah foton saat penyinaran dan performansi pewarna, sedangkan nilai tegangan pada kondisi *open circuit* (V_{oc}) ditentukan oleh perbedaan potensial antara pita konduksi TiO_2 dengan potensial dari pasangan elektrolit redoks yaitu I^-/I_3^- (Cahen, 2000 dalam Halme, 2002).

2.3 Komponen DSSC

Dye sensitized solar cell terdiri dari empat bagian yaitu anoda yang terbuat dari kaca TCO yang di lapisi oleh nanopartikel semikonduktor oksida (TiO_2), *fotosensitizer* yang berupa pewarna untuk menangkap foton, larutan elektrolit dan katoda/elektroda lawan yang terbuat dari kaca TCO yang dilapisi platina atau karbon.

A. Semikonduktor Oksida

Semikonduktor oksida yang sering digunakan untuk *dye sensitized solar cell* adalah TiO_2 fase *anatase* dan *rutile* yang dijelaskan pada sub bab 2.1.

B. *Fotosensitizer*/Pewarna Alami

Fotosensitizer pada *dye sensitized solar cell* digunakan untuk mengadsorpsi cahaya matahari/foton. Sebuah *fotosensitizer* yang digunakan harus memenuhi syarat sebagai berikut.

- *Fotosensitizer* harus dapat menyerap cahaya pada daerah cahaya tampak.
- *Fotosensitizer* harus dapat melekat/teradsorpsi pada permukaan semikonduktor secara kuat.
- *Fotosensitizer* harus dapat menginjeksikan elektron dalam pita konduksi semikonduktor oksida secara efisien.
- *Fotosensitizer* harus memiliki beberapa gugus =O atau –OH (Smestad, 1998 dalam Narayan, 2011).
- Level energi dari pewarna/*fotosensitizer* harus sesuai dengan semikonduktor dan elektrolit yang digunakan (Lee, dkk., 2011).

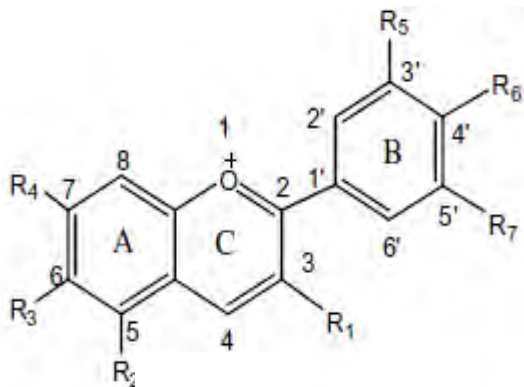
Sampai saat ini pewarna yang mampu menghasilkan efisiensi tertinggi adalah *Ruthenium complex* yang mencapai 11-12% (Chiba, dkk., 2006). Karena *Ruthenium complex* jumlahnya terbatas, mengandung logam berat yang dapat mencemari lingkungan, serta proses sintesisnya sangat rumit dan membutuhkan biaya yang mahal, maka para peneliti berusaha menemukan pewarna baru dari ekstrak daun, bunga dan buah (Wongcharee, dkk., 2007).

Pigmen tanaman yang dapat dijadikan sebagai pewarna (*fotosensitizer*) adalah *Betacyanins*, *Carotenes*, *Xanthophylls*, *Chlorophyll* dan *Anthocyanins* (Narayan, 2011). Dari berbagai jenis pigmen tanaman yang sering digunakan sebagai *fotosensitizer* adalah *Anthocyanins*. *Anthocyanins* adalah zat yang memberikan warna merah, biru dan ungu pada buah, bunga, sayur dan daun (Ngo, dkk., 2009). *Anthocyanins* termasuk keluarga pigmen *Flavonoid*, *Flavonoid* sendiri merupakan pigmen yang dapat menyerap cahaya pada panjang gelombang yang besar. *Anthocyanins* dari berbagai jenis tanaman memberikan performansi penyerapan yang berbeda-beda (Narayan, 2011). Gambar 2.6 merupakan contoh tanaman Indonesia yang mengandung *Anthocyanins* yaitu buah manggis

pada kulitnya dan tanaman *Rhoeo spatachea* (Agustini, 2013). *Dye sensitized solar cell* dengan pewarna kulit manggis menghasilkan efisiensi sebesar 1,17 % dan DSSC dengan pewarna *Rhoeo spatachea* menghasilkan efisiensi sebesar 1,49 % (Narayan, 2011).



Gambar 2.6 Tanaman yang mengandung *Anthocyanins* (a) Buah Manggis pada kulitnya (b) *Rhoeo Spatachea*



Gambar 2.7 Struktur *Anthocyanins* (Ovando, dkk., 2008)

Gambar 2.7 merupakan struktur antosianin secara umum. R1, R2, R3, R4, R5, R6 dan R7 pada gambar 2.7 merupakan sebuah simbol. Simbol-simbol tersebut akan diganti dengan

senyawa (-H) dan (-OH). Peletakan senyawa-senyawa tersebut pada setiap simbol akan menghasilkan tipe antosianin tertentu (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Senyawa pengganti pada struktur antosianin dan tipe antosianin (Ovando, dkk., 2008)

Senyawa Penganti							Nama
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	
H	OH	H	OH	H	OH	H	<i>Apigeninidin</i>
OH	OH	OH	OH	H	OH	H	<i>Aurantininidin</i>
OH	OH	H	OH	OH	OH	H	<i>Cyanidin</i>
OH	OH	H	OH	OH	OH	OH	<i>Delphinidin</i>
H	OH	H	OH	OH	OH	H	<i>Luteolin</i>
OH	OH	H	OH	H	OH	H	<i>Pelargonidin</i>
OH	H	OH	OH	H	OH	H	<i>Riccionidin A</i>
H	OH	H	OH	OH	OH	OH	<i>Tricetinidin</i>

C. Elektrolit

Elektrolit adalah larutan yang mengandung partikel-partikel bermuatan (ion) yang dapat menghantarkan arus listrik. Di dalam DSSC elektrolit digunakan sebagai medium transport muatan antara semikonduktor TiO_2 dan elektroda lawan, elektrolit yang biasa digunakan adalah iodine (I^-) dan triiodide (I_3^-) sebagai pasangan redoks karena menghasilkan performansi yang paling baik (Yuwono, dkk., 2011). Selain I^-/I_3^- , elektrolit yang bisa digunakan untuk DSSC adalah bromine Br^-/Br_2 (Narayan, 2011). Karakteristik ideal dari pasangan redoks untuk elektrolit DSSC antara lain,

- Secara termodinamika, potensial redoksnnya berlangsung sesuai dengan potensial redoks dari pewarna untuk tegangan sel maksimal.
- Kelarutannya tinggi terhadap pelarut untuk mendukung konsentrasi yang tinggi dari muatan pada elektrolit.

- Pelarut memiliki koefisien difusi yang tinggi untuk transportasi massa yang efisien.
- Tidak ada karakteristik spektral pada daerah cahaya tampak untuk menghindari absorpsi cahaya datang pada elektrolit.
- Kestabilan yang tinggi dalam bentuk tereduksi maupun teroksidasi.
- Secara kimia harus inert terhadap komponen lain pada DSSC (Wolfbauer, dkk., 2001 dalam Halme, 2002).

Elektrolit iodine/triiodide dapat dibuat dengan mencampurkan I_2 dalam pelarut dan kemudian ditambahkan KI. Performansi elektrolit tergantung dengan pelarut yang digunakan. Pelarut yang menghasilkan efisiensi maksimum adalah *acetonitrile* (Kay dan Gräzel, 1996). Agar elektrolit yang digunakan memiliki efisiensi yang bagus maka, sebuah pelarut harus memiliki kriteria sebagai berikut.

- Pelarut harus memiliki kekentalan yang rendah.
- Pelarut harus cair dan mudah menguap pada temperatur operasi antara $-40\text{ }^\circ\text{C}$ sampai $80\text{ }^\circ\text{C}$.
- Pelarut harus memiliki konstanta dielektrik yang tinggi.
- Pasangan redoks diharapkan dapat larut dalam pelarut.
- Pelarut tidak boleh mengandung racun (Stanley, 1998 dalam Halme, 2002).

D. Elektroda

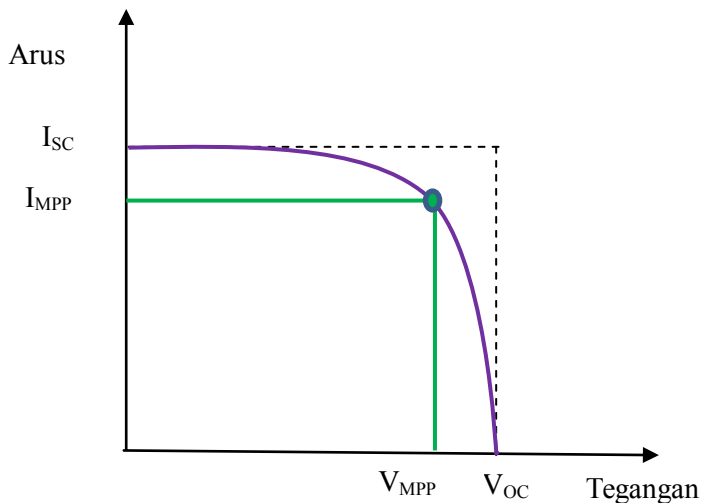
Elektroda lawan digunakan untuk membantu elektron dari rangkaian eksternal kembali ke elektrolit redoks. Sebuah elektroda lawan harus terbuat dari bahan yang memiliki resistansi perpindahan elektron yang rendah dan kerapatan arus yang tinggi (Narayan, 2011).

Untuk mempercepat reaksi reduksi triiodide pada kaca TCO, dibutuhkan sebuah katalis. Katalis yang sering digunakan adalah platina, karena platina merupakan katalis yang sangat bagus untuk mereduksi triiodide, dalam proses deposisi platina ke dalam permukaan kaca TCO terdapat empat metode, yaitu elektrokimia, *sputtering*, *spin coating* dan *pyrolysis* (Halme, 2002).

Walaupun platina memiliki sifat katalitik yang tinggi akan tetapi platina merupakan material yang harganya mahal. Oleh karena itu elektroda platina bisa diganti dengan elektroda karbon. Elektroda karbon dapat terbuat dari campuran *carbon black*, *graphit powder*, dan nanopartikel TiO_2 . Jenis elektroda ini memiliki konduktivitas yang tinggi (memiliki hambatan sebesar $5 \Omega/\text{sq}$ dengan ketebalan $50 \mu\text{m}$) (Kay dan Grätzel, 1996). Elektroda karbon memiliki luas permukaan yang tinggi dan memiliki keaktifan reduksi triiodide yang menyerupai elektroda platina (Kay dan Grätzel, 1996). Untuk elektroda karbon sendiri sekarang masih dikembangkan, untuk jenis *carbon aerogel* menghasilkan efisiensi sebesar 4,8 %, *active carbon* menghasilkan efisiensi sebesar 5,7 % dan untuk *carbon black* menghasilkan efisiensi sebesar 7,1 % (Zhao, dkk., 2011).

2.4 Performansi DSSC

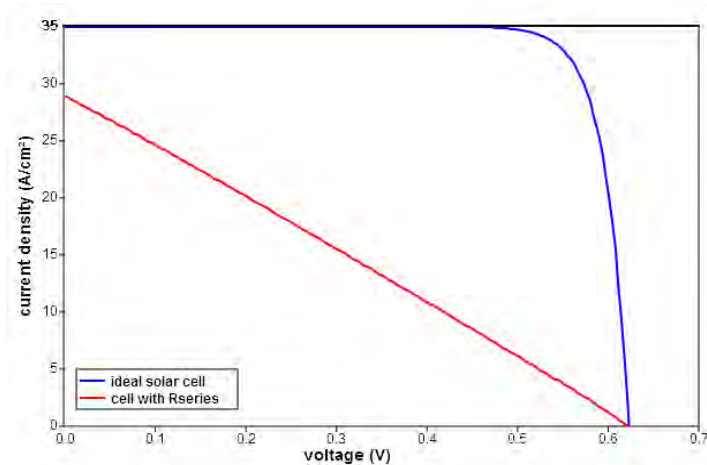
Performansi dari *dye sensitized solar cell* dapat diketahui dengan menggunakan kurva arus-tegangan (I-V) seperti gambar



2.8. Kurva I-V ini didapatkan dengan cara mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan DSSC ketika disinari oleh matahari.

