



6/FIS
2003
049
028

Alamat: Jalan Pajadiran, 199, Bogor, Jawa Barat

IPB University

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PROTOTIPE SEL SURYA TiO_2 TERSENSITISASI DYE ORGANIK SINTESIS

EKO PURWITO HIDAYAT



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
2003



Semua jingga pasti
menghitam
Dan semua hitam akan
memutih
Maka bahagialah
telaga
Dengarlah apa yang
kulihat!!!!!!

[Eko Purwito Hidayat]

aku adalah
arsitek.....!!!!!!

[J. A. Verdijantoro]

Halaman 11 dari 11 | 11/11/2023, 10:00 AM
1. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
2. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
3. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
4. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
5. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
6. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
7. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
8. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
9. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.
10. Di antara anggota jajarannya, ada beberapa yang baru, beberapa yang sudah lama, dan beberapa yang sudah lama.

RINGKASAN

EKO PURWITO HIDAYAT. Pembuatan dan Karakterisasi Prototipe Sel Surya TiO_2 Tersensitisasi Dye Organik Sintesis. Dibimbing oleh **AKHIRUDDIN MADDU, M.Si** dan **Ir. IRMANSYAH, M.Si.**

Oleh karena sumber energi minyak bumi yang keberadaannya semakin menipis di alam ini maka dicari sumber energi alternatif untuk dapat digunakan dalam berbagai kebutuhan hidup manusia. Salah satu alternatif yang dilakukan adalah dengan mengkonversi langsung energi cahaya dari matahari menjadi bentuk energi listrik dengan piranti yang disebut Sel Surya.

Sel surya nanokristal tersensitisasi dikembangkan untuk menekan biaya pembuatan yang mahal serta peralatan produksi yang rumit. Sel Surya ini menggunakan prinsip yang sama dengan proses fotosintesis alam.

Sel ini merupakan aplikasi dari elektroda semikonduktor dye sensitizer pada jenis baru dari sel fotovoltaik. Foto elektroda dari sel fotovoltaik ini terdiri dari lapisan 10-20 μm dari partikel TiO_2 nanokristalin yang mengandung lapisan tunggal dari molekul dye teradsorpsi ; partikel dye ditopang pada substrat kaca konduksi transparan (TCO). Sel ini juga menggunakan larutan elektrolit I^-/I_3^- dan elektroda counter karbon. Proses elektrokimia cahaya pada sel surya tersensitisasi dye membentuk siklus yang mengkonversi energi cahaya menjadi bentuk energi yang lebih berguna.

Pada penelitian kali ini digunakan dye organik Methylviolet Thiocyanat yang disintesis dari Methylviolet dan KSCN.

Puncak-puncak yang terlihat dari karakterisasi XRD menunjukkan bahwa struktur dari sampel TiO_2 yang terbentuk adalah polikristal anatase dengan nilai hkl pada $2\theta = 25,181$ (101); $2\theta = 36,888$ (103); $2\theta = 37,701$ (004) ; $2\theta = 38,406$ (112); $2\theta = 48,053$ (200); $2\theta = 53,961$ (105); $2\theta = 54,991$ (211); $2\theta = 62,579$ (204). Ukuran partikel yang terbentuk sekitar 33,70 nm dengan parameter kisi $a = 3,790\text{\AA}$ dan $c = 9,516\text{\AA}$.

Luas penampang prototipe Sel Surya TiO_2 tersensitisasi dye yang disinari adalah (1,6x2,4) cm^2 atau 3,84 cm^2 . jarak antara sumber cahaya (lampu) dengan prototipe sel surya TiO_2 tersensitisasi dye 10 cm, intensitas lampu yang digunakan adalah 55 mW/cm^2 , sementara karakterisasi dengan menggunakan sumber cahaya sinar matahari dilakukan pada saat matahari bersinar terik sekitar pukul 11.00 – 12.00 siang dan dipilih pada saat langit tidak berawan.

Hasil karakterisasi I-V menunjukkan bahwa prototipe sel surya memiliki efisiensi antara 0,24-0,52%, sementara hasil karakterisasi efisiensi kuantum menunjukkan sel memiliki daerah absorpsi maksimum pada panjang gelombang 585 nm yaitu daerah panjang gelombang cahaya kuning.

Pembuatan dan Karakterisasi Prototipe Sel Surya TiO_2 Tersensitisasi Dye Organik Sintesis

EKO PURWITO HIDAYAT

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains
Pada
Jurusan Fisika

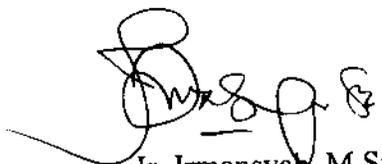
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
2003



Misi Cita Misi IPB University
1. Mengembangkan sumber daya manusia yang berkualitas dan berprestasi
2. Mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi yang bermanfaat bagi masyarakat
3. Mengembangkan budaya kepedulian sosial yang berkeadilan
4. Mengembangkan budaya kepedulian lingkungan yang berkelanjutan
5. Mengembangkan budaya kepedulian internasional yang berkeadilan

Menyetujui,


Akhiruddin Maddu, M.Si
Pembimbing I


Ir. Irmansyah, M.Si
Pembimbing II

Mengetahui,



Dr. Rigus Dahlan
Ketua Jurusan

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 23 Maret 1981. Penulis merupakan anak tunggal dari Kasno Hidayat dan Sri Sukarti.

Penulis memulai masa pendidikan pada tahun 1985 di TK Rawaterate, kemudian pada tahun 1986 penulis memasuki jenjang sekolah dasar di SDN Jatinegara 07 Jakarta Timur dan tamat pada tahun 1992. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMP Muhammadiyah I Klaten sampai tahun 1995, kemudian penulis menempuh pendidikan sekolah menengah umum di SMUN 36 Jakarta dan lulus pada tahun 1998. Penulis diterima sebagai mahasiswa Institut Pertanian Bogor pada Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam pada tahun 1998 melalui jalur Undangan Seleksi Masuk IPB (USMI).

Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Fisika Dasar I dan Fisika Dasar II. Selain itu penulis juga aktif dalam organisasi kemahasiswaan baik internal maupun eksternal kampus diantaranya Dept PSDM BEM TPB IPB 1998/1999, Biro Sains BEM FMIPA IPB 1999/2000, Komisi Eksternal DPM FMIPA IPB 2000/2001, Dept Infokom HIMAFl 2000/2001, KaBid DKM HMI Komisariat FMIPA IPB 2001/2002, Dept PTKP HMI Cabang Bogor 2002/2003. Penulis juga adalah salah seorang pendiri badan independen Mahasiswa Pencinta Seni dan Estetika FMIPA (MATASEFA).

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum wrwb.

Alhamdulillahirabbilamin. Segala puji dan syukur penulis haturkan hanya kepada Allah SWT, kebenaran mutlak Alam Semesta beserta isinya, shalawat dan salam bagi Rasulullah pemimpin umat manusia. Dengan rahmat Allah SWT pulalah penulis berhasil menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pembuatan dan Karakterisasi Prototipe Sel Surya TiO₂ Tersensitisasi Dye Organik" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Jurusan Fisika.

Pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak membantu penulis dalam menyelesaikan studinya diantaranya:

- Bapak Akhiruddin Maddu, Msi. dan Bapak Ir. Irmansyah, Msi. selaku dosen pembimbing; Bapak Ir. Irzaman, Msi. dan Bapak Drs. M. Nur Indro, Msc. selaku dosen penguji, Bapak Sulistiyoso Giat dan P3IB Batan, seluruh dosen dan staf Jurusan Fisika IPB.
- Ibunda serta Ayahanda tercinta, terima kasih seluas samudera karena telah mencurahkan segala yang dimiliki untuk membimbing dan menjadikanku seorang "manusia".
- *Friends of mine*; [cupi, pipib, taya] *elo yang terbaik di fisika 35 tapi itu menurut gw loh*; faozan *thanks 4da computa*; ega, ida, abe, febi, van, leny, halash, jan, ichsan, dan *others* maFia 35; mafia 32-34 *especially* tunjung, Q2 (*go gimme some RadioHead please...!!!*), soleh, diko, heri, topan dan *temen2*; mafia 36-39 *especially* doni, iwan, fuad, ipul, gana dan *temen2*, Ka! dan *temen2*.
- Jakarta 45 / Anasthavia [andi, ali, malik, ishal] *thanks udah bikin hidup lebih berarti, percaya aja suatu saat kita bikin album beneran.*
- HMI Cabang Bogor [helen (*thanks banget ya*) dan *temen2* PTKP, udin dan *temen2* presidium, yamin, devi dan *temen2* Komisariat FMIPA]
- Ciwaluya 18 [moecho / daeng gau, fanra penguin, dafi bebek, CPTD]; ORI [age, rifky, mahar, mira, dan yang *laen*]; izzzi, tin2, uwie, andra, i2, salina, denea, afra (*rasa takut adalah seni*) dan semua *temen laen yang masie inget.....*
- Agatha Christie, Karen Armstrong, Dexter Holland, J. A. Verdijantoro, Paul Davies, Fritjof Capra, KOIL, koRn, DEFT, NIRV, orgy, PJ, SP, NIN, MM, RATM, SY, *industrial and gothic movement, and all my idols and inspirators.*

Penulis sadar bahwa tidak ada yang sempurna di dunia termasuk skripsi ini, oleh karenanya terima kasih atas berbagai kritik, saran dan masukan semoga bermanfaat bagi kita semua terutama yang membutuhkan, amin.

Wassalamualaikum wrwb.