Gambar 2.8 Kurva arus tegangan (I-V)

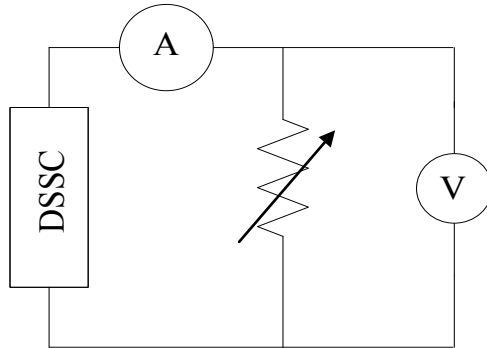
Gambar 2.8 merupakan kurva arus tegangan (I-V) dari sel surya yang ideal, dimana sel surya tersebut memiliki hambatan seri yang kecil ~ 0 . Ketika sel surya memiliki hambatan seri yang besar maka nilai *fill factor* dan arus dari sel surya tersebut akan kecil dan membuat antara arus dan tegangan yang dihasilkan memiliki hubungan yang linier (Gambar 2.9) (*PV education.org*)



Gambar 2.9 Pengaruh hambatan seri terhadap arus-tegangan (*PV education.org*)

Hambatan seri pada *dye sensitized solar cell* (DSSC) dipengaruhi oleh *transparent conductive oxide* (TCO), elektrolit dan elektroda lawan. Ketika nilai hambatan serinya besar maka perpindahan elektron akan lebih lambat dan akan mudah terjadi proses *recombination* pada DSSC (Liu, dkk., 2009).

Berikut adalah rangkaian listrik ekuivalen yang digunakan untuk mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan oleh *dye sensitized solar cell*.



Gambar 2.10 Rangkaian listrik ekuivalen untuk mengukur nilai arus dan tegangan

Parameter yang saling berhubungan dan menunjukkan performasi dari DSSC adalah I_{sc} , V_{oc} , *fill factor* (FF) dan efisiensi (η). I_{sc} dihasilkan ketika *short circuit*, pada kondisi ini hambatan dibuat nol, sehingga arus bernilai maksimum. Sedangkan V_{oc} dihasilkan pada saat *open circuit* karena tidak ada arus yang mengalir sehingga tegangan bernilai maksimum. Parameter selanjutnya adalah *fill factor*. *Fill factor* sendiri didefinisikan sebagai berikut,

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (2.7)$$

Dengan V_{MPP} dan I_{MPP} adalah arus dan tegangan yang jika dikalikan menghasilkan daya maksimum. Jadi tegangan sebanding dengan nilai daya maksimum. Semakin besar nilai daya maksimum dan semakin tajam siku kurva I-V maka nilai *fill factor* akan semakin besar. Setelah mengetahui nilai *fill factor*, maka selanjutnya menghitung daya listrik yang dihasilkan oleh *dye sensitized solar cell* menggunakan persamaan: (Halme, 2002).

$$P_{MAX} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2.8)$$

Efisiensi DSCC dalam mengkonversikan energi cahaya matahari ke energi listrik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan: (Halme, 2002).

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{Cahaya}} \quad (2.9)$$

Efisiensi dari *dye sensitized solar cell* tergantung dengan kualitas peninaran, total intensitas cahaya dan distribusi intensitas spektrum (Halme, 2002).

2.5 Efisiensi Konversi Cahaya Menggunakan IPCE

Incident Photon to Current Conversion Efficiency (IPCE) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur seberapa efektifitas DSSC dalam mengkonversi foton menjadi arus. Nilai IPCE akan 100 % ketika semua foton menghasilkan pasangan elektron-hole. Akan tetapi pada kenyataannya nilai IPCE selalu kurang dari 100 %, hal ini disebabkan karena adanya refleksi foton dan semikonduktor yang tidak dapat menyerap pewarna secara sempurna. Untuk menghitung nilai IPCE dapat menggunakan persamaan berikut (Varghese, dkk., 2008).

$$IPCE [\%] = \frac{1240[eV \cdot nm] \times J_{sc} [\mu A \cdot cm^{-2}]}{\lambda[nm] \times P_{cahaya} [\mu W \cdot cm^{-2}]} \quad (2.10)$$

Dengan:

1240 = Faktor konversi cahaya ke arus (dijelaskan pada lampiran A)

J_{sc} = Kerapatan arus ($\mu A \cdot cm^{-2}$)

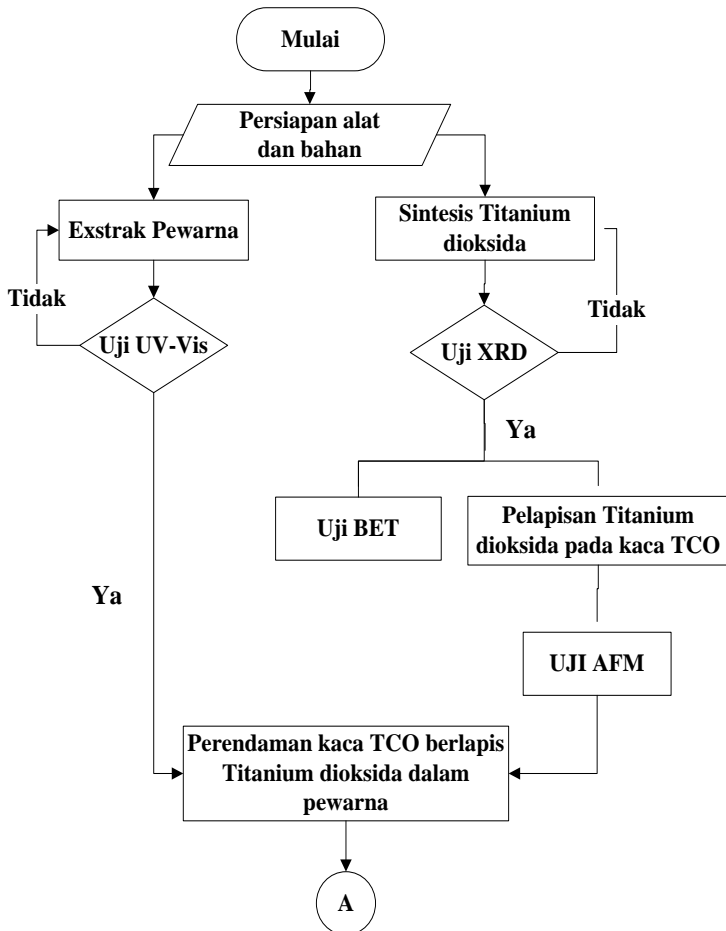
λ = Panjang gelombang yang diubah-ubah pada monokromator (nm),

P_{cahaya} = Daya yang diukur pada setiap panjang gelombang ($\mu W \cdot cm^{-2}$).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahap-tahap pengerjaan tugas akhir ini dirangkum pada diagram alir berikut ini.





Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian

3.2 Persiapan Alat dan Bahan

Pada penelitian ini alat yang digunakan adalah *crucible*, spatula, pipet, gelas ukur, gelas beker, mortar, *furnace*, *hot plate* Yellow MAG HS7, *magnetic stirrer*, dan alat soklet.

Bahan yang dibutuhkan untuk sintesis TiO_2 adalah *Titanium trichloride* (TiCl_3), *hydrochloric acid* (HCl), ammonia (NH_4OH), dan aquades. Bahan yang dibutuhkan untuk ekstrak pewarna adalah ethanol 98 %, bubuk kulit manggis (Gambar 3.2) dan bubuk daun *Rhoeo spatachea*. Sedangkan bahan yang dibutuhkan untuk perakitan DSSC adalah CH_3COOH 98%, Triton X-100, kaca *Transparent Conducting Oxide* (TCO), dan *scotch tape*.



Gambar 3.2 Bubuk kulit manggis

3.3 Ekstraksi Pewarna Kulit Manggis dan *spathacea*

Pada penelitian ini pewarna yang digunakan adalah ekstrak dari manggis dan daun *Rhoeo spathacea*. Hal yang dilakukan adalah kulit manggis dan daun *Rhoeo spathacea* dikeringkan dengan bantuan sinar matahari sampai benar-benar kering, setelah itu kedua pewarna ditumbuk sampai menjadi bubuk (Gambar 3.2).

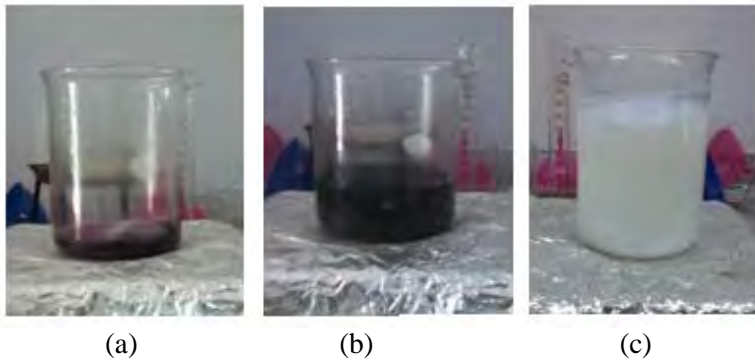


Gambar 3.3 Soklet

Metode yang digunakan dalam mengekstrak pewarna adalah soklet seperti pada gambar 3.3. Bubuk pewarna yang digunakan sebanyak 20 gram sedangkan pelarutnya (ethanol) yang digunakan sebanyak 100 ml. Bubuk pewarna diletakkan di dalam ekstraktor sedangkan ethanolnya diletakkan di *boiling flask*. *Boiling flask* dipanaskan menggunakan magnetik *magnetic stirrer* dengan media air, sehingga membuat ethanol didalam *boiling flask* akan menguap menuju ekstraktor bagian atas, uap ini akan didinginkan oleh kondensor sehingga uap tersebut akan menjadi ethanol cair dan masuk ke dalam ekstraktor yang ada bubuk pewarnanya. Ethanol tersebut akan membawa pigmen dari pewarnanya menuju ke *siphon arm* dan kemudian ke *boiling flask*.

3.4 Sintesis TiO₂ dengan Metode *Co-Precipitation*

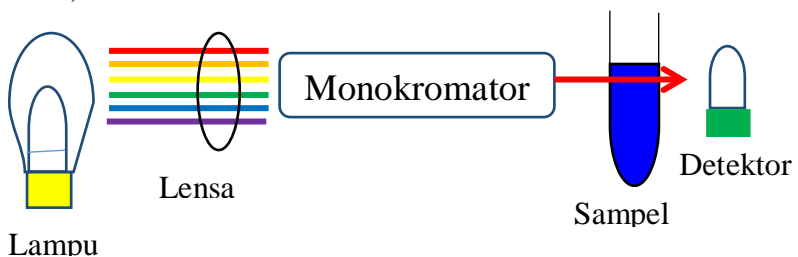
Metode yang digunakan dalam mensintesis nanopartikel TiO₂ adalah *co-precipitation*. Sebanyak 10 ml TiCl₃ diaduk dengan 4,7 ml aquades dan 0,3 ml HCl 37 % menggunakan *magnetic stirrer* selama 2-3 menit pada temperatur 45 °C. Kemudian ditambahkan HCl 37 % sebanyak 20 ml dengan posisi terus diaduk (Gambar 3.4a). Setelah larutan berwarna ungu encer kemudian ditambahkan NH₄OH 25% sebanyak 50 ml dan terus diaduk hingga berwarna ungu hitam (Gambar 3.4b). Larutan terus diberi NH₄OH hingga larutan berwarna putih dan mulai menghasilkan endapan (Gambar 3.4c). Selanjutnya proses dapat dihentikan dan larutan tersebut dibiarkan hingga mengendap. Setelah mengendap, endapan dan larutan NH₄OH dipisahkan, kemudian endapan dicuci dengan aquades sampai larutan NH₄OH benar-benar hilang. Selanjutnya endapan dikalsinasi pada suhu 400°C selama 5 jam untuk mendapatkan fase *anatase* dan 1000°C selama 7 jam untuk mendapatkan fase *rutile* (Agustini, 2013). Setelah TiO₂ dikalsinasi, kemudian dihaluskan menggunakan mortar sampai teksturnya halus.