Bogor, 7 Juli 2003

Eko Purwito Hidayat

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR LAMPIRAN	iii
PENDAHULUAN	1
Latar Belakang.....	1
Tujuan Penelitian.....	1
Manfaat Penelitian.....	1
Hipotesis Penelitian.....	1
TINJAUAN PUSTAKA	1
Material Titanium Dioksida.....	1
Sel Surya TiO ₂ Tersensitisasi Dye.....	2
Lapisan Porous Nanostuktur.....	3
Dye Sensitiser.....	3
Proses Fotovoltaik pada Sel Surya.....	3
Arus Sirkuit Singkat.....	4
Potensial Sirkuit Terbuka.....	4
Fill Factor.....	4
Efisiensi.....	4
Efisiensi Kuantum.....	4
BAHAN DAN METODA	5
Waktu dan Tempat Penelitian.....	5
Alat dan Bahan.....	5
Metoda Penelitian.....	5
Pembuatan lapisan TiO ₂	5
Pembuatan Dye dan Larutan Elektrolit.....	6
Pembuatan prototipe Sel Surya TiO ₂ Tersensitisasi Dye Organik.....	6
Pengukuran Karakteristik Sel Surya.....	6
Efisiensi Kuantum.....	6
Pengukuran Karakteristik I-V.....	6
HASIL DAN PEMBAHASAN	7
Karakterisasi XRD Lapisan Titanium Dioksida (TiO ₂).....	7
Karakterisasi Arus Tegangan (I-V).....	8
Karakterisasi Arus dan Panjang Gelombang (Efisiensi Kuantum).....	10
KESIMPULAN DAN SARAN	11
Kesimpulan.....	11
Saran.....	11
DAFTAR PUSTAKA	12



DAFTAR TABEL

1. Hasil karakterisasi arus tegangan sampel I dan sampel II..... 10

DAFTAR GAMBAR

1. Struktur kristal TiO_2 2
2. Skema sel surya nanokristal TiO_2 tersensitisasi..... 2
3. Mekanisme sel surya nanokristal TiO_2 tersensitisasi..... 3
4. Diagram alur penelitian..... 5
5. Rangkaian Pengukuran Karakteristik I-V dari Sel Surya..... 6
6. Hasil karakterisasi XRD sampel TiO_2 7
7. Kurva hubungan Arus-Tegangan sampel I dengan sumber cahaya lampu..... 8
8. Kurva hubungan Arus-Tegangan sampel II dengan sumber cahaya lampu..... 9
9. Kurva hubungan Arus-Tegangan sampel I dengan sumber cahaya matahari..... 9
10. Kurva hubungan Arus-Tegangan sampel II dengan sumber cahaya matahari..... 9
11. Kurva hubungan Arus dan panjang gelombang sampel I dan II..... 10
12. Kurva hubungan IPCE dan panjang gelombang sampel I dan II..... 11

DAFTAR LAMPIRAN

1. Data Puncak Hasil XRD Sampel Prototipe Sel Surya TiO_2 Tersensitisasi Dye..... 14
2. Perbandingan nilai $d(A)$ sampel TiO_2 dengan nilai $d(A)$ standar..... 14
3. Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel I Lampu..... 15
4. Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel II Lampu..... 16
5. Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel I Matahari..... 17
6. Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel II Matahari..... 18
7. Data Karakterisasi Arus Panjang Gelombang..... 18
8. Data Karakterisasi IPCE Panjang Gelombang..... 18
9. Panjang Gelombang Absorpsi Beberapa Material..... 19
10. Tabel Standar Struktur Kristal Anatase dan Rutil TiO_2 20
11. Menentukan Parameter Kisi dan Ukuran Partikel Menggunakan Metoda Cohen..... 21

PENDAHULUAN

Latar belakang

Transfer elektron merupakan basis utama energi dalam proses kehidupan di bumi. Hal ini terjadi baik dalam membran mitokondrial dari sel kehidupan maupun membran tilakoid dalam sel fotosintesis dari tumbuhan hijau dan algae. Selama ini kita bergantung pada transfer elektron ini dalam bentuk bahan bakar minyak serta produk-produk pertanian. Tantangan terbesar pada abad 21 ini adalah kita belum mampu membuat piranti yang dapat digunakan untuk mengubah langsung dari sumber energi matahari menjadi bentuk energi yang lebih ekonomis (Gretzel et al, 1998).

Oleh karena sumber energi minyak bumi yang keberadaannya semakin menipis di alam ini maka dicari sumber energi alternatif untuk dapat digunakan dalam berbagai kebutuhan hidup manusia. Salah satu alternatif yang dilakukan adalah dengan mengkonversi langsung energi cahaya dari matahari menjadi bentuk energi listrik dengan piranti yang disebut Sel Surya (Bach et al, 1998).

Sel Surya konvensional mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik dengan memanfaatkan efek fotovoltaiik pada persambungan semikonduktor yang ada dalam sel tersebut. Semikonduktor menunjukkan dua proses yaitu penyerapan cahaya dan pemisahan muatan listrik (elektron dan hole). Untuk menanggulangi rekombinasi prematur dari elektron dan hole, semikonduktor haruslah sangat murni dan bebas dari kerusakan struktur. Pembuatan sel surya tipe ini sangat sulit untuk skala industri pada saat ini (Smestad, 1997).

Sel surya nanokristal tersensitisasi dikembangkan untuk menekan biaya pembuatan yang mahal serta peralatan produksi yang rumit, sel surya ini menggunakan prinsip yang sama dengan proses fotosintesis alam. Yaitu dengan menggunakan dye untuk menyerap cahaya datang dan memproduksi elektron tereksitasi. Lapisan dari partikel TiO_2 berukuran nanometer yang terhubungkan menggantikan nikotinamida adenin dinukleotida fosfat ($NADP^+$) dan karbon dioksida sebagai akseptor elektron, serta iodida dan triiodida (I, I_3) menggantikan air dan oksigen sebagai donor elektron dan produk oksidasi. Hal ini merupakan pendekatan biomimetik dari konversi energi seperti proses

berpasangan (fotosintesis dan respirasi) yang terjadi di biosfer. Proses elektrokimia cahaya pada sel surya nanokristal membentuk siklus yang mengkonversi energi cahaya menjadi bentuk energi yang lebih berguna (Gretzel et al, 1998).

Dalam penelitian ini akan dilakukan pembuatan prototipe sel surya nanokristal TiO_2 tersensitisasi dye organik. Dye organik yang digunakan adalah Methylviolet Thiocyanat yang disintesis dari Methylviolet dan Kalium Thiocyanat (KSCN).

Tujuan Penelitian

Membuat prototipe Sel Surya TiO_2 tersensitisasi dye dan melakukan karakterisasi arus-tegangan serta efisiensi kuantum.

Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memberikan informasi tentang karakteristik Sel Surya TiO_2 tersensitisasi dye dalam aplikasi konversi energi matahari.

Hipotesis Penelitian

Sel Surya Nanokristal TiO_2 dye sensitizer akan memperlihatkan karakteristik arus-tegangan yang sesuai dengan karakteristik arus-tegangan Sel Surya pada umumnya dan panjang gelombang yang berbeda akan menghasilkan fotoarus yang berbeda.

TINJAUAN PUSTAKA

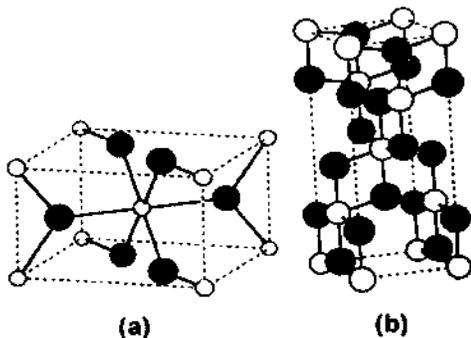
Material Titanium Dioksida (TiO_2)

TiO_2 adalah material yang murah yang digunakan sebagai pigmen pemutih pada cat atau kertas. Zat ini tidak beracun sehingga memungkinkan untuk digunakan pada pasta gigi, industri kertas, cat putih, produk kosmetik dan lainnya. Penggunaan TiO_2 dalam bentuk lapisan pada substrat konduktif transparan selain pada fotovoltaiik nanosel juga dapat digunakan sebagai elektroda kerja dalam peralatan elektrokromik (ECD), fotokatalis untuk menghilangkan polusi udara dan air, sebagai selaput tipis untuk sensor gas, membran

ultrafiltrasi serta peralatan semikonduktor yang lain.

TiO₂ memiliki tiga struktur kristal yaitu anatase, rutil dan brokit. Dari ketiga struktur tersebut yang stabil adalah struktur anatase dan rutil. Struktur anatase dan rutil dapat digambarkan sebagai rantai oktahedron TiO₆. Kedua struktur tersebut dibedakan oleh distorsi oktahedral dan pola susunan rantai oktahedralnya. Setiap ion Ti⁴⁺ dikelilingi oleh 6 ion O²⁻. Oktahedral pada struktur rutil mengalami sedikit distorsi ortorombik, sedangkan pada anatase distorsi ortorombiknya cukup besar sehingga relatif tidak simetri. Jarak antara Ti-Ti anatase lebih besar dari rutil (3,79 dan 3,04 Å dengan 3,57 dan 2,96 Å) sedangkan jarak Ti-O anatase lebih kecil dari rutil (1,934 dan 1,980 Å dengan 1,949 dan 1,980 Å). Pada struktur rutil setiap oktahedron dikelilingi oleh 10 oktahedron tetangga sedangkan pada struktur anatase setiap oktahedron hanya dikelilingi 8 oktahedron lainnya (Gunlazuardi, 2001).

Besarnya celah energi (E_g) yang dimiliki anatase E_g = 3,2 eV sedangkan rutil E_g = 3,0 eV. Anatase dapat disintesis pada temperatur rendah dengan menggunakan metode preparasi (pelepasan) seperti elektrolisis TiCl₄, TiOSO₄ atau dari Titanium Alkoksida (Alfredo Olea et al, 1999). Struktur rutil dapat mengalami transformasi menjadi anatase pada kisaran temperatur 700 – 1000° C tergantung pada ukuran kristal dan bahan campuran (Kalyanasundaram et al, 1998).



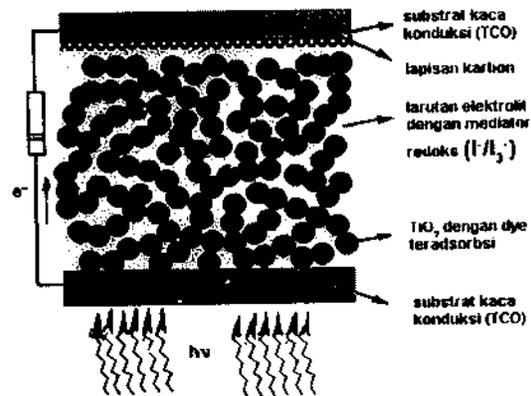
Gambar 1. Struktur kristal TiO₂ (a) rutil (b) anatase.

Struktur kristal TiO₂ yang ketiga adalah brokit. Struktur kristal brokit termasuk dalam kelompok sistem kristal ortorombik. Struktur kristal brokit sulit ditemukan karena struktur

kristal brokit biasanya hanya diperoleh dalam mineral dan sulit dimurnikan (Soleh, 2002).

Sel Surya TiO₂ Tersensitisasi Dye.

Sel ini merupakan aplikasi dari elektroda semikonduktor dye sensitizer pada jenis baru dari sel fotovoltaik. Foto elektroda dari sel fotovoltaik ini terdiri dari lapisan dengan ketebalan 10-20 μm dari partikel TiO₂ nanokristalin (garis tengahnya 10-30 nm) yang



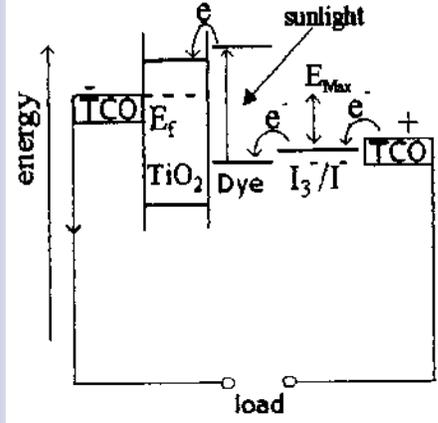
Gambar 2. Skema sel surya TiO₂ tersensitisasi dye (A. Olea et al, 1999).

mengandung lapisan tunggal dari molekul dye teradsorpsi; partikel dye yang telah dilapiskan pada substrat kaca konduksi transparan (TCO). Pori dari lapisan TiO₂ diisi dengan elektrolit cair yang mengandung iodida / triiodida. Elektroda counter transparan ditempatkan diatas TiO₂ nanokristalin dan tepian dari sel disegel. Selama proses fotoeksitasi dari sel, molekul dye menginjeksikan elektron secara efisien pada pita konduksi TiO₂ sehingga mengakibatkan pemisahan muatan (elektron-hole). Elektron terinjeksi pada lapisan dengan sedikit kehilangan energi dan berkumpul pada substrat kaca konduksi. Setelah melewati sirkuit eksternal dan menghantarkan daya menuju muatan, elektron kembali memasuki sel pada elektroda counter, mereduksi triiodida menjadi iodida yang kemudian berdifusi pada lubang dari lapisan TiO₂ untuk mereduksi dye – fotooksidasi kembali ke keadaan semula (Deb et al, 1998).

Penyerapan cahaya oleh lapisan tunggal dari dye sangatlah lemah. Efisiensi fotovoltaik

yang baik tidak disebabkan oleh penggunaan permukaan semikonduktor datar tetapi disebabkan pada penggunaan lubang (porous) pada lapisan nanostruktur dengan kekasaran permukaan yang cukup tinggi.

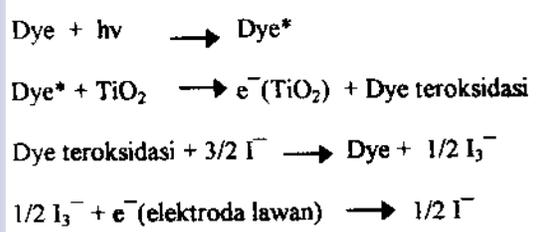
Difusi elektron menuju konduktor yang terjadi hampir tanpa kehilangan energi, rekombinasi antara elektron yang diinjeksikan menuju pita konduksi semikonduktor, dan hole yang berada pada dye teroksidasi secara efektif sangatlah lambat bila dibandingkan reduksi pada mediator berbentuk enceran. Dengan demikian rekombinasi elektron-hole pada semikonduktor yang menyebabkan terganggunya efisiensi



Gambar 3. Mekanisme sel surya nanokristal TiO₂ tersensitisasi [Smestad, 1998]

fotovoltaik klasik tidak terjadi pada kasus ini, disebabkan fakta bahwa tidak adanya hole korespondensi pada pita valensi untuk elektron pada pita konduksi. Sebagai hasilnya efisiensi sel tidak dirugikan oleh penerangan cahaya yang lemah (ct: langit berawan) seperti yang terjadi pada sistem klasik (Smestad, 1997).

Secara keseluruhan prinsip kerja sel surya tipe ini mengalami reaksi berurutan sebagai berikut :



Lapisan Porous Nanostruktur

Pembuatan lapisan nanostruktur pada substrat kaca dilakukan dengan pencetakan layar (screen printing) dari enceran koloidal TiO₂ (diproduksi dengan metoda sol-gel) diikuti dengan langkah curing pada 450° C yang menyebabkan partikel melakukan fusi satu sama lain sehingga menjamin soliditas dari seluruh film. Skala nanometer dari partikel (10-30 nm) juga mempertimbangkan faktor kekasaran lapisan sekitar 100 per mikron ketebalan. Dengan cara ini 10 µm tebal lapisan nanostruktur memiliki permukaan internal ribuan kali lebih baik bila dibandingkan dengan lapisan datar yang padat (bulk).

Dye Sensitiser

Dye merupakan elemen kunci dari sel ini. Dye harus memiliki syarat-syarat (i) menyerap cahaya pada jangkauan spektral selebar mungkin (ii) dapat menginjeksikan elektron dari keadaan tereksitasi pada pita konduksi dari semikonduktor (iii) memperlihatkan stabilitas yang sempurna dari ribuan eksitasi - oksidasi - reduksi sebagai siklus selama 20 tahun waktu operasional yang akan digunakan.

Dye organik yang telah dites belum mampu bertahan diatas ribuan siklus dan masih dalam pertimbangan sampai saat ini. Sebaiknya logam transisi kompleks secara umum seperti Ruthenium dan Osmium merupakan kandidat utama yang dapat dipergunakan sebagai dye. Banyak jenis kompleks yang dapat menyerap cahaya tampak dengan baik yang telah disintesis dalam dua dekade terakhir. Kompleks yang terbaik diantaranya Cis - X₂ bis (4,4' - dikarboksi - 2,2' - bipyridin) yang merupakan famili Ruthenium (II) dengan X = Cl -, Br -, I -, CN -, atau NCS -. Kompleks dengan X = NCS memiliki efisiensi terbesar dikarenakan lebarnya spektrum absorpsi dan keadaan eksitasi yang lama (Smestad, 1997).

Proses Fotovoltaik pada Sel Surya

Celah pita energi menentukan fototegangan maksimum yang dapat digenerasikan yang disebut potensial sirkuit terbuka, E_{oc} atau V_{oc}. Karakteristik arus tegangan dari persambungan p - n ideal diberikan oleh persamaan :

$$I = I_s \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (01)$$

dimana q adalah elemen muatan, k adalah konstanta Boltzman, T adalah temperatur mutlak dan I adalah arus jenuh (*satursasi*) dari persambungan.

Sementara karakteristik arus tegangan dari sel surya ditunjukkan oleh persamaan :

$$I = -I_{ph} + I_s \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (02)$$

dengan I_{ph} adalah arus yang tergenerasi oleh penyinaran (Yohannes, 1997).

Beberapa hal yang diperhatikan dalam proses fotovoltaik.

Arus sirkuit singkat (I_{sc})

Arus ini dicapai jika Sel Surya dihubung singkat, dimana tidak ada potensial yang melintasi sel. Lebih jelasnya arus sirkuit singkat sama dengan jumlah absolut dari foton yang terkonversikan menjadi pasangan elektron - hole (Grove, 1967).

Potensial sirkuit terbuka (V_{oc})

Potensial sirkuit terbuka dicapai saat tak ada arus yang mengalir dari sel surya. Harga potensial yang tinggi akan tercapai pada saat.

- Panjang difusi dari pembawa muatan sepanjang mungkin.
- Konsentrasi doping N_D dan N_A sebesar mungkin.
- Volume kristal sekecil mungkin.

Fill Factor (FF)

Daya output yang optimal membutuhkan hambatan yang cocok, yang berhubungan dengan perbandingan V_m/I_m . V_m dan I_m adalah tegangan dan arus pada titik operasi maksimum dan $P_m = V_m I_m$ adalah daya

output maksimum yang dapat diterima. *Fill Factor* adalah perbandingan dari puncak output $V_m I_m$ dengan $V_{oc} I_{sc}$.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (03)$$

Efisiensi

Efisiensi dari Sel Surya (η) adalah perbandingan dari output listrik fotovoltaik tergenerasi dan energi dari cahaya yang masuk.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{I_m V_m}{P_m} \times 100\% \\ &= \frac{FF \times I_{sc} V_{oc}}{P_m} \times 100\% \end{aligned} \quad (04)$$

Efisiensi Sel Surya ini merupakan kemampuan Sel Surya untuk mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Efisiensi konversi diperoleh dari hubungan arus-tegangan keluaran yang dihasilkan Sel Surya bila disinari cahaya dengan daya tertentu (Wolfbauer, 2002).