Gambar 3.4 Proses sintesis TiO_2 (a) Larutan saat ditambah HCl 37% (b) Larutan saat ditambah NH_4OH 25% (c) Larutan mulai menghasilkan endapan

3.5 Pengujian UV-Vis *Spectrophotometer* Pewarna Kulit Manggis dan *Rhoeo spathacea*

Pengujian UV-Vis *spectrophotometer* pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spathacea* bertujuan untuk mengetahui penyerapan energi cahaya dari pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spathacea* sebagai fungsi panjang gelombang (Agustini, 2013).



Gambar 3.5 Prinsip kerja UV-Vis *spectrophotometer*

Komponen dari UV-Vis *spectrophotometer* adalah sumber cahaya, monokromator, kompartemen sampel, detektor dan pengukuran intensitas cahaya (Gambar 3.5). Prinsip kerja UV-

Vis spectrophotometer adalah cahaya tampak atau UV-Vis ditembakkan ke sampel, sebelum ditembakkan cahaya yang digunakan harus monokromatik sehingga diperlukan monokromator. Cahaya monokromatis tersebut akan ditransmisikan dan diserap. Cahaya yang diserap akan menghasilkan signal elektrik pada detektor. Nilai dari adsorpsi berbanding terbalik dengan nilai transmisi (Triyati, 1985). Nilai adsorpsi tergantung dengan jumlah molekul dari larutan, sesuai dengan hukum Lambert Beer.

$$A = \epsilon.a.b \quad (3.1)$$

Dengan:

A = Absorbansi

ϵ = Absorptivitas (1/ M Cm). Absorptivitas merupakan absorbansi larutan 1 M dalam sel cuvet yang lebarnya 1 cm

a = Ketebalan larutan (cm)

b = Konsentrasi Larutan (M)

Hukum Lambert Beer berlaku jika larutan yang akan diuji harus encer/jernih memiliki konsentrasi kurang dari 0,01 M (Rivai, 2013). Hasil dari pembacaan spektrum adsorpsi dari UV-Vis *spectrophotometer* berupa panjang gelombang yang diadsorpsi, satu sampel bisa memiliki beberapa spektrum adsorpsi, tetapi yang digunakan adalah yang paling tinggi.

Pengujian UV-Vis pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Lingkungan LPPM ITS menggunakan alat UV1100 *spectrophotometer* (Gambar 3.6). Pewarna yang diuji UV-Vis *spectrophotometer* terlebih dahulu diencerkan sebanyak 15 kali, karena jika larutan yang diuji tidak jernih/encer maka intensitas cahaya yang diserap akan berkurang (Rivai, 2013). UV-Vis *spectrophotometer* yang digunakan memiliki pembacaan absorbansi – 3 sampai 3 dan pengujianya menggunakan panjang gelombang dari 380 sampai 700 nm.



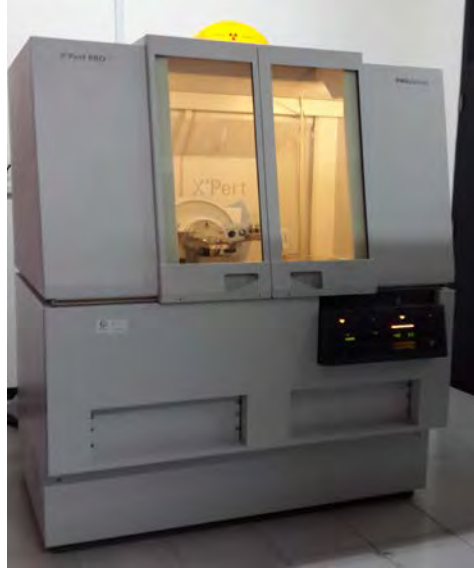
Gambar 3.6 UV1100 *spectrophotometer*

3.6 Pengujian XRD TiO₂

X-Ray Diffractometer adalah alat yang dapat memberikan data-data difraksi dan kuantitas intensitas difraksi pada sudut-sudut difraksi (2θ) dari suatu bahan. Secara umum komponen XRD adalah tabung sinar-X, tempat objek yang diteliti, dan detektor sinar X. Prinsip kerja XRD adalah Sinar X dihasilkan di tabung sinar X yang berisi katoda yang memanaskan filamen, sehingga menghasilkan elektron. Perbedaan tegangan menyebabkan percepatan elektron yang akan menembaki objek. Ketika elektron mempunyai tingkat energi yang tinggi dan menabrak elektron dalam objek, sehingga dihasilkan pancaran sinar X. Objek dan detektor berputar untuk menangkap dan merekam intensitas refleksi sinar X. Detektor merekam dan memproses sinyal sinar X dan mengolahnya dalam bentuk grafik.

Pengujian XRD bertujuan untuk mengetahui ukuran partikel dan persentase fase dari TiO₂ yaitu fase *anatase* dan *rutile*. Grafik karakteristik dari uji XRD berupa besar intensitas terhadap sudut difraksi (2θ). Pengujian XRD ini menggunakan alat Philips X'pert MPD (30 kV, 40 MA) yang terdapat di Laboratorium XRD

LPPM ITS untuk *rutile* TiO₂ dan di Laboratorium XRD Jurusan Teknik Material ITS (Gambar 3.7) untuk *anatase* TiO₂. Sudut yang digunakan pada pengujian XRD ini adalah sudut pendek (sudut 15° sampai 65°).



Gambar 3.7 XRD Philips X'pert MPD

Untuk mengetahui ukuran partikel, dapat menggunakan persamaan Scherrer (Cullity, 1956).

$$D = \frac{0,89\lambda}{\cos(\theta) * FWHM} \quad (3.2)$$

Dengan:

- D = Ukuran kristal suatu bahan (nm)
- λ = Panjang gelombang sinar-X (Cu K λ) yang bernilai 0,154 nm
- FWHM = *Full Width Half Maximum* (dalam radian)
- θ = Sudut difraksinya.

Sedangkan untuk mengetahui fase yang terbentuk dapat menggunakan JCPDS 21-1272 untuk fase *anatase* dan JCPDS 21-1276 untuk fase *rutile*.

3.7 Pengujian BET Serbuk TiO₂

Pengujian BET (*Brunauer Emmet Teller*) digunakan untuk mengetahui luas permukaan, volume pori, dan diameter pori dari serbuk TiO₂ dengan fraksi volume *anatase/rutile* sebesar 90%:10% dan 70%:30%. Pengujian BET pada penelitian ini menggunakan alat NOVA Quantachrome Instrument Version 10.01 yang terdapat di Laboratorium Elektrokimia dan korosi, Jurusan Teknik Kimia ITS (Gambar 3.8). Selain untuk mengetahui luas permukaan, volume pori dan diameter pori, pengujian BET juga untuk mengetahui ukuran partikel, dengan menggunakan persamaan : (Tanaka, dkk., 2000):

$$S = \frac{n}{\rho D_{AV}} \quad (3.3)$$

Dengan:

S = Luas permukaan partikel (m²/g),

n = Partikel faktor (n=6),

ρ = Massa jenis TiO₂ (4,23 g/cm³)

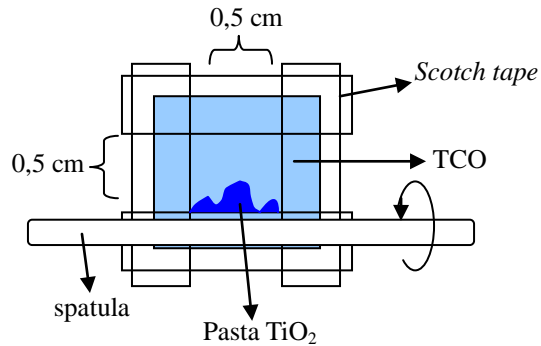
D_{av} = Ukuran partikel rata-rata



Gambar 3.8 NOVA Quantachrome Instrument Version 10.01

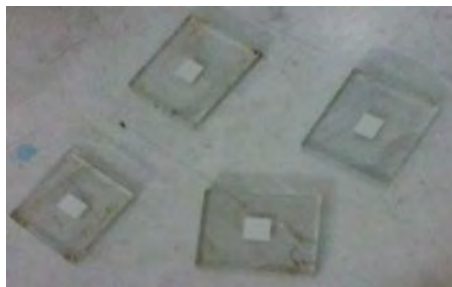
3.8 Pelapisan TiO₂ pada Kaca TCO

Sebelum TiO₂ dilapiskan pada kaca TCO, terlebih dahulu TiO₂ dibuat pasta. Sebanyak 2 gram bubuk TiO₂ dilarutkan dalam 0,7 ml aquades sambil ditumbuk menggunakan mortar. Kemudian ditambahkan 1 ml CH₃COOH 98% dan 0,1 ml Triton X-100 sambil diaduk sampai rata. Untuk kaca TCO dibersihkan dulu menggunakan ethanol 98 % kemudian bagian sisi-sisi kaca TCO diberi *scotch tape* dengan membiarkan bagian tengahnya seluas 0,5 cm x 0,5 cm tetap terlihat.



Gambar 3.9 Pelapisan pasta TiO₂ pada kaca TCO (*Transparent Conducting Oxide*) dengan menggunakan metode *doctor blade*

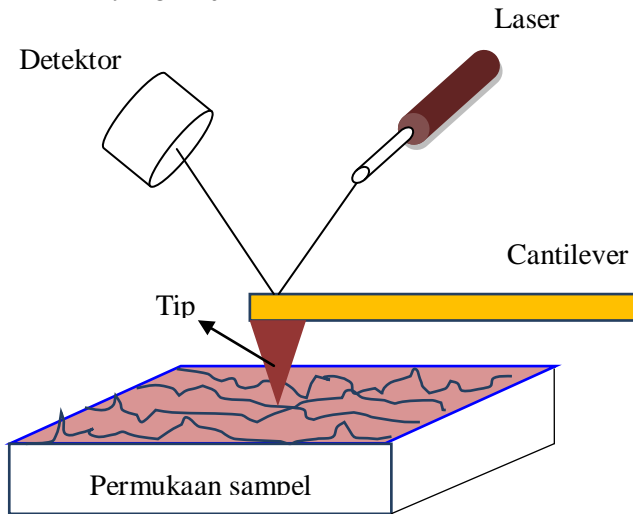
Pelapisan TiO₂ pada kaca TCO menggunakan metode *doctor blade* (Gambar 3.9). Prinsipnya adalah pasta TiO₂ diletakkan diatas kaca TCO, kemudian ditekan menggunakan spatula sambil digulung sampai lapisan TiO₂ rata dipermukaan TCO. Pada pelapisan tersebut, terdapat enam campuran (fraksi volume) fase *anatase* dan *rutile* dengan perbandingan 65%:35%, 70%:30%, 80%:20%, 85%:15%, 90%:10% dan 95%:5%. Setelah tahap pelapisan, kaca TCO yang sudah terlapisi TiO₂ disintering pada temperatur 225°C selama 2 menit dengan menggunakan *hot plate* (Agustini, 2013). Hasilnya seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Hasil pelapisan TiO₂ pada kaca TCO

3.9 Pengujian AFM TiO₂

AFM adalah alat yang digunakan untuk melihat topografi permukaan dari sebuah bahan. AFM terdiri dari detektor, *tip*, *cantilever* dan sinar laser (Gambar 3.11). Prinsip kerjanya adalah *tip* diletakkan di ujung *cantilever*, kemudian *cantilever* beserta *tip*-nya digerakkan di sepanjang permukaan bahan yang ingin diamati. Dengan adanya permukaan yang tidak rata, maka selama mengerakkan *tip* sudut kemiringan *cantilever* akan berubah-ubah. Perubahan sudut tersebut memberikan informasi kedalam permukaan bahan yang diuji.