Efisiensi Kuantum

Suatu Sel Surya memiliki kemampuan untuk menghasilkan foto-arus berbeda untuk tiap panjang gelombang cahaya. Cahaya yang memiliki panjang gelombang yang berbeda akan menghasilkan foto-arus yang berbeda pula. Hal ini disebabkan setiap bahan mempunyai tingkat penyerapan yang berbeda untuk tiap panjang gelombang yang menyinarinya (Herdianto, 2002). Efisiensi kuantum dapat dinyatakan sebagai fungsi dari panjang gelombang :

$$\eta(\lambda) = \frac{J_p}{e_0 I_0(\lambda)} \quad (05)$$

Kemampuan suatu sel surya untuk menghasilkan fotoarus pada suatu panjang gelombang cahaya tertentu diukur dengan efisiensi konversi cahaya ke arus (IPCE; *Incident Photon to Current Conversion Efficiency*), didefinisikan sebagai jumlah elektron yang tergenerasi per jumlah foton yang diterima. Nilai IPCE dalam persen dapat ditentukan melalui persamaan:



$$IPCE\% = \frac{1240I_{sc}}{\lambda I_i} \quad (06)$$

Dimana I_{sc} adalah arus sirkuit pendek (μAcm^{-2}), λ adalah panjang gelombang eksitasi (nm) dan I_i adalah fluks foton (Wm^{-2}). Sampai saat ini, efisiensi kuantum yang diperoleh untuk sel elektrokimia padat kurang dari 1%. Secara umum efisiensi kuantum sel elektrokimia padat ketika disinari dari sisi depan lebih besar daripada ketika disinari dari sisi belakang (Yohannes, 1997).

BAHAN DAN METODA

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2002 sampai April 2003. Bertempat di Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.

Alat dan Bahan

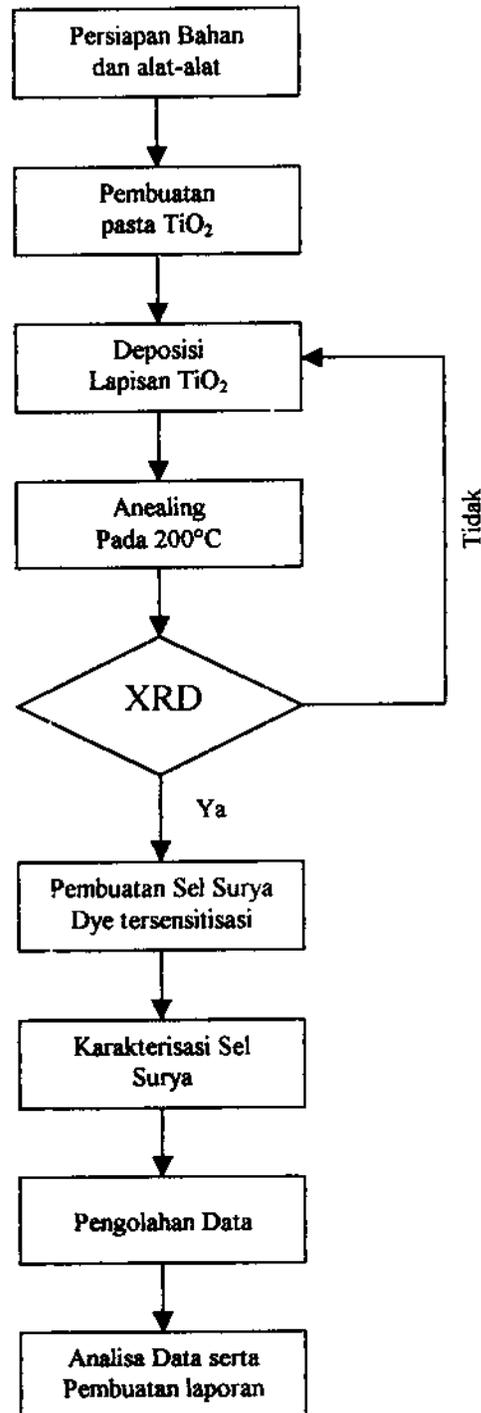
Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya substrat *Transparent Conductive Oxide* (TCO), TiO_2 koloid (TiNano 40 ALTAIR USA), iodida (I_2), kalium iodida (KI), etanol, asetil aseton, asetonitril, methyl violet, karbon, kaliumthiocyanat, triton X-100 dan aquades.

Sedangkan peralatan yang digunakan diantaranya multimeter MULTIVIEW-110 EXTECH, potensiometer 100K Ω , gelas ukur, neraca OHAUS 311, Magnetic Stirrer Hotplate, pemotong kaca, Scotch 35 (3M) tape, YSI - Kettering Radiometer Model 65, Lampu Halogen 240 V 100 W, Power Supply, Filter, XRD XD-610 SHIMADZU.

Metoda Penelitian

Pembuatan lapisan TiO_2

Pembuatan lapisan TiO_2 menggunakan metoda *doctor blade technique* atau disebut juga teknik *casting*. Yang pertama dilakukan adalah mencampurkan 10,0 ml TiO_2 koloid dengan 1,0 ml asetil aseton dan air sampai terbentuk pasta. Kemudian pasta tersebut ditambahkan beberapa

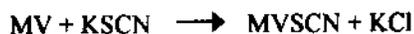


Gambar 4. Diagram alir tetes triton X - 100 sebagai surfaktan untuk menambah daya adhesi pada substrat, setelah itu dideposisikan pada substrat TCO yang sebelumnya telah dicuci dengan air dan sabun kemudian dibilas dengan etanol dan aseton.

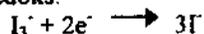
Selanjutnya hasil deposisi tersebut dibuat cetakan dengan menggunakan scotch 35 (3M) tape dengan ukuran sekitar 2 mm pada ketiga sisinya dan 10 mm pada sisi yang lain. Hasil deposisi TiO_2 tersebut kemudian dikarakterisasi XRD untuk mengetahui apakah struktur kristal sampel sudah seperti yang diharapkan. Lapisan dianealing pada temperatur 200°C selama 20 – 30 menit setelah itu didinginkan pada suhu ruang.

Pembuatan Dye dan Larutan Elektrolit

Pembuatan dye dengan mencampurkan 0,5 g methyl violet dengan 0,5 g KSCN kemudian dididihkan sampai terbentuk 0,13 M Methylviolet Thiocyanat. Rumus molekul Methylviolet adalah $[(\text{CH}_3)_2\text{NC}_6\text{H}_4]_2\text{C}:\text{C}_6\text{H}_4:\text{NCH}_3:\text{HCl}$, sehingga reaksi yang terjadi adalah:



Larutan elektrolit yang digunakan merupakan campuran dari KI dan I_2 dengan asetonitril sebagai pelarut. Campuran KI dan I_2 ini dibuat untuk menghasilkan pasangan redoks I_3^-/I^- sehingga dalam larutan elektrolit terjadi reaksi redoks:



Pembuatan prototipe Sel Surya TiO_2 Tersensitisasi Dye Organik

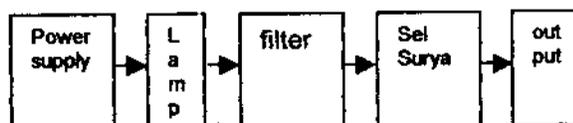
Pembuatan Sel Surya dengan meneteskan larutan dye pada lapisan TiO_2 yang kemudian dikeringkan, setelah itu ditetesi larutan elektrolit yang mengandung mediator redoks (I^-/I_3^-), larutan ini dibuat dengan menggunakan pelarut asetonitril. Kemudian lapisan TiO_2 tersebut ditutup dengan elektroda counter lapisan karbon. Pada kedua sisinya, sel dijepit dengan binder clip dan dihubungkan dengan rangkaian pengukuran karakteristik sel surya untuk menentukan karakteristik arus dan tegangan pada sel surya.

Pengukuran karakteristik Sel Surya

Karakteristik prototipe Sel Surya ditentukan dengan dua pengukuran yaitu:

Efisiensi kuantum

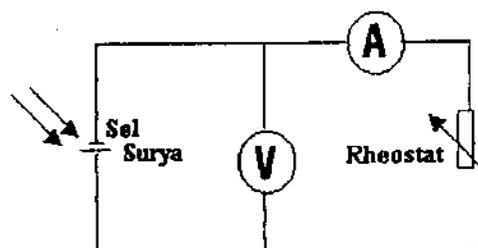
Efisiensi kuantum dari Sel Surya ditentukan dengan alat eksperimen yang diset sesuai dengan bagan berikut:



Outputnya adalah Amperemeter yang digunakan untuk mengukur arus sirkuit pendek.

Pengukuran karakteristik I-V

Pada Karakterisasi arus tegangan, sel surya dihubungkan dengan voltmeter, amperemeter, dan reostat atau potensiometer. Sebuah sumber cahaya ditempatkan sehingga cahaya mengenai seluruh permukaan sel surya. Posisi reostat atau potensiometer mula-mula pada nilai maksimum, kemudian diturunkan perlahan-lahan hingga nilainya minimum. Nilai pembacaan pada masing-masing alat ukur dicatat pada setiap perubahan resistansi. Dari pengukuran ini diperoleh hubungan arus-tegangan sehingga dapat ditentukan efisiensi konversi energi Sel Surya. Rangkaian pengukuran karakteristik I-V ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 5. Rangkaian Pengukuran Karakteristik I-V dari Sel Surya

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi XRD Lapisan Titanium Dioksida (TiO_2)

Setelah terbentuk lapisan TiO_2 pada substrat TCO kemudian sampel tersebut dikarakterisasi XRD untuk mengetahui struktur kristal TiO_2 yang terbentuk sebagai hasil dari deposisi. Pada penelitian ini dibuat dua sampel secara bersamaan dengan menggunakan metoda yang sama. Karakterisasi XRD hanya dilakukan pada satu sampel karena dianggap mewakili sampel yang lainnya.

Karakterisasi XRD sampel TiO_2 dilakukan di Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan (P3IB) Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), kawasan PUSPIPTEK Serpong Tangerang.

Sampel dikarakterisasi dengan menggunakan XRD XD-610 SHIMADZU, sumber Cu dengan besar tegangan 30 kV dan besar arus 30mA. Karakterisasi XRD sampel TiO_2 dilakukan pada kisaran sudut 2θ antara 20° sampai 70° .

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan puncak-puncak TiO_2 yang muncul adalah pada $2\theta = 25,181; 37,701; 48,053; 54,991; 53,961;$

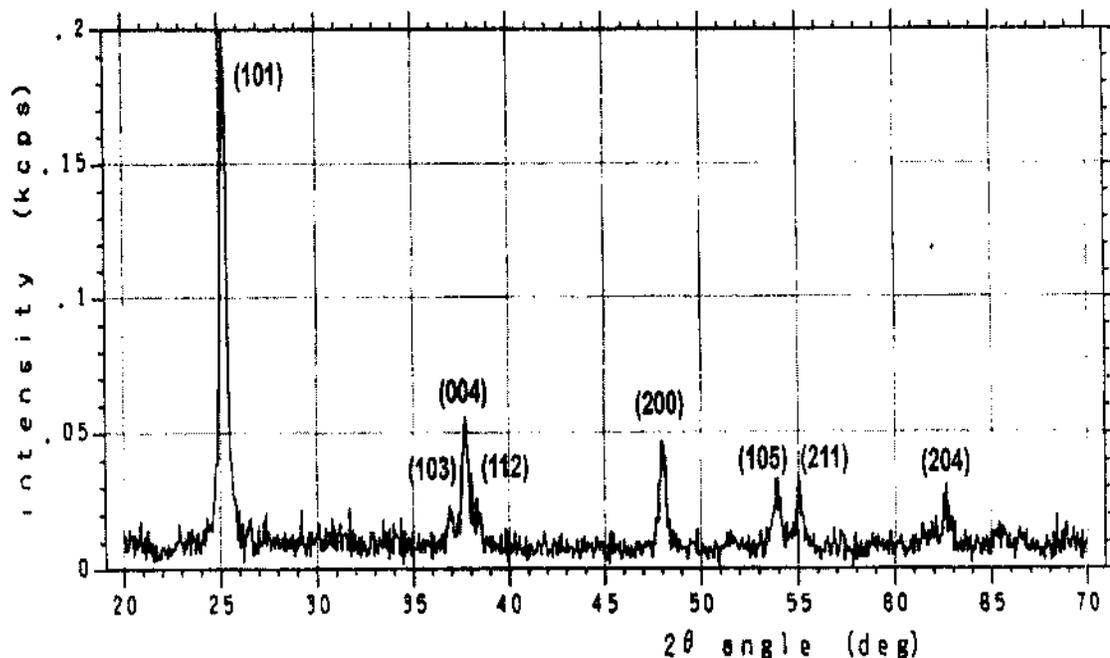
$62,579; 36,406; 36,888; 25,536; 62,904.$ dengan nilai $d(\text{\AA}) = 3,5336; 2,3840; 1,8918; 1,6684; 1,6978; 1,4831; 2,3418; 2,4346; 3,3562; 1,4831.$

Puncak-puncak TiO_2 yang muncul dari hasil karakterisasi XRD sampel terlihat tajam. Hal ini disebabkan oleh proses anealing yang menyebabkan kristalisasi dari TiO_2 berjalan dengan baik, hal ini juga disebabkan bahan TiO_2 yang digunakan merupakan hasil produksi pabrikan.

Puncak-puncak yang terlihat dari karakterisasi XRD juga menunjukkan bahwa struktur dari sampel TiO_2 yang terbentuk adalah polikristal anatase dengan nilai hkl pada $2\theta = 25,181 (101); 2\theta = 36,888 (103); 2\theta = 37,701 (004); 2\theta = 38,406 (112); 2\theta = 48,053 (200); 2\theta = 53,961 (105); 2\theta = 54,991 (211); 2\theta = 62,579 (204).$

Struktur sampel TiO_2 diketahui sebagai kristal anatase setelah dibandingkan dengan literatur standar *Powder Diffraction Data*. Hasil puncak XRD sampel TiO_2 yang dibuat mendekati hasil TiO_2 literatur standar.

Menurut Jiangnan Yuan dan Shigeo Tsujikawa (1993) ada keterkaitan terbentuknya kristal TiO_2 powder dengan temperatur perlakuan panas (*anealing*), pada temperatur 200°C struktur kristal TiO_2 adalah amorf, kristal anatase baru terbentuk pada temperatur 300°C



Gambar 6. Hasil Karakterisasi XRD sampel TiO_2

setelah mengalami kristalisasi dan seluruhnya menjadi kristal anatase pada temperatur 400°C. transformasi menjadi struktur rutil seluruhnya terjadi pada temperatur 900°C.

Pada penelitian kali ini proses anealing yang dilakukan hanya 200°C karena bahan TiO₂ yang digunakan adalah TiO₂ koloid hasil pabrikan. Pada anealing diatas 200°C sampel menjadi rusak, yaitu pecah-pecah dan terjadi perubahan warna pada sampel. Dengan proses anealing pada 200°C hasil XRD sampel sudah menunjukkan struktur kristal anatase, hal ini menjelaskan bahwa bahan TiO₂ produksi Altair yang digunakan sudah memiliki struktur anatase.

Dari hasil karakterisasi XRD sampel TiO₂ tidak menunjukkan munculnya kristal rutil, sehingga lapisan TiO₂ yang terdepositasi pada substrat TCO memiliki struktur kristal anatase murni belum tercampur dengan struktur kristal rutil.

Karakterisasi XRD juga dapat menentukan ukuran partikel dari sampel TiO₂, hasil XRD memperlihatkan nilai FWHM pada berbagai puncak yang dihasilkan. Dari nilai FWHM (B) tersebut dapat diperoleh ukuran kristal σ , melalui persamaan:

$$B \cos \theta = \frac{0.94\lambda}{\sigma} + \eta \sin \theta \quad (07)$$

dari perhitungan asing-masing puncak diketahui ukuran partikel sampel TiO₂ sekitar 33,70 nm.

Dalam aplikasi sel surya TiO₂ tersensitisasi dye, ukuran kristal TiO₂ berskala nanometer ini memiliki kelebihan dapat menampung dye lebih banyak karena terdapat banyak rongga didalam lapisan TiO₂. Sebaliknya jika ukuran kristalnya besar hanya terdapat sedikit rongga sehingga hanya menampung sedikit dye dan efisiensi yang dihasilkan lebih kecil dari yang berskala nanometer karena foton yang dapat diserap dan menghasilkan pasangan elektron - hole menjadi lebih sedikit.

Dari hasil karakterisasi XRD sampel juga dapat ditentukan parameter kisi sampel TiO₂. TiO₂ anatase memiliki sistem kristal tetragonal dimana sumbu $a = b \neq c$ dan $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Dari data yang diperoleh diketahui kristal memiliki parameter kisi $a = 3,790\text{\AA}$ dan $c = 9,516\text{\AA}$. Bila dibandingkan dengan literatur $a = 3,07852\text{\AA}$ dan $c = 9,5139\text{\AA}$. Untuk parameter a kristal sampel lebih besar daripada literatur,

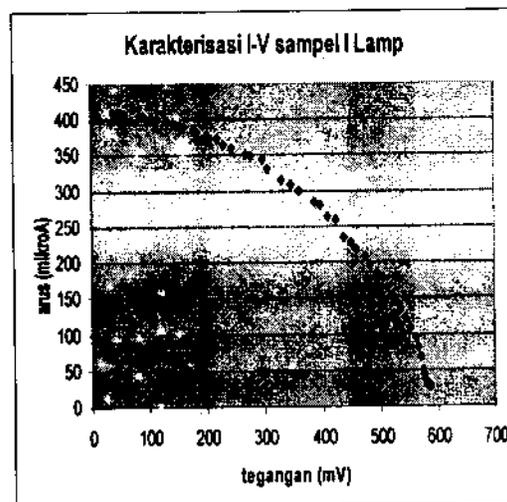
sedangkan untuk parameter c lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pada bidang tetragonal kristal sampel luas alasnya lebih besar tetapi bidang tetragonalnya lebih pendek bila dibandingkan dengan literatur.

Karakterisasi Arus Tegangan (I – V)

Karakterisasi Prototipe Sel Surya TiO₂ tersensitisasi dye dilakukan di Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor.

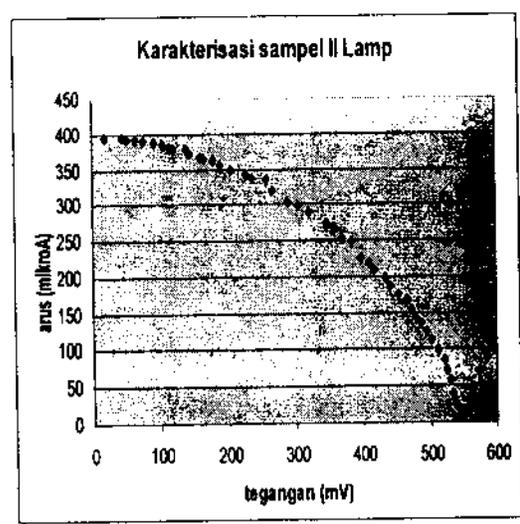
Prototipe Sel Surya TiO₂ tersensitisasi dye ini terdiri dari substrat TCO yang telah terdepositasi oleh lapisan TiO₂, larutan dye yang juga telah didepositasikan pada substrat, larutan elektrolit yang mengandung mediator redoks. Substrat TCO tersebut ditutup dengan elektroda *counter* lapisan karbon, kemudian keduanya dijepit dengan menggunakan *blinder clip*.