Gambar 3.11 Prinsip kerja AFM

Sudut yang dibentuk *cantilever* diketahui dengan cara mengarahkan sinar laser pada *cantilever*. Perubahan sudut kemiringan *cantilever* menyebabkan perubahan sinar pantul, kemudian sinar pantul tersebut diterima oleh detektor. Dari sinar pantul inilah diketahui topografi permukaan bahan yang diuji.

Pada penelitian ini pengujian AFM bertujuan untuk mengetahui topografi permukaan dan distribusi fase *anatase/rutile*

TiO₂ dari sampel dengan fraksi volume *anatase/rutile* 70%:30% dan 90%:10%. Alat yang digunakan pada pengujian AFM ini adalah Brüker N8 NEOS yang terdapat di Laboratorium AFM LPPM ITS (Gambar 3.12).



Gambar 3.12 Brüker N8 NEOS

3.10 Perendaman Kaca TCO Berlapis TiO₂ di Larutan Pewarna

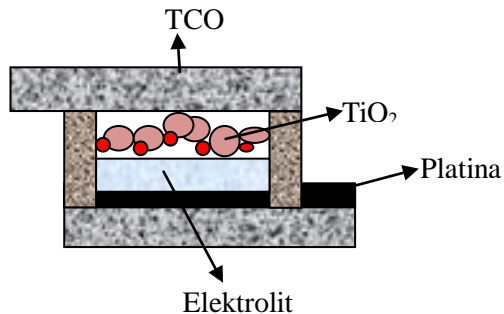
Setelah kaca TCO yang berlapis TiO₂ *disintering*, kemudian kaca TCO berlapis TiO₂ tersebut direndam dalam pewarna kulit manggis dan daun *Rhoeo spatachea* sebanyak 15-20 ml selama 12 jam, hal ini bertujuan agar TiO₂ dapat menyerap pewarna dengan baik, sehingga foton yang diserap oleh DSSC semakin banyak dan efisiensi dari DSSC semakin besar (Wahyuono, 2013; Agustini 2013). Proses perendaman ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Perendaman kaca TCO berlapis TiO_2 pada pewarna (a) Kulit manggis (b) *Rhoeo spatachea*

3.11 Perakitan DSSC

DSSC dirakit dengan struktur *sandwich* seperti gambar 3.14, Kaca TCO yang sudah dilapisi TiO_2 dan pewarna direkatkan dengan TCO yang berlapis katalis dengan menggunakan penjepit, kemudian diantara celah kedua kaca diberi elektrolit iodine (I^-) dan triiodide (I_3^-) sebagai pasangan redoks. Elektrolit yang digunakan adalah elektrolit gel. Elektrolit ini dibuat dengan melarutkan 0,8 gram KI (0,5M) ke dalam 10 ml *asetonitril* kemudian ditambahkan 0,127 gram I_2 (0,05M). Larutan tersebut diaduk bersama dengan gel yang terbuat dari 7 gram PEG (*Polietilene glikol*) dan 25 ml *kloroform* pada temperatur 80°C selama satu jam (Wahyuono, 2013; Agustini 2013). Pada penelitian ini dicoba DSSC dengan menggunakan penambahan katalis karbon pada kaca TCO (elektroda lawan), hasilnya dapat dilihat pada lampiran B.

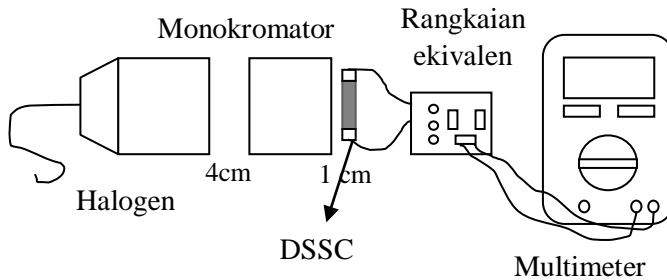


Gambar 3.14 Perakitan DSSC

3.12 Pengujian Performansi DSSC

3.12.1 Pengukuran Efisiensi Konversi Cahaya dengan IPCE

Uji IPCE digunakan untuk mengukur sensitivitas DSSC terhadap panjang gelombang cahaya tampak. Untuk melakukan pengukuran IPCE diperlukan monokromator (CT-10T, JASCO), multimeter dan lampu halogen (GR-150). Jarak antara lampu halogen ke monokromator adalah 4 cm. Sedangkan jarak antara DSSC ke monokromator adalah 1 cm. Daya pada setiap panjang gelombang yang digunakan diukur menggunakan *Optical Power Meter* (Thorlab S-120C). Secara skematis dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 Skema Pengujian IPCE (Agustini, 2013)

3.12.2 Pengukuran Arus dan Tegangan yang Dihasilkan DSSC

Pengukuran arus dan tegangan ini bertujuan untuk mengetahui bentuk kurva I-V untuk setiap fraksi volume 65%:35%, 70%:30%, 80%:20%, 85%:15%, 90%:10% dan 95%:5% dengan pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spathacea*. Dari kurva I-V inilah dapat diketahui nilai *fill factor* (FF), sehingga dapat diketahui juga nilai efisiensi dari DSSC. Pada pengukuran ini nilai yang diubah adalah hambatannya, ketika hambatan yang diberikan maksimum maka nilai arusnya mendekati 0 dan tegangannya bernilai besar/maksimal, sedangkan hambatan yang diberikan nilainya minimum maka arusnya menjadi maksimal/besar dan tegangannya mendekati 0. Gambar 3.16 merupakan proses pengukuran arus dan tegangan dari DSSC.



Gambar 3.16 Pengukuran arus dan tegangan dari DSSC

3.13 Skema Penelitian

Skema/rancangan penelitian dapat dilihat pada tabel 3.1.

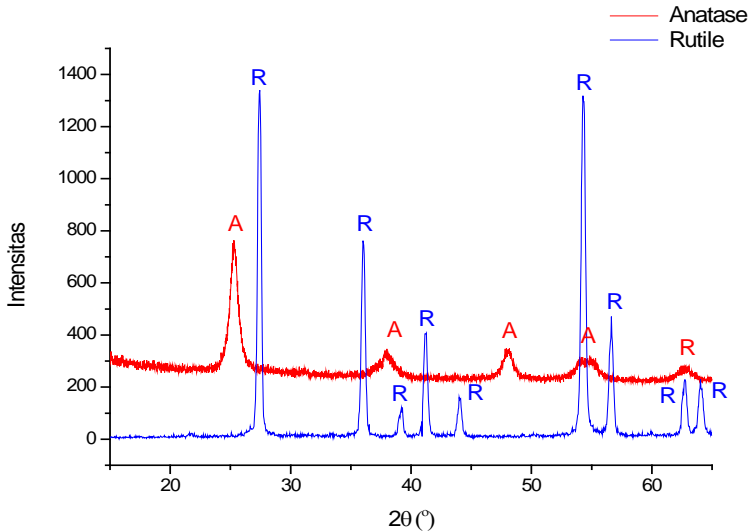
Tabel 3.1 Rancangan penelitian

Pewarna	Fraksi Volume (A:R)	FF (%)	J_{sc}	V_{oc}	η
			(mA/cm^2)	(mV)	(%)
Kulit manggis	75% : 25% (Agustini, 2013)				
	95%:5%				
	90%:10%				
	85%:15%				
	80%:20%				
	70%:30%				
	65%:35%				
<i>Rhoeo spathacea</i>	75% : 25% (Agustini, 2013)				
	95%:5%				
	90%:10%				
	85%:15%				
	80%:20%				
	70%:30%				
	65%:35%				

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian XRD Serbuk TiO₂

Pengujian XRD serbuk TiO₂ bertujuan untuk mengetahui fase TiO₂ yang terbentuk yaitu fase *anatase* dan fase *rutile* serta mengetahui ukuran partikel dari masing-masing fase. Gambar 4.1 merupakan hasil pengujian XRD TiO₂ fase *anatase* dan fase *rutile*. Penggolongan fase *anatase* dan *rutile* berdasarkan puncak-puncak yang terbentuk pada nilai 2θ dan kemudian nilai 2θ yang ada dicocokkan dengan JCPDS 21-1272 untuk fase *anatase* dan JCPDS 21-1276 untuk fase *rutile*.



Gambar 4.1 Hasil XRD TiO₂ fase *anatase* dan *rutile*

TiO₂ fase *anatase* ditunjukkan dengan grafik yang berwarna merah sedangkan fase *rutile* yang ditunjukkan pada grafik yang berwarna biru. Indeks A pada grafik menunjukkan bahwa pada sudut 2θ tersebut terbentuk fase *anatase* dan indeks R menunjukkan fase yang terbentuk adalah *rutile*.

Berdasarkan hasil XRD TiO_2 yang dikalsinasi pada suhu 1000°C selama 7 jam, TiO_2 yang terbentuk tidak sepenuhnya berubah menjadi *rutile*. Terdapat fase lain yaitu fase Ti_3O_5 pada sudut $49,29^\circ$ dan fase *anatase* pada sudut $62,54^\circ$. Fase tersebut tidak kelihatan pada grafik karena fase tersebut memiliki intensitas yang sangat kecil yaitu 5,64 dan 131,01. Sedangkan Puncak-puncak yang menunjukkan fase *rutile* ada 9 puncak yaitu pada sudut $27,47^\circ$, $36,07^\circ$, $39,25^\circ$, $41,23^\circ$, $44,09^\circ$, $54,34^\circ$, $56,66^\circ$, $62,77^\circ$ dan sudut $64,07^\circ$. Sudut yang memiliki intensitas tertinggi sebesar 1327,17 adalah sudut $27,47$, dimana sudut ini merupakan fase *rutile* yang memiliki orientasi (110). Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan *Scherrer* ukuran partikel *rutile* (110) yang terbentuk sebesar 44,9 nm (Tabel 4.1).

TiO_2 yang dikalsinasi pada suhu 400°C selama 5 jam tidak sepenuhnya menghasilkan fase *anatase*. Pada grafik berwarna merah terdapat 6 puncak yang terlihat. Lima puncak menunjukkan fase *anatase* yaitu puncak pada sudut $25,34^\circ$, $37,82^\circ$, $48,2^\circ$, $53,98^\circ$ dan $55,2^\circ$. Sedangkan satu puncak lagi menunjukkan fase *rutile* pada sudut $62,78^\circ$ dengan intensitas sebesar 76,29. Terdapat satu lagi fase yang terbentuk yaitu fase Ti_3O_5 pada sudut $31,45^\circ$ yang tidak terlihat pada grafik karena memiliki intensitas sebesar 6,52. Ukuran partikel *anatase* (101) yang terbentuk sebesar 30 nm (Tabel 4.1), lebih kecil dibandingkan dengan ukuran partikel *rutile*.