Sumber cahaya yang digunakan adalah lampu Halogen 100 Watt, selain itu karakterisasi juga dilakukan diluar ruangan laboratorium dengan menggunakan sumber cahaya sinar matahari. Luas penampang prototipe Sel Surya TiO₂ tersensitisasi dye yang disinari adalah (1,6x2,4) cm² atau 3,84 cm². jarak antara sumber cahaya (lampu) dengan prototipe sel surya TiO₂ tersensitisasi dye 10 cm, intensitas lampu yang digunakan adalah 55 mW/cm², sementara karakterisasi dengan menggunakan sumber cahaya sinar matahari dilakukan pada saat

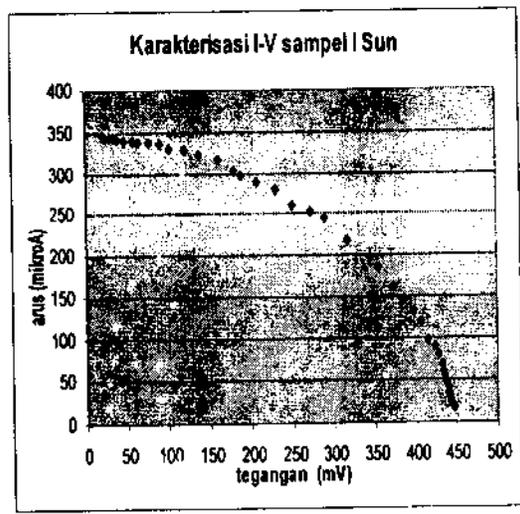


gambar 7. Kurva hubungan arus tegangan sampel I dengan sumber cahaya lampu

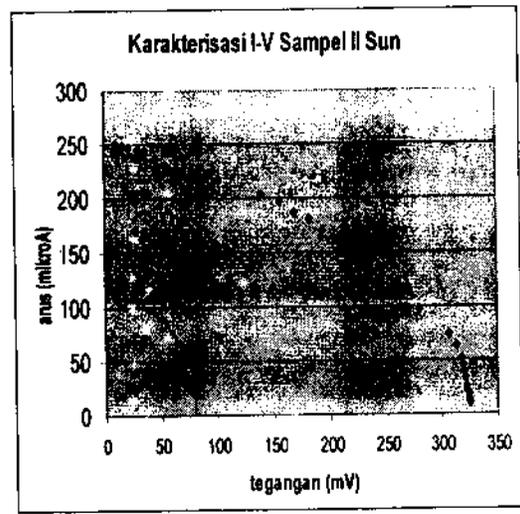
matahari bersinar terik sekitar pukul 11.00 – 12.00 siang dan dipilih pada saat langit tidak berawan.



gambar 8. kurva hubungan arus tegangan sampel II dengan sumber cahaya lampu



gambar 9. Kurva hubungan arus tegangan sampel I dengan sumber cahaya matahari



gambar 10. Kurva hubungan arus tegangan sampel II dengan sumber cahaya matahari

Hasil dan karakterisasi arus tegangan yang dilakukan pada prototipe sel surya TiO₂ tersensitisasi dye baik dengan menggunakan lampu sebagai sumber cahaya maupun sinar matahari sesuai dengan karakterisasi sel surya pada umumnya, yaitu hubungan arus tegangan berbanding terbalik secara eksponensial. Jika tegangan yang terukur pada voltmeter mengalami penurunan maka arus yang terukur pada amperemeter akan mengalami kenaikan, demikian pula sebaliknya. Nilai arus tertinggi adalah pada saat arus sirkuit singkat (I_{sc}), sedangkan tegangan tertinggi adalah tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}).

Dari grafik hubungan arus tegangan dapat dihitung besarnya daya maksimal yaitu daya yang dihasilkan oleh prototipe sel surya TiO₂ tersensitisasi dye yang merupakan nilai terbesar dari hubungan arus dan tegangan yang teramati (luas daerah maksimum). Dari grafik juga dapat ditentukan nilai efisiensi dari prototipe sel surya TiO₂ tersensitisasi dye. Efisiensi ini menunjukkan besarnya kemampuan untuk mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik saat sel surya disinari cahaya. Semakin tinggi efisiensi konversi semakin baik pula sel surya tersebut.

Pada penelitian kali ini dibuat dua sampel prototipe sel surya TiO₂ tersensitisasi dye dengan teknik pembuatan dan perlakuan serta karakterisasi yang sama.

Dari hasil karakterisasi arus tegangan terlihat sampel I menghasilkan arus dan tegangan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan sampel II, nilai I_{sc} dan V_{oc} serta I_{max} dan V_{max} yang menghasilkan P_{out} maksimum, nilai Fill Factor dan Efisiensi dapat dilihat pada tabel berikut:

tabel 1: Hasil karakterisasi arus tegangan sampel I dan sampel II

Karakterisasi I - V	sumber cahaya			
	lampu		Matahari	
	Spl I	Spl II	Spl I	Spl II
I max (μA)	279	269	244	152
V max (mV)	397	357	289	226
P max (μW)	110,76	96,03	70,52	34,35
I sc (μA)	415	397	350	242
Voc (mV)	590	550	450	326
Fill Factor	0,452	0,440	0,448	0,435
Efisiensi (%)	0,52	0,45	0,50	0,24

Dari hasil karakterisasi arus tegangan prototipe sel surya TiO_2 tersensitisasi dye didapatkan nilai efisiensi sampel I lebih besar bila dibandingkan dengan sampel II, namun demikian perbedaan tersebut tidak terlalu besar. Hal ini dikarenakan hasil deposisi sampel II kurang baik bila dibandingkan sampel I walaupun menggunakan bahan dan metoda yang sama sehingga hasil pengukuran sampel I lebih besar.

Dari nilai yang didapatkan juga terlihat bahwa pada sampel yang sama (baik sampel I atau sampel II) besar arus dan tegangan karakterisasi I - V dengan menggunakan sumber cahaya lampu lebih besar bila dibandingkan dengan menggunakan sumber cahaya matahari. Hal ini disebabkan daya input matahari pada prototipe sel surya TiO_2 tersensitisasi dye lebih kecil bila dibandingkan daya input lampu. Intensitas cahaya matahari juga tidak stabil karena pengaruh awan dan yang lainnya.

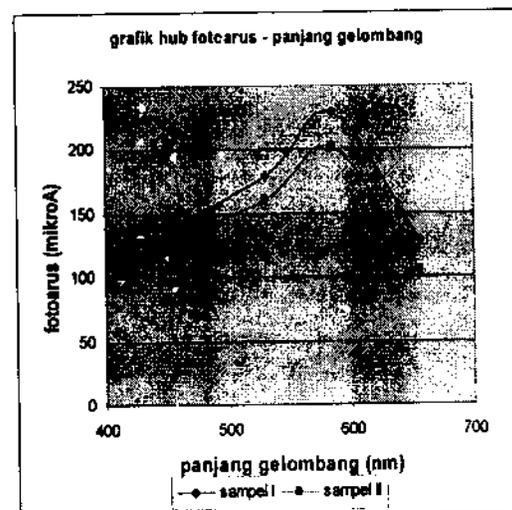
Efisiensi konversi yang didapatkan masih rendah bila dibandingkan dengan literatur. Hal ini disebabkan proses deposisi TiO_2 pada substrat TCO masih kurang baik, larutan dye yang dipilih serta larutan elektrolit yang digunakan juga berpengaruh pada prototipe sel surya TiO_2 tersensitisasi dye. Konsentrasi dye teradsorpsi dipengaruhi juga oleh temperatur pada saat *annealing*, sehingga mempengaruhi kemampuan penyerapan permukaan dye. Arus yang kecil disebabkan karena aliran elektron pada rangkaian kurang maksimal karena elektron dari dye yang tereksitasi ketika terjadi absorpsi cahaya hanya sedikit yang terakumulasi pada substrat TCO.

Jika dibandingkan dengan penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya, hasil efisiensi konversi penelitian ini lebih baik. Meningkatnya efisiensi ini dikarenakan bahan TiO_2 yang digunakan sudah dalam bentuk koloid dan sudah merupakan kristal anatase hasil pabrikan.

Kurva hasil karakterisasi arus - tegangan masih jauh dari kurva sel surya ideal. Kurva sampel terlihat sangat landai, menunjukkan kecilnya nilai *fill factor* sehingga belum maksimal. Hal ini disebabkan karena resistansi dari sel masih cukup besar. Ketebalan lapisan TiO_2 menyebabkan meningkatnya nilai resistansi sel.

Karakterisasi Arus dan Panjang Gelombang (Efisiensi kuantum)

Karakterisasi ini hampir sama dengan karakterisasi arus tegangan pada sampel prototipe sel surya TiO_2 tersensitisasi dye, perbedaannya adalah antara sumber cahaya dan sampel diletakkan filter yang hanya melewatkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu. Kemudian dicatat nilai arus pada masing-masing panjang gelombang.



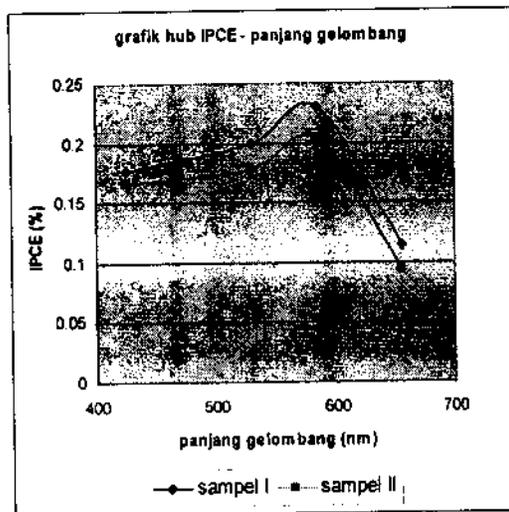
gambar 11. Kurva hubungan arus dan panjang gelombang sampel I dan II

Masing-masing sampel dikarakterisasi dengan filter yang sama yaitu empat filter: filter merah (655 nm), filter kuning (585 nm), filter hijau (530 nm), dan filter biru (425 nm).

Dari hasil pengamatan didapatkan hasil arus yang timbul pada sampel I lebih besar secara keseluruhan bila dibandingkan dengan arus yang timbul pada sampel II, hal ini sesuai dengan karakterisasi sebelumnya yaitu karakterisasi arus tegangan.

Kurva hubungan arus dan panjang gelombang yang didapatkan baik pada sampel I maupun sampel II memiliki pola yang sama. kurva tersebut tidak linier tetapi memiliki pola tertentu. Kurva meningkat dari panjang gelombang cahaya biru, hijau hingga memuncak pada panjang gelombang cahaya kuning, tetapi setelah melewati cahaya kuning turun lagi saat melintasi panjang gelombang cahaya merah.

Selain grafik hubungan antara arus dan panjang gelombang, untuk tiap-tiap nilai arus pada masing-masing panjang gelombang yang berbeda dicari nilai IPCE (*Incident Photon-to-current Conversion Efficiency*) yaitu efisiensi nilai fotoarus pada tiap panjang gelombang.



gambar 12. Kurva hubungan IPCE dan panjang gelombang sampel I dan II

Perhitungan nilai IPCE bergantung pada panjang gelombang, arus serta intensitas sumber cahaya yang digunakan. Masing-masing panjang gelombang menghasilkan fotoarus dan efisiensi kuantum yang berbeda-beda.

Dari grafik IPCE terlihat bahwa absorpsi terbesar sel surya berada pada daerah panjang gelombang kuning (585nm). Hal ini disebabkan oleh pengaruh dye Methylviolet yang tersensitisasi pada lapisan TiO_2 . Daerah

absorpsi maksimal dye Methylviolet berada pada panjang gelombang 570 nm (Fernando et al, 1995). Spektra absorpsi dye ini dipengaruhi juga oleh simetri molekular yang dimiliki oleh Methylviolet, sehingga memiliki respon cahaya yang baik dalam transfer elektron tereksitasi pada panjang gelombang cahaya tampak. TiO_2 sendiri memiliki daerah absorpsi UV (sekitar 340 nm). Karakterisasi IPCE menunjukkan bahwa absorpsi foton yang menghasilkan fotoarus yang besar pada cahaya tampak lebih disebabkan oleh pengaruh dye Methylviolet yang tersensitisasi pada lapisan TiO_2 dibanding oleh TiO_2 itu sendiri. Selain itu absorpsi foton juga dipengaruhi larutan elektrolit I^-/I_3^- sebagai mediator yang digunakan. Larutan iodine memiliki daerah absorpsi 460 nm jika menggunakan pelarut asetonitril. Dye Methylviolet memperlebar daerah absorpsi sel surya serta memperlebar celah energi sehingga energi foton yang diserap sel surya lebih besar dan fotoarus yang dihasilkan sel surya lebih besar pula.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- Deposisi lapisan TiO_2 pada substrat TCO dapat dilakukan dengan menggunakan teknik *casting*.
- Besar efisiensi konversi tergantung pada bahan serta dye yang digunakan dan deposisi yang baik pada substrat TCO.
- Kemiringan kurva atau besarnya *fill factor* dipengaruhi oleh resistansi sel.
- Setiap panjang gelombang yang berbeda menghasilkan fotoarus yang berbeda.
- Dye yang tersensitisasi pada sel surya memperlebar daerah absorpsi pada cahaya tampak.

Saran

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan dye yang lebih baik seperti kompleks dari Ruthenium agar dapat menghasilkan kinerja yang baik pada prototipe



Sel Surya TiO_2 tersensitisasi dye. Juga lebih baik bila elektroda counter menggunakan logam Pt. Dalam karakterisasi efisiensi kuantum akan lebih teliti jika menggunakan monokromator sebagai pengganti filter agar dapat diamati nilai panjang gelombang yang lebih bervariasi. Disarankan juga untuk mengukur tebal dari lapisan TiO_2 yang terdeposisi pada substrat. Untuk memperkecil resistansi dapat dengan menambahkan dopan atom donor atau dengan memperkecil luas sel.

DAFTAR PUSTAKA

- Bach, V., J. Salbeck, M. Gratzel et al, 1998, *Solid-State Dye-Sensitized Mesoporous TiO_2 Solar Cells with high Photon to Electron Conversion Efficiencies*, Journal Nature Vol. 395.
- Cullity, B. D. 1978, *Element of X-Ray Diffraction*, 2nd Edition. Addison – Wesley Publishing Company
- Deb, S.K., R. Erlingson, S. Ferrere et al, 1998, *Photochemical Solar Cells Based on Dye-Sensitization of Nanocrystalline TiO_2* , Journal NREL / CP-450-22953.
- Fernando, A. Nandana, A. Kitagawa, M. Suzuki et al, 1995, *A Sharp Photocurrent Enhancement in Photoelectrochemical Cells with a Photocathode Sensitized by Dye Films of Rhodamine- C_{18} and Methylviolet- C_{18} prepared by Langmuir-Blodgett Techniques*, Journal Applied Physics Vol 34 page 6100-6105.
- Gretzel, Michael, Greg P. Smestad, 1998, *Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology A Natural Dye Sensitized Nanocrystalline Energy Converter*, Journal of Chemical Education Vol. 75 page 752-756.
- Grove, A.S., 1967, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons. Inc, USA.
- Gunlazuardi, Jarnuzi, 2001, *Fotoelektrokatalis untuk detoksifikasi air*, Seminar Nasional Elektrokimia 2001, P31B BATAN, Serpong.
- Herdianto, Nendar, 2002, *Pembuatan dan Karakterisasi Sifat-sifat Fotoelektrokimia Lapisan Semikonduktor Nanokristal TiO_2* , Skripsi. Jurusan Fisika FMIPA IPB, Indonesia.
- Huang, SY, G. Schlinchthrorl, A.J. Nozik et al, 1997, *Charge and Recombination in Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO_2 Solar Cells*, Journal Physical Chemistry B Vol. 101 No. 14 page 2576-2582.
- Irzaman, H. Darmasetiawan et al, 2003, *Micro Strain and Particle Size Analysis of $\text{PbZr}_{0.525}\text{Ti}_{0.475}\text{O}_3$ (PZT) Ceramic and Thin Film*, Departement of Physics FMIPA IPB, Indonesia.
- Kalyanasundaram, K., M. Gratzel, 1998, *Applications of Transition Metal Complexes in Photonic and Optoelectronic Devices*, Journal Coordination Chemistry Reviews 77 page 347-414.
- Kebede, Zerihun, S. Lindquist, 1998, *Donor-Acceptor Interaction Between non-Aquaeous Solvents and I_2 to generate I_3^- and Its Implication In Dye Sensitized Solar Cells*, Addis Ababa University, Ethiopia.
- Lewis, Nathan S, 1994 *Semiconductor Photoelectrochemistry Principles and Applications*, California Institute of Technology, California, USA.
- Maddu, Akhiruddin, 2000, *Penuntun Praktikum Eksperimen Fisika II*, Jurusan Fisika FMIPA IPB, Indonesia.
- Morris, Marlene C., 1981, *Powder Diffraction Data*, Joint Committee on Powder Diffraction Standards, 1601 Pennsylvania USA.
- Olea, Alfredo, G. Ponce et al, 1999, *Electron Transfer Via Organic Dyes For Solar Conversion*, Journal Solar Energy Material and Solar Cells 59 page 137-143.
- Park, NG, G. Schlinchthrorl, H. M. Cheong et al, 1999, *Dye Sensitized TiO_2 Solar Cells: Structural and Photo electrochemical Characterization of Nanocrystalline Electrodes Formed from the Hydrolysis of TiCl_4* , Journal of Physical Chemistry B Vol.103 No. 17 page 3308-3314.
- Smestad, Greg, 1997. *Nanocrystalline Solar Cells Technology*, Florida Solar Energy Center.
- Soleh, Achmad, 2002, *Pembuatan Sel Surya Fotoelektrokimia Titanium Dioksida (TiO_2) Dengan Ekstraksi Klorofil Daun*

*Bunga Sepatu (Hibiscus Rosasinesis L.)
Sebagai Dye Sensitizer, Skripsi.
Jurusan Fisika FMIPA IPB, Indonesia.*

- Tennakone, K., G.R.R.A. Kumara et al, 1995,** *A Dye-Sensitized nanoporous Solid State Photovoltaic Cells, Journal Semiconductor Science and Technology* 10 page 1689-1693.
- Wen, C., K. Ishikawa et al, 1999,** *Effects of Silver Particles on the Photovoltaic Property of Dye-Sensitized TiO₂ Thin Films, Journal Solar Energy Materials and Solar Cells* 61 page 339-351.
- Wolfbauer, Dipl.-Ing Georg, 2002,** *The Electrochemistry of Dye Sensitized Solar Cells, their Sensitizers and their Redox Shuttles, Monash University, Australia.*
- Yohannes, Teketel, 1997,** *All-Solid State Photoelectrochemical Solar Energy Conversion, PhD Thesis, Departement of Chemistry, Adis Ababa University, Ethiopia.*
- Yohannes, Teketel, T. Solomon, O. Inganas, 1996,** *Polymer electrolyte based Photoelectrochemical Solar Energy Conversion with Poly (3-methylthiophene) Photoactive Electrode, Addis Ababa University, Ethiopia.*
- Yuan, Jiangnan, S. Tsujikawa, 1995,** *Characterization of Sol Gel Derived TiO₂ Coating and Their Photoeffects on Copper Substrat, Journal Electrochem. Soc. Vol. 142, No 10.*



LAMPIRAN

Misi Cipta, Mendukung, Meningkatkan

1. Mengingat pentingnya sebagai salah satu sumber daya yang sangat penting dalam meningkatkan sumber daya manusia
2. Mengingat pentingnya untuk meningkatkan pendidikan, penelitian, pengabdian masyarakat, pengembangan sumber daya manusia, pengembangan sumber daya manusia, pengembangan sumber daya manusia
3. Mengingat pentingnya untuk meningkatkan kemampuan yang terdapat di IPB University
4. Mengingat pentingnya untuk meningkatkan kemampuan yang terdapat di IPB University
5. Mengingat pentingnya untuk meningkatkan kemampuan yang terdapat di IPB University

Lampiran 1: Data Puncak Hasil XRD Sampel Prototipe Sel Surya TiO₂ Tersensitisasi Dye

File no: 12				X - Ray: Cu 30 kV 30 mA		
Sampel: TiO ₂				Scan Range: 20 - 70 (deg)		
peak	2θ (deg)	d (Å)	I / I _i	FWHM (deg)	int (kcps)	intgrtd int (kcps.deg)
1	62.904	1.4762	5	0.253	0.007	0.0014
2	62.579	1.4831	10	0.298	0.013	0.0053
3	61.441	1.5078	4	0.28	0.006	0.0032
4	57.159	1.6102	4	0.244	0.005	0.0012
5	54.991	1.6684	12	0.366	0.016	0.0085
6	53.961	1.6978	11	0.501	0.015	0.0103
7	48.053	1.8918	19	0.397	0.026	0.0136
8	38.406	2.3418	7	0.217	0.010	0.0030
9	37.701	2.3840	22	0.443	0.030	0.0167
10	36.888	2.4346	7	0.352	0.010	0.0060
11	29.95	2.9809	4	0.257	0.006	0.0042
12	29.192	3.0566	4	0.325	0.005	0.0042
13	26.536	3.3562	5	0.343	0.007	0.0063
14	25.181	3.5336	100	0.379	0.134	0.0624
15	22.85	3.8885	3	0.271	0.004	0.0022