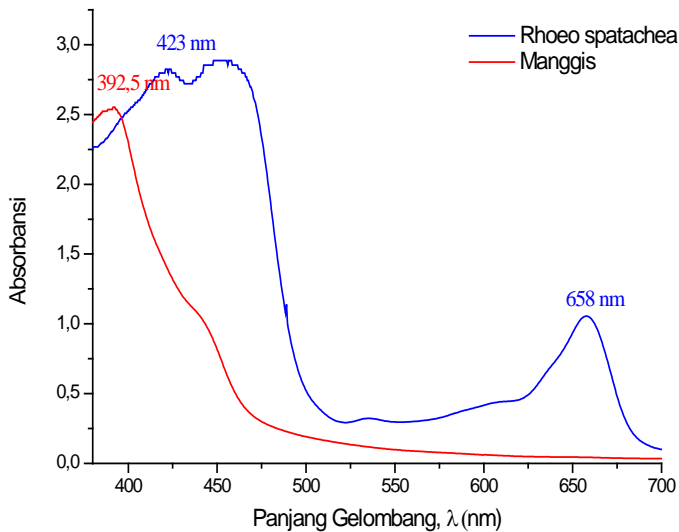
Tabel 4.1 Komposisi TiO_2 dan ukuran partikel

Fase	400 °C (5 jam)		1000 °C (7 jam)	
	Anatase	Rutile	Anatase	Rutile
Ukuran Partikel (nm)	30		44,9	
Komposisi (%)	97,01	2,99	0,19	99,81

4.2 Pengujian Uv-Vis Pewarna Kulit Manggis dan *Rhoeo Spatachea*

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian UV-Vis spektroskopi dari pewarna alami kulit manggis dan *Rhoeo*

spatachea. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pewarna kulit manggis memiliki absorbansi pada panjang gelombang 392,5 nm sedangkan *Rhoeo spatachea* memiliki 2 absorbansi yaitu pada panjang gelombang 423 nm dan 658 nm. Perbedaan puncak absorbansi ini dikarenakan kulit manggis dan *Rhoeo spatachea* mengandung antosianin yang tipenya berbeda. Pewarna kulit manggis mengandung antosianin tipe sianidin, dimana tipe antosianin ini memiliki rentang absorbansi pada panjang gelombang 400-500 nm (Chang, dkk., 2010 dan Yamazaki, dkk., 2007). Sedangkan rentang absorbansi dari pewarna *Rhoeo spatachea* berada pada panjang gelombang 410-420 nm dan 660-670 (Lai, dkk., 2008)



Gambar 4.2 Hasil pengujian UV-Vis pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea*

Pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea* merupakan pewarna yang sesuai untuk DSSC yang menggunakan semikonduktor TiO_2 . Hal ini dikarenakan pewarna kulit manggis

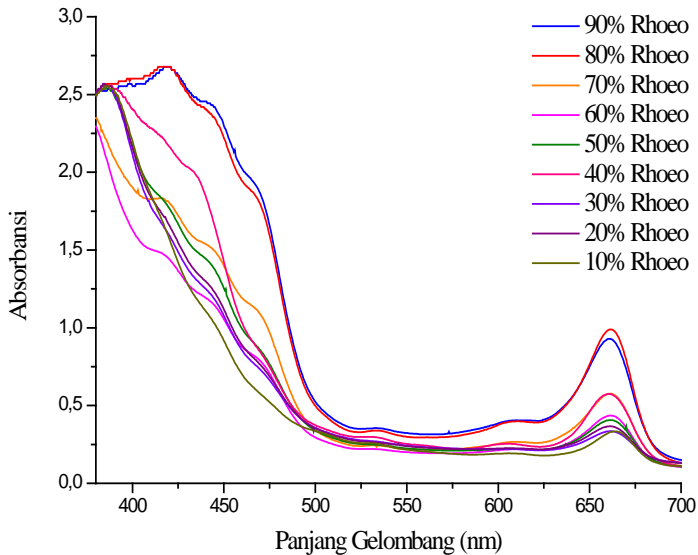
dan *Rhoeo spatachea* mengandung antosianin (Agustini, 2013). Didalam antosianin terdapat dua gugus yaitu karboksil dan hidroksil, kedua gugus ini sangat mudah berikatan dengan permukaan TiO_2 , sehingga membuat perpindahan elektron dari molekul pewarna ke pita konduksi TiO_2 sangat mudah dan membuat efisiensi yang dihasilkan tinggi (Hao, dkk., 2006).

Tabel 4.2 Pita celah cahaya tampak (Physics.about.com dan Callister, 2009)

Warna	Panjang Gelombang (nm)	Pita celah (eV)
Merah	625 - 740	1,98 - 1,67
<i>Orange</i>	590 - 625	2,1 - 1,98
Kuning	565 - 590	2,19 - 2,1
Hijau	520 - 565	2,38 - 2,19
<i>Cyan</i>	500 - 520	2,48 - 2,38
Biru	435 - 500	2,84 - 2,48
Ungu	380 - 435	3,26 - 2,84

Semikonduktor yang memiliki pita celah $< 1,67$ eV dapat menyerap semua cahaya tampak dan ketika pita celahnya $> 3,26$ eV, semikonduktor tidak dapat menyerap semua cahaya tampak. Sedangkan ketika semikonduktor memiliki pita celah diantara $1,67$ eV – $3,26$ eV, semikonduktor hanya dapat menyerap sebagian cahaya tampak (Tabel 4.2) (Callister dan Rethwisch, 2009). Semikonduktor TiO_2 fase *anatase* dan *rutile* memiliki pita celah $3,2$ eV dan 3 eV (Narayan, 2011) yang setara dengan panjang gelombang 387 nm dan 413 nm. Hal ini membuat pewarna yang sesuai dengan pita celah fase *anatase* dan *rutile* adalah pewarna yang memiliki absorbansi dengan panjang gelombang ~ 387 sampai ~ 413 , karena pada panjang gelombang tersebut dapat menghasilkan energi yang cukup untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea* merupakan pewarna yang

sesuai untuk semikonduktor TiO_2 , karena pewarna kulit manggis memiliki absorbansi 392,5 nm dan *Rhoeo spatachea* memiliki absorbansi sebesar 423 nm dan 658 nm.



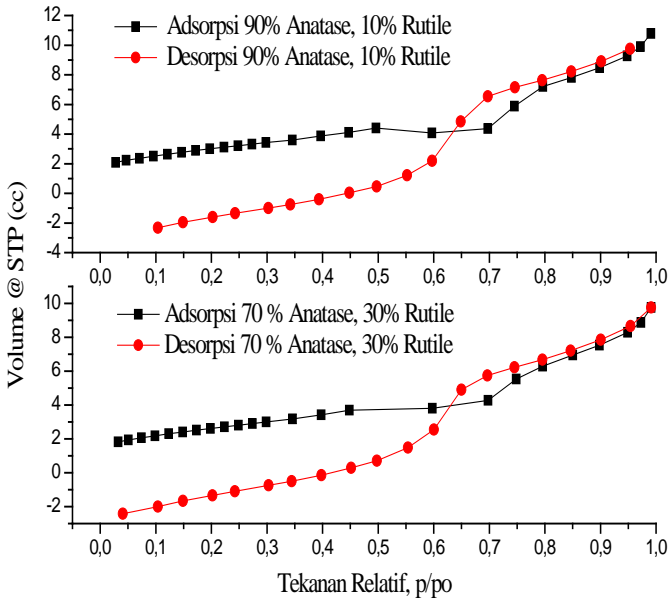
Gambar 4.3 Hasil UV-Vis pewarna campuran antara kulit manggis dan *Rhoeo spatachea*

Pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea* masing-masing memiliki absorbansi pada panjang gelombang yang berbeda, sehingga ketika kedua pewarna tersebut dicampur, maka absorbansi yang dihasilkan merupakan gabungan antara absorbansi kulit manggis dan *Rhoeo spatachea*. Gambar 4.3 menunjukkan hasil UV-Vis spektroskopi campuran antara pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea*. Berdasarkan gambar 4.3 campuran yang paling baik adalah saat kandungan pewarna *Rhoeo spatachea* sebesar 80% - 90%. Pada komposisi tersebut kemungkinan efisiensi DSSC dapat ditingkatkan, hal ini dikarenakan campuran tersebut memiliki absorbansi pada panjang

gelombang yang lebih lebar dan nilai absorbansi lebih besar dibandingkan dengan campuran yang lain.

4.3 Hasil Pengujian BET Serbuk TiO₂

Pengujian BET serbuk TiO₂ bertujuan untuk mengetahui distribusi pori dan luas permukaan serbuk TiO₂ yang digunakan. Semakin luas permukaan TiO₂ yang digunakan maka pewarna yang terserap oleh semikonduktor TiO₂ semakin banyak. Hal ini membuat foton yang diserap oleh pewarna meningkat dan membuat peformansi DSSC juga meningkat.



Gambar 4.4 Kurva adsorpsi-desorpsi serbuk TiO₂ dengan kandungan TiO₂ anatase 90% dan 70%.

Gambar 4.4 merupakan kurva adsorpsi-desorpsi dari serbuk TiO₂ dengan fraksi anatase/rutile sebesar 90%:10% dan 70%:30%. Dari kedua kurva tersebut, serbuk TiO₂ dengan fraksi

90%:10% memiliki adsorpsi yang lebih tinggi, hal ini menunjukkan bahwa serbuk TiO₂ dengan fraksi volume 90%:10% memiliki permukaan yang lebih luas dibandingkan dengan TiO₂ yang memiliki fraksi volume 70%:30%.

Dari hasil pengujian BET didapatkan luas permukaan, volume pori, diameter pori serta ukuran partikel yang menggunakan persamaan (3.3). Tabel 4.3 menunjukkan sifat fisis dari TiO₂ dengan fraksi *anatase* dan *rutile* sebesar 100%:0% sampai 0%:100%. Dari tabel 4.3 fraksi volume TiO₂ yang memiliki ukuran partikel yang paling kecil (9,11) adalah TiO₂ dengan fraksi volume 90%:10%. Semikonduktor TiO₂ dengan semua fraksi memiliki struktur mesopori hal ini dikarena ukuran partikel dari semua fraksi berada dalam rentang 2 nm-50 nm (IUPAC, 1985).

Tabel 4.3 Sifat fisis fraksi volume TiO₂ (* Wahyuono,2013
**Agustini, 2013)

Fraksi Volume (A:R)	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (cc/g)	Diameter Pori (nm)	Ukuran Partikel BET (nm)
100%:0% *	113,020	0,28	3,38	12,55
90%:10%	155,654	0,27	5,59	9,11
75%:25% **	70,690	0,19	9,74	20,05
70%:30%	126,573	0,22	5,62	11,2
50%:50% **	36,330	0,12	9,51	39,02
25%:75% **	35,380	0,11	3,84	40,09
0%:100% *	93,940	0,14	3,04	15,09

Dari data luas permukaan dan volume pori dari fraksi volume 100%:0% sampai 0%:100% pada tabel 4.3 dapat diketahui nilai porositas dan *roughness factor* dari masing-masing fraksi. Dari hasil perhitungan fraksi yang memiliki porositas paling tinggi adalah 100%:0%. Pada tabel 4.4 terlihat bahwa semakin banyak kandungan fase *anatase* maka nilai porositasnya semakin tinggi. Serbuk TiO₂ yang paling baik digunakan sebagai

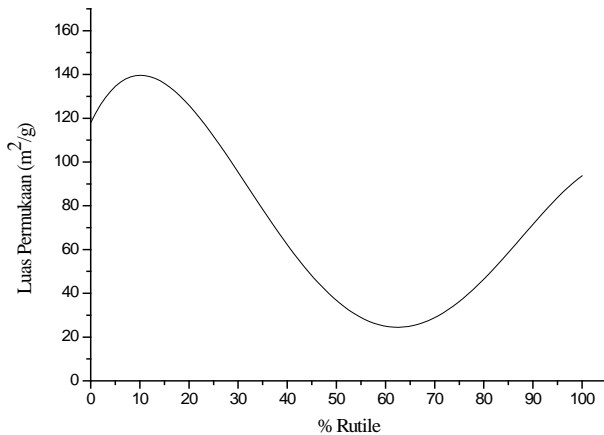
dye sensitized solar cell (DSSC) adalah TiO_2 yang memiliki porositas 0,41, karena ketika nilai porositasnya 0,41 menghasilkan kerapatan arus yang paling besar diantara yang lain. Secara keseluruhan semakin tinggi nilai porositas maka kerapatan arus yang dihasilkan semakin tinggi (Ni, dkk., 2005)

Roughness factor yang paling besar dihasilkan oleh fraksi 90%:10% (310 per μm). Hal ini dikarenakan fraksi tersebut memiliki luas permukaan yang paling besar dan porositas yang tidak terlalu besar. Nilai *roughness factor* yang ideal untuk digunakan sebagai *dye sensitized solar cell* adalah ~ 1000 (Law, dkk., 2005).

Tabel 4.4 Porositas dan *roughness factor* dari masing-masing fraksi (* Wahyuono, 2013 **Agustini,2013)

Fraksi Volume (Anatase: Rutile)	Porositas (%)	<i>Roughness factor</i> per μm
100%:0%*	54	219
90%:10%	53	310
75%:25%**	45	163
70%:30%	48	280
50%:50%**	34	102
25%:75%**	32	101
0%:100%*	37	250

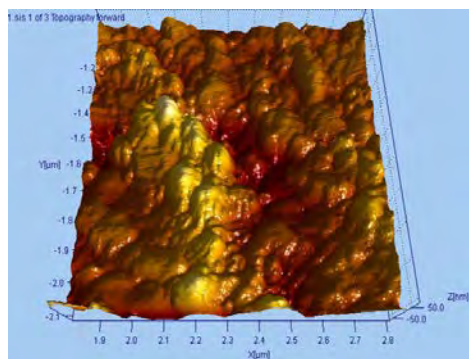
Gambar 4.5 merupakan grafik luas permukaan semikonduktor TiO_2 dengan fraksi *anatase/rutile* sebesar 100%:0% sampai 0%:100%. Dari gambar 4.5 terlihat bahwa fraksi yang memiliki luas permukaan paling besar adalah fraksi *anatase/rutile* sebesar 90%:10%.



Gambar 4.5 Luas Permukaan TiO_2 dari fraksi *anatase/rutile* sebesar 100%:0% sampai 0%:100%

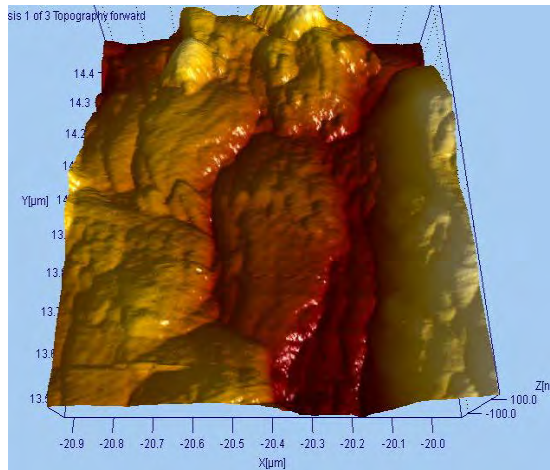
4.4 Hasil Pengujian AFM Lapisan TiO_2

Pengujian AFM bertujuan untuk mengetahui topografi permukaan TiO_2 yang dilapiskan pada kaca TCO. Gambar 4.6-4.7 merupakan topografi permukaan TiO_2 dengan fraksi *anatase/rutile* sebesar 90%:10% dan 70%:30%. Dengan mengetahui topografi ini dapat diketahui bagaimana penyebaran fase *anatase* dan *rutile* pada permukaan kaca TCO.



Gambar 4.6 Topografi permukaan TiO_2 dengan fraksi 90%:10%

Gambar 4.6 merupakan topografi permukaan TiO_2 pada kaca TCO dengan fraksi *anatase/rutile* sebesar 90%:10%. Pada gambar tersebut terdapat sedikit butiran kasar yang merupakan fase *rutile* dan butiran halus yang merupakan fase *anatase* dalam jumlah yang banyak. Sedangkan gambar 4.7 merupakan topografi permukaan TiO_2 pada kaca TCO dengan fraksi volume 70%:30%. Dari gambar tersebut terlihat bahwa terjadi aglomerasi antara fase *anatase* dan *rutile*, sehingga sulit untuk membedakan antara fase *anatase* dan *rutile*. Hal ini terjadi karena campuran *anatase* dengan ukuran partikel 30 nm dan *rutile* 44,9 nm dibuat pasta sehingga mempermudah terjadinya aglomerasi.



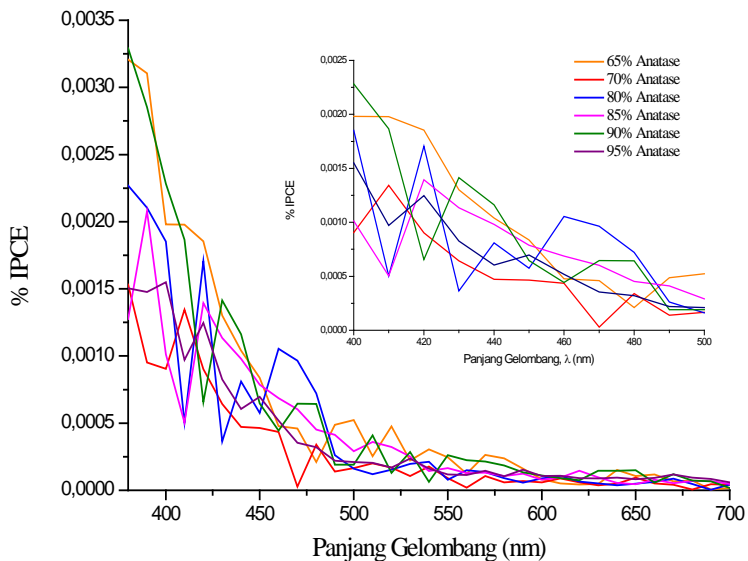
Gambar 4.7 Topografi permukaan TiO_2 dengan fraksi 70%:30%

4.5 Spektrum IPCE DSSC

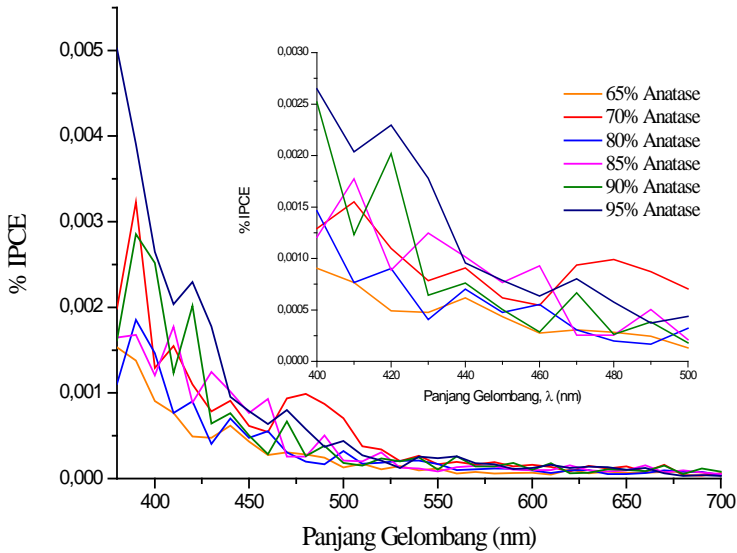
Gambar 4.8 dan gambar 4.9 merupakan hasil pengujian IPCE *dye sensitized solar cell* dengan pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea*. Nilai IPCE menunjukkan proses transfer elektron dari pewarna ke semikonduktor dan dari I^- yang teroksidasi ke pewarna (Hara,dkk., 2000), semakin besar nilai IPCE menunjukkan bahwa tranfer elektron berlangsung secara efektif dan ketika nilai IPCE mencapai 100%, semua foton yang

diserap oleh pewarna akan diubah menjadi arus (Varghese, dkk., 2008).

Dari gambar 4.8 dan 4.9, puncak panjang gelombang IPCE dan absorbansi panjang gelombang pewarna kulit manggis serta *Rhoeo spatachea* (Gambar 4.2) tidak sama (mengalami pergeseran). Hal ini dikarenakan ketika molekul pewarna diserap oleh permukaan TiO_2 , maka absorbansi pewarna yang mengandung antosianin (tipe sianidin) tersebut akan bergeser ke panjang gelombang yang menghasilkan warna biru (Hao, dkk., 2006). Nilai IPCE tertinggi dari DSSC dengan pewarna kulit manggis adalah 0,00207 % sedangkan untuk pewarna *Rhoeo spatachea* sebesar 0,00323%.



Gambar 4.8 Spektrum IPCE pewarna kulit manggis

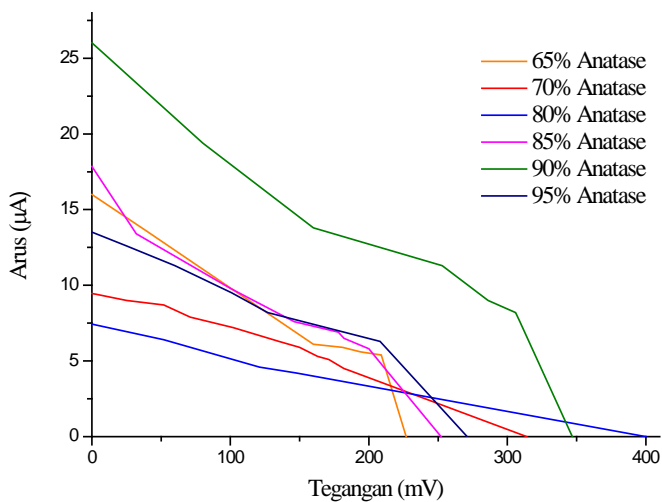


Gambar 4.9 Spektrum IPCE pewarna *Rhoeo spatachea*

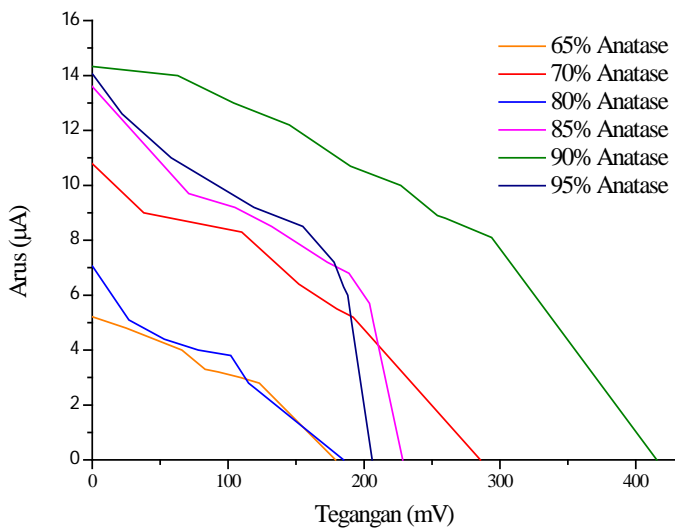
4.6 Performansi DSSC

Gambar 4.10 dan gambar 4.11 merupakan grafik I-V yang merupakan hasil pengukuran arus dan tegangan dari DSSC dengan pewarna *Rhoeo spatachea* dan kulit manggis. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengetahui performansi dari DSSC.

Dari gambar 4.10 dan gambar 4.11 fraksi volume 90%:10% memiliki arus yang paling besar yaitu 26,02 μA untuk pewarna kulit manggis dan 14,33 μA untuk pewarna *Rhoeo spatachea*. Hal ini menunjukkan bahwa banyak pewarna yang diserap oleh semikonduktor, sehingga jumlah foton yang ditangkap oleh pewarna pun banyak dan performansi dari DSSC pun meningkat.