Lampiran 2: Perbandingan nilai d(Å) sampel TiO₂ dengan nilai d(Å) standar

no	d(Å)		hkl	2θ
	sampel TiO ₂	standar		
1	3.5336	3.5200	101	25.181
2	2.4346	2.4310	103	36.888
3	2.3840	2.3780	004	37.701
4	2.3418	2.3320	112	38.406
5	1.8918	1.8920	200	48.053
6	1.6978	1.6999	105	53.961
7	1.6684	1.6665	211	54.991
8	1.4831	1.4808	204	62.579

Lampiran 3: Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel I Lampu

no	Tegangan (mV)	Arus (μ A)	no	Tegangan (mV)	Arus (μ A)
1	587	26	32	361	300
2	586	27	33	346	308
3	585	27	34	329	314
4	584	28	35	306	330
5	583	29	36	298	345
6	582	29	37	277	348
7	580	30	38	269	351
8	579	32	39	245	359
9	578	35	40	230	365
10	576	42	41	220	373
11	573	50	42	206	374
12	570	68	43	201	378
13	565	82	44	184	382
14	561	95	45	180	388
15	552	109	46	161	389
16	543	122	47	155	392
17	535	134	48	146	394
18	527	145	49	144	396
19	520	153	50	133	398
20	512	164	51	116	400
21	505	178	52	105	402
22	494	184	53	92	404
23	482	195	54	86	405
24	475	208	55	60	408
25	457	219	56	53	409
26	450	228	57	46	409
27	438	235	58	39	410
28	423	258			
29	410	263			
30	397	279			
31	387	284			

Lampiran 4: Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel II Lampu

no	Tegangan (mV)	Arus (μA)	no	Tegangan (mV)	Arus (μA)
1	547	16	29	370	253
2	546	17	30	357	269
3	545	17	31	347	274
4	544	18	32	321	290
5	543	19	33	306	298
6	542	19	34	289	304
7	540	20	35	266	320
8	539	22	36	258	335
9	538	25	37	237	338
10	536	32	38	229	341
11	533	40	39	205	349
12	530	58	40	190	355
13	525	72	41	180	363
14	521	85	42	166	364
15	512	99	43	161	368
16	503	112	44	144	372
17	495	124	45	140	378
18	487	135	46	120	379
19	480	143	47	115	382
20	472	154	48	106	384
21	465	168	49	104	386
22	454	174	50	93	388
23	442	185	51	76	390
24	435	198	52	65	392
25	417	209	53	52	393
26	410	218	54	46	394
27	398	225	55	20	395
28	383	248			

Lampiran 5: Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel I Matahari

no	Tegangan (mV)	Arus (μ A)	no	Tegangan (mV)	Arus (μ A)
1	446	18	22	289	244
2	443	23	23	273	253
3	442	28	24	250	261
4	441	31	25	230	280
5	440	35	26	207	289
6	439	40	27	189	298
7	438	44	28	180	303
8	437	49	29	161	316
9	435	55	30	138	322
10	434	60	31	121	328
11	432	68	32	102	330
12	428	80	33	91	336
13	423	90	34	78	337
14	415	98	35	65	338
15	407	119	36	58	339
16	398	132	37	47	340
17	386	146	38	39	342
18	373	162	39	35	343
19	355	185	40	30	344
20	345	196	41	25	344
21	317	218	42	21	345

Lampiran 6: Data Karakterisasi Arus-Tegangan Sampel II Matahari

no	Tegangan (mV)	Arus (μA)	no	Tegangan (mV)	Arus (μA)
1	325	11	18	182	181
2	324	14	19	169	186
3	324	18	20	156	197
4	323	21	21	139	203
5	322	26	22	102	217
6	321	33	23	93	222
7	320	40	24	79	226
8	319	45	25	65	228
9	318	52	26	55	231
10	313	63	27	46	236
11	306	75	28	37	244
12	280	97	29	30	245
13	269	118	30	22	247
14	244	136	31	17	248
15	226	152	32	13	249
16	210	163	33	10	250
17	194	170			

Lampiran 7: Data Karakterisasi Arus Panjang Gelombang

Panjang Gelombang (nm)	sampel I (μA)	sampel II (μA)
655	128.3	105.8
585	229.2	202.2
530	179.7	160.7
425	127.6	120.5

Lampiran 8: Data Karakterisasi IPCE Panjang Gelombang

Panjang Gelombang (nm)	IPCE sampel I (%)	IPCE sampel II (%)
655	0.1150	0.0948
585	0.2300	0.2029
530	0.1991	0.1780
425	0.1763	0.1667



Lampiran 9: Panjang Gelombang Absorpsi Beberapa Material

Material	λ (nm)	Peneliti
TiO ₂ tanpa dye	340	C. Wen, et al
TiO ₂ + Ru-dye + Ag	700	
Methylviolet	570	Fernando, et al
Larutan elektrolit I ⁻ /I ₃ ⁻ dengan pelarut asetonitril	460	Kebede, et al
Larutan sianidin bunga <i>Anthurium</i> + TiO ₂	573	K. Tennakone, et al
<i>di (aqua) bis (oxalato) iron (II) bromopyrogallol</i>	540	
<i>Bromopyrogallol red</i>	690	Alfredo Olea, et al
Larutan ekstraksi <i>Black berry</i>	517	



Lampiran 10: Tabel Standar Struktur Kristal Anatase dan Rutil TiO₂

d	3.52	1.89	2.38	3.52	(TiO ₂) 12U					
I/I ₁	100	35	20	100	Titanium Dioxide			(Anatase)		
					d (Å)	I/I ₁	hkl	d (Å)	I/I ₁	hkl
Rad. CuKα ₁ λ 1.54056 filter Mono. Dia.					3.52	100	101	1.0436	4	321
Cut off I/I ₁ Diffractometer V _{cor.} = 4.3					2.431	10	103	1.0182	2	109
Ref. National Bureau of Standard, Mono. 25, Sec. 7, 82 (1969)					2.378	20	004	1.0070	2	208
Sys. Tetragonal S.G. I4 ₁ /amd (141)					2.332	10	112	0.9967	2	323
a ₀ 3.07852 b ₀ c ₀ 9.5139 A C 2.5134					1.892	35	200	.9555	4	316
α β γ Z 4 D _x 3.893					1.6999	20	105	.9464	4	400
Ref. Ibid.					1.6665	20	211	.9246	<2	307
					1.4930	4	213	.9192	2	325
					1.4808	14	204	.9138	2	411
eα nωβ eγ Sign					1.3641	6	116	.8966	4	219,1110
2V D mp Color Colorless					1.3378	6	220	.8890	2	228
Ref. Ibid.					1.2795	<2	107	.8819	<2	413
Pattern at 25°C. Internal standard: w.					1.2649	10	215	.8793	2	404
Sample obtained from National Lead Co., South					1.2509	4	301	.8464	2	420
Amboy, New Jersey, USA.					1.1894	<2	008	.8308	<2	327
Anatase and another polymorph brookite					1.1725	2	303	.8268	4	415
(orthorhombic) are converted to rutile (tetragonal) by					1.1664	6	224	.8102	2	309
heating above 700°C.					1.1608	4	312	.7974	4	424
Merck Index, 8 th Ed., p. 1054					1.0600	2	217	.7928	2	0012
					1.0517	4	305			

d	3.25	1.69	2.49	3.25	(TiO ₂) 6T					
I/I ₁	100	60	50	100	Titanium Dioxide			(Rutile)		
					d (Å)	I/I ₁	hkl	d (Å)	I/I ₁	hkl
Rad. CuKα ₁ λ 1.54056 filter Mono. Dia.					3.247	100	110	1.0425	6	411
Cut off I/I ₁ Diffractometer V _{cor.} = 3.4					2.487	50	101	1.0364	6	312
Ref. National Bureau of Standard, Mono. 25, Sec. 7, 83 (1969)					2.297	8	200	1.0271	4	420
Sys. Tetragonal S.G. P4 ₂ /mm (136)					2.188	25	111	0.9703	2	421
a ₀ 4.5933 b ₀ c ₀ 2.9592 A C 0.6442					2.054	10	210	.9644	2	103
α β γ Z 2 D _x 4.250					1.6874	60	211	.9438	2	113
Ref. Ibid.					1.6237	20	220	.9072	4	402
					1.4797	10	002	.9009	4	510
					1.4528	10	310	.8892	8	212
eα nωβ eγ Sign					1.4243	2	221	.8774	8	431
2V D mp Color					1.3598	20	301	.8738	8	332
Ref.					1.3465	12	112	.8437	6	422
No impurity over 0.001%					1.3041	2	311	.8292	8	303
Sample obtained from National Lead Co., South					1.2441	4	202	.8196	12	521
Amboy, New Jersey, USA.					1.2006	2	212	.8120	2	440
Pattern at 25°C. Internal standard: w.					1.1702	6	321	.7877	2	530
Two other polymorphs anatase (tetragonal) brookite					1.1483	4	400			
(orthorhombic) are converted to rutile on heating					1.1143	2	410			
above 700°C.					1.0936	8	222			
Merck Index, 8 th Ed., p. 1054					1.0827	4	330			

Sumber: Marlene C. Morris, dkk, 1981.

Lampiran 11: Menentukan Parameter Kisi dan Ukuran Partikel Menggunakan Metoda Cohen

Untuk menentukan Parameter Kisi Kristal Tetragonal menggunakan persamaan:

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad [L.1]$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad [L.2]$$

$$\begin{aligned} \Sigma \alpha \sin^2 \theta &= C \Sigma \alpha^2 + B \Sigma \alpha \gamma + A \Sigma \alpha \delta \\ \Sigma \gamma \sin^2 \theta &= C \Sigma \alpha \gamma + B \Sigma \gamma^2 + A