Gambar 4.10 Kurva I-V DSSC dengan pewarna kulit manggis



Gambar 4.11 Kurva I-V DSSC dengan pewarna *Rhoeo spatachea*

Dari gambar 4.10 dan 4.11, *Dye sensitized solar cell* (DSSC) dengan pewarna kulit manggis dan *Rhoeo spatachea* tidak menghasilkan kurva I-V yang ideal. Hal ini dikarenakan adanya hambatan seri yang besar. Hambatan seri pada DSSC dipengaruhi oleh hambatan kaca TCO, elektrolit dan elektroda lawan. Hambatan kaca TCO dan *interface* antara elektrolit/katalis-TCO mempengaruhi perpindahan elektron pada kondisi *short circuit* dan mempermudah terjadinya proses *recombination*. Ketika nilai hambatan serinya besar maka proses perpindahan elektron akan menjadi lebih lama, hal ini akan membuat nilai *fill factor* menjadi lebih kecil (Liu, dkk., 2009)

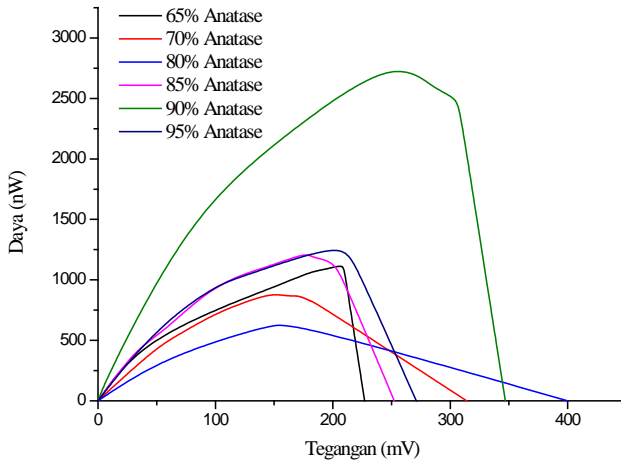
Efisiensi dari DSSC tergantung oleh *fill factor* (FF), arus (I_{sc}) dan tegangan (V_{oc}). Perubahan nilai *fill factor*, I_{sc} dan V_{oc} dari DSSC dengan semua fraksi dapat dilihat pada tabel 4.5. Dari semua DSSC dengan variasi fraksi yang dibuat, fraksi 90%:10% memiliki nilai *fill factor* dan kerapatan arus yang paling tinggi daripada fraksi yang lainnya baik dengan pewarna kulit manggis (FF = 36, J_{sc} = 0,104 mA/cm²) maupun *Rhoeo spatachea* (FF = 40, J_{sc} = 0,057 mA/cm²). Hal ini membuat DSSC dengan fraksi 90%:10% memiliki efisiensi paling tinggi yaitu sebesar 0,076% untuk pewarna kulit manggis dan 0,063% untuk pewarna *Rhoeo spatachea*.

Dari tabel 4.5 terlihat bahwa kerapatan arus yang sangat mempengaruhi efisiensi DSSC dari pada *fill factor* dan tegangan. Semakin besar nilai kerapatan arus maka semakin besar pula efisiensi yang dihasilkan. Sedangkan nilai *fill factor* dan tegangan yang dihasilkan oleh DSSC dari semua fraksi, nilainya acak. Tegangan yang paling tinggi dihasilkan oleh DSSC dengan fraksi 80%:20% untuk kulit manggis dan 90%:10% untuk *Rhoeo spatachea*.

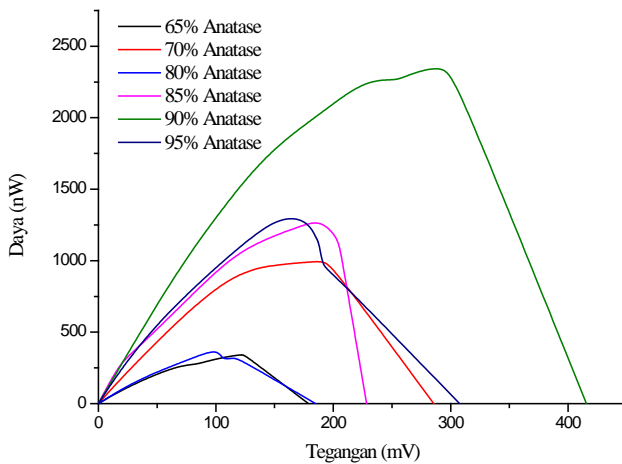
Tabel 4.5 Hasil pengukuran J_{sc} , V_{oc} , $fill\ factor$ dan efisiensi (* Agustini 2013)

Pewarna	Fraksi Volume (A:R)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	η (%)
Kulit Manggis	75%:25%*	19	0,08	358	0,037
	95%:5%	36	0,054	271	0,035
	90%:10%	32	0,104	347	0,076
	85%:15%	32	0,06	252	0,033
	80%:20%	22	0,03	400	0,017
	70%:30%	30	0,038	314	0,024
	65%:35%	31	0,064	227	0,03
<i>Rhoeo spatachea</i>	75%:25%*	39	0,019	294	0,013
	95%:5%	30	0,056	206	0,035
	90%:10%	40	0,057	415	0,063
	85%:15%	33	0,054	228	0,035
	80%:20%	30	0,028	185	0,01
	70%:30%	32	0,043	286	0,027
	65%:35%	37	0,021	179	0,009

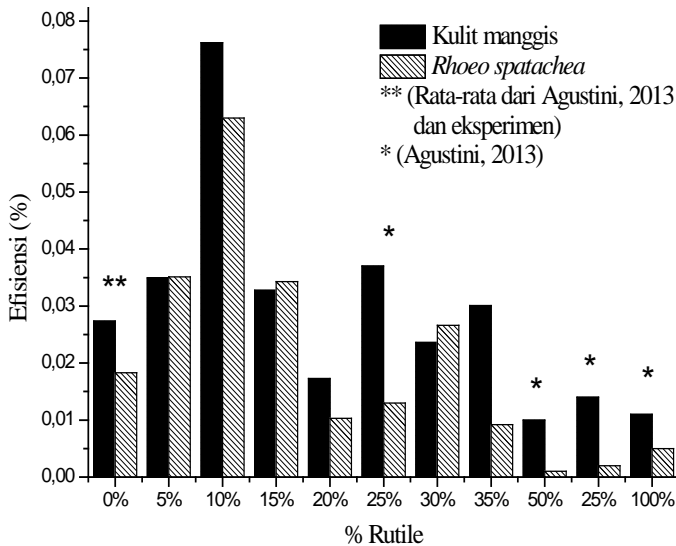
Gambar 4.12 - 4.13 merupakan kurva P-V dari DSSC yang menggunakan pewarna kulit manggis dan pewarna *Rhoeo spatachea*. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa fraksi volume 90%:10% menghasilkan daya yang paling besar dibandingkan dengan fraksi yang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi volume 90%:10% memiliki efisiensi dan $fill\ factor$ yang besar. Pada kedua kurva tersebut terlihat bahwa DSSC dengan fraksi 90%:10% memiliki nilai $fill\ factor$ paling besar pada saat nilai tegangan 253 mV untuk pewarna kulit manggis dan 294 mV untuk pewarna *Rhoeo spatachea*.



Gambar 4.12 Kurva P-V DSSC dengan pewarna kulit manggis



Gambar 4.13 Kurva P-V DSSC dengan pewarna *Rhoeco spatachea*



Gambar 4.14 Efisiensi DSSC dengan fraksi volume 100%:0% sampai 0%:100%

Gambar 4.14 merupakan hasil efisiensi DSSC dengan fraksi volume 100%:0% sampai 0%:100%. Pada gambar tersebut terlihat bahwa DSSC dengan menggunakan 100% *anatase* dan 100% *rutile* menghasilkan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan DSSC yang menggunakan campuran fase *anatase* dan *rutile*. Dari semua fraksi volume yang dibuat, fraksi volume 90%:10% memiliki efisiensi tertinggi, hal ini dikarenakan fraksi volume 90%:10% memiliki luas permukaan yang paling besar dan ukuran partikel rata-rata yang paling kecil (Gambar 4.5 dan Tabel 4.3). Ketika semikonduktor memiliki luas permukaan yang besar maka semikonduktor tersebut dapat menyerap warna lebih banyak dan menyebabkan efisiensi dari DSSC tersebut meningkat. Pola grafik efisiensi pada gambar 4.14 mirip dengan pola luas permukaan semikonduktor pada gambar 4.5. Berdasarkan gambar 4.14 presentase *rutile* yang baik berada pada ~10%. Hal ini sesuai dengan penelitian lain yang menyatakan

bahwa presentase *rutile* yang digunakan untuk DSSC paling baik antara 10%-15%, karena perpindahan elektron dari pita konduksi *rutile* (pengumpul elektron) menuju pita konduksi *anatase* akan lebih mudah dan menyebabkan mobilitas elektron meningkat (Li, dkk., 2009). Hal ini juga sesuai dengan penelitian DSSC yang menggunakan serbuk TiO_2 Degussa P25 dengan kandungan *rutile* sebesar $\sim 10\%$ (Wahyuono, 2013). DSSC ini menghasilkan efisiensi yang lebih besar dibandingkan DSSC yang menggunakan serbuk TiO_2 dengan kandungan *rutile* kurang dari dan lebih dari 10%. Efisiensi DSSC dengan Degussa P25 mencapai 3,64% (Li, dkk., 2009).

Tabel 4.6 merupakan hasil pengukuran J_{sc} , V_{oc} dan efisiensi dari fraksi volume 90%:10% dengan menggunakan pewarna kulit manggis, *Rhoeo spatachea* dan campuran kulit manggis/*Rhoeo spatachea* dengan fraksi 20%:80%. Dari tabel 4.6 terlihat bahwa kerapatan arus ($J_{sc}=0,122 \text{ mA/cm}^2$) dan efisiensi ($\eta=0,088\%$) yang paling besar dihasilkan oleh DSSC yang menggunakan pewarna campuran kulit manggis/*Rhoeo spatachea*. Hal ini karena campuran kulit manggis memiliki serapan panjang gelombang yang lebar dan nilai absorbansi yang lebih tinggi dari pada pewarna kulit manggis saja maupun pewarna *Rhoeo spatachea* saja (Gambar 4.2-4.3)

Tabel 4.6 Perbandingan hasil pengukuran J_{sc} , V_{oc} dan efisiensi dari DSSC dengan menggunakan campuran pewarna dan satu pewarna

Pewarna	Kulit manggis	Campuran kulit manggis dan <i>Rhoeo spatachea</i>	<i>Rhoeo spatachea</i>
FF	32	26	40
J_{sc} (mA/cm ²)	0,104	0,122	0,057
V_{oc} (mV)	347	413	415
η %	0,076	0,088	0,063

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa data yang sudah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Fraksi volume *anatase/rutile* yang paling baik digunakan sebagai *dye sensitized solar cell* (DSSC) adalah 90%:10% dengan efisiensi sebesar 0,076% untuk pewarna kulit manggis dan 0,063% untuk pewarna *Rhoeo spatachea*.
- DSSC dengan menggunakan pewarna campuran kulit manggis dan *Rhoeo spatachea* (20%:80%) menghasilkan efisiensi yang lebih baik yaitu sebesar 0,088% dibandingkan hanya menggunakan pewarna kulit manggis atau *Rhoeo spatachea* saja.
- Penambahan rutile yang optimal untuk digunakan sebagai DSSC adalah ~10%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Agustini, S., 2013. “ Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell Berdasarkan Fraksi Volume TiO₂ Anatase-Rutile Dengan Garcinia mangostana Dan Rhoeco spatatchea sebagai Dye Fotoz sensitizer”. **Tugas Akhir, ITS**
- Avci, N., Smet, P.H., Poelman, H., Velde, N.V.D., Buysser, K. D., Driessche, I.V., Poelman, D., 2009. “Characterization of TiO₂ Powders And Thin Films Prepared By Non-Aqueous Sol–Gel techniques”. **J Sol-Gel Sci Technol** DOI :10.1007/s10971-009-2028-9
- Benkstein, K.D., Kopodakis, N., Lagemaat, J.V.D., Frank, A.J., 2003. “Influence of the Percolation Network Geometry on Electron Transport in Dye-Sensitized Titanium Dioxide Solar Cells “. **J. Phys. Chem. B, Vol. 107, No. 31,** hal 7759-7767
- Byranvand, M.M., Kharat, A.N., Fatholahi, L., Beiranvand, Z.M., 2013. “A Review on Synthesis of Nano-TiO₂ Via Different Methods”. **JNS** Vol 3, hal 1-9
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2009.”**Materials Science and Engineering an Introduction**” Universitas Utah dan Universitas Iowa
- Castro, A.L., Nunes, M.R., Carvalho, A.P., Costa, F.M., Florencio, M. H., 2008. “Synthesis of Anatase TiO₂ Nanoparticles With High Temperature Stability And Photocatalytic Activity”. **Solid State Sciences** vol. 10, hal. 602 – 606
- Chang, H. dan Lo, Y.J., 2010. “Pomegranate Leaves And Mulberry Fruit as Natural Sensitizers for Dye-Sensitized Solar Cells. **Journal of Solar Energy** vol. 84, hal. 1833 – 1847
- Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., dan Han, L.Y., 2006. “Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%”. **Jpn. J. Appl. Phys.** 45, L638–L640

- Cullity, B.D., 1956. "Elements Of X-Ray Diffraction". **Indiana**, University of Notre Dame
- Dewan, M.A.R., Zhang, G., Ostrovski, O., 2010. "Phase Development in Carbothermal Reduction of Ilmenite Concentrates and Synthetic Rutile". **ISIJ International**, Vol. 50, No. 5, hal. 647–653
- Diebold, U., 2003." The Surface Science of Titanium Dioxide". **Surface Science Reports**, vol 48, hal 53-229
- Direktorat Jenderal Pengolahan Dan Pemasaran Hasil Pertanian, (2006). Road Map Pengembangan Agroindustri Manggis
- Grätzel, M., 2003." Dye-sensitized solar cells". **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, vol 4, hal 145–153
- Halme, Janne., 2002. "Dye-sensitized Nanostructured and Organic Photovoltaic Cells". Technical review and Preliminary Tests. **Master Thesis, Helsinki University of Technology**
- Hao, S., Wu, J., Huang, Y., Lin, J., 2006. "Natural Dyes As Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cell". **Solar Energy** 80, hal 209–214
- Hara, K., Horiguchi, T., Kinoshita, Tohru., Sayama, K., Sugihara, H., Arakawa, H., 2000. "Highly Efficient Photon-To-Electron Conversion With Mercurochrome-Sensitized Nanoporous Oxide Semiconductor Solar Cells". **Solar Energy Materials & Solar Cells** 64, hal. 115-134
- Honsbergand, C., Bowden, S.,. **Measurement of Series Resistance**.<http://pveducation.org/pvcdrom/characterisation/series-resistance-measurements>
- Jones, A.Z., "**The Visible Light Spectrum**". < <http://physics.about.com/od/lightoptics/a/vislightspec.htm>>
- Kay, A., Grätzel, M., 1996." Low Cost Photovoltaic Modules Based on Dye Sensitized Nanocrystalline Titanium Dioxide and Carbon Powder". **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol 44, hal 99-117
- Lai, W.H., Su, Y.H., Teoh, L.G., Hon, M.H., 2008. "Commercial and Natural Dyes as Photosensitizers for a Water-Based Dye-Sensitized Solar Cell Loaded with Gold

- Nanoparticles”. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, vol 195, hal 307–313
- Law, M., Greene, L.E., Johnson, J.C., Saykally, R., Yang, p., 2005.” Nanowire Dye Sensitized Solar Cells” **Nature materials**, vol 4, hal 455-459.
- Lee, J.K., Yang, M., 2011.” Progress in Light Harvesting and Charge Injection of Dye Sensitized Solar Cells”. **Materials Science and Engineering**, vol B 176, hal 1142– 1160
- Li, G., Richter, C.P., Milot,R.L., Cai, L., Schmuttenmaer, C.A., Crabtree, R.H., Brudvig, G.W., Batista, V.S., 2009. “Synergistic Effect Between Anatase and Rutile TiO₂ Nanoparticles in Dye-Sensitized Solar Cells”. **Dalton Trans**, hal 10078–10085
- Liu, W., Hua, L., Dai, S., Guo, L., Jiang, N., Kou, D., 2010.” The Effect of The Series Resistance in Dye-Sensitized Solar Cells Explored By Electron Transport and Back Reaction Using Electrical and Optical Modulation Techniques”. **Electrochimica Acta**, vol 55, hal 2338–2343
- Narayan, M.R., 2011. “Dye Sensitized Solar Cells Based on Natural Photosensitizers”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** vol.16, issue 1, hal. 208-215
- Ngo, T., Zhao, Y., 2009.” Stabilization of Anthocyanins on Thermally Processed Red D’Anjou Pears Through Complexation and Polymerization”. **LWT - Food Science and Technology**, vol 42, hal 1144–1152
- Ni, M., Leung, M.K.H., Leung, D.Y.C., Sumathy, K., 2006.” An Analytical Study of The Porosity Effect on Dye-Sensitized Solar Cell Performance”. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol 90, hal 1331–1344
- O’Regan, B., Grätzel, M., 1991. “A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based On Dye Sensitized Colloidal TiO₂ Films” **Nature**. 353, hal. 737–740
- Ovando, A.C., Pacheco-Hernandez, Ma.D.L., Paez-Hernandez, Ma.E., Rodriguez, J.A., Galan-Vidal, C.A., 2009.” Chemical Studies of Anthocyanins: a Review”. **Food Chemistry** vol 113, hal 859–871

- Rivai, H., 2013. "Analisis Fisokimia". Universitas Andalas
- Scalon, D., Dunnill, C., Buckeridge, J., Shevlin, S.A., Logsdail, A.J., Woodley, S.M., Catlow, C.R.A., Powell, M.J., Palgrave, R.G., Keal, T.W., Sherwood, P., Walsh, A., Sokol, A.A., 2013. "Band Alignment of Rutile and Anatase TiO₂". **Nature materials**, vol 12, hal 798-801
- Tanaka, Y., Suganuma, M., 2001. "Effects of Heat Treatment on Photocatalytic Property of Sol-Gel Derived Polycrystalline TiO₂". **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, vol 22, hal 83-89
- Timuda, G.E., 2010. "Sintesis Partikel Nanokristalline TiO₂ untuk Aplikasi Sel Surya Menggunakan Metode Sonokimia". **Prosiding pertemuan ilmiah XXIV HFI Jateng dan DIY**, hal 104-109
- Toyoda, T., Tsuboya, I., 2003. "Apparent Band-Gap Energies of Mixed TiO₂ Nanocrystals with Anatase and Rutile Structures Characterized with Photoacoustic Spectroscopy". **Review Of Scientific Instruments**, vol 74, no 1, hal 782-784
- Triyanti, E., 1985. "Spektrofotometer Ultra-Violet Dan Sinar Tampak Serta Aplikasinya Dalam Oseanologi". **Oseana**, volume X, nomor 1, hal 39 – 47
- Universitas of Colorado. **Mineral Structure and Property Data** <ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>
- Varghese, O.K., Grimes, C.A., 2008. "Appropriate Strategies for Determining The Photoconversion Efficiency of Water Photoelectrolysis Cells: A Review with Examples Using Titania Nanotube Array Photoanodes". **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol 92, hal 374-384
- Wahyuono, R.A.. 2013. "Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Fabrication with TiO₂ and ZnO Nanoparticle for High Conversion Efficiency". **Master Thesis, ITS**
- Wongcharee, K., Meeyoo, V., Chavadej, S., 2007. "Dye-Sensitized Solar Cell Using Natural Dyes Extracted from Rosella and Blue Pea Flowers". **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol 91, hal 566-571

- Yamazaki, E., Murayama, M., Nishikawa, N., Hashimoto, N., Shoyama, M., Kurita, O., 2007. "Utilization Of Natural Carotenoids As Photosensitizers For Dye-Sensitized Solar Cells". **Solar Energy** vol. 81, issue 4, hal. 512 – 516
- Yulianto, B., 2011."Solar Cell Sumber Energi Terbarukan Masa Depan".<<http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4034-solar-cell-sumber-energi-terbarukan-masa-depan-.html>>
- Yuwono, H.A., Dhaneswara, D., Ferdiansyah, A., Rahman, A., 2011." Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna Berbasis Nanopartikel TiO₂ Hasil Proses Sol-Gel Dan Perlakuan Pasca-Hidrotermal". **Jurnal Material dan Energi Indonesia** Vol. 01, No. 03, hal 127 – 140
- Zhang, H., Banfield, J.F., 2000. "Understanding Polymorphic Phase Transformation Behavior during Growth of Nanocrystalline Aggregates: Insights from TiO₂". **J. Phys. Chem. B**, vol 104, hal 3481-3487
- Zhao, B., Huang, H., Jiang, P., Zhao, H., Huang, X., Shen,P., Wu, D., Fu, R., Tan, S., 2011." Flexible Counter Electrodes Based on Mesoporous Carbon Aerogel for High-Performance Dye Sensitized Solar Cells". **J. Phys. Chem**, vol 115, hal 22615–22621
- Zyoud, A., Zaatar, N., Saadeddin, I., Helal, M.H., Campet, G., Hakim, M., Park, D., Hilal, H., 2011."Alternative Natural Dyes in Water Purification: Anthocyanin as TiO₂ - Sensitizer in Methyl Orange Photo-Degradation". **Solid State Sciences**, vol 13, hal 1268-1275

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kabupaten Nganjuk pada tanggal 04 Juli 1992 dari ayah yang bernama Paidi dan Ibu bernama Suli. Penulis merupakan anak sulung dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di RT 003 RW 003 Dsn. Sembung Ds. Sumberurip Kec. Berbek Kab. Nganjuk. Pada tahun 2005, penulis menyelesaikan pendidikannya di SDN Sumberurip II. Tahun 2007, telah menyelesaikan pendidikan tingkat menengah pertama di SMPN 6 Nganjuk. Tahun 2010 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 1 Nganjuk. Dan pada tahun 2014 ini, penulis mampu menyelesaikan gelar sarjananya di Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN A (KONSTANTA 1240)

Cara mendapatkan konstanta 1240 pada persamaan 2.10

$$IPCE [\%] = \frac{hc \times J_{sc} [\mu A cm^{-2}]}{e \times \lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W cm^{-2}]}$$

Dimana h adalah Konstanta Plank ($6,62 \times 10^{-34}$ Js), c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s) dan e adalah Muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$).

$$IPCE [\%] = \frac{6,6210^{-34} \times 310^8 \times J_{sc} [\mu A cm^{-2}]}{1,610^{-19} \times \lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W cm^{-2}]}$$

$$IPCE [\%] = \frac{19,8610^{-26} \times J_{sc} [\mu A cm^{-2}]}{1,610^{-19} \times \lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W cm^{-2}]}$$

$$IPCE [\%] = \frac{12,410^{-7} (eV.m) \times 310^8 \times J_{sc} [\mu A cm^{-2}]}{\lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W cm^{-2}]}$$

$$IPCE [\%] = \frac{1240(eV.nm) \times J_{sc} [\mu A cm^{-2}]}{\lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W cm^{-2}]}$$

**LAMPIRAN B (EFISIENSI DENGAN DAN TANPA
KARBON)**

	Pewarna	FF (%)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	η (%)	Selisih η (%)
Tanpa karbon	Kulit manggis	10	0,092	589	0,0343	0,0085
Karbon		23	0,087	316	0,0428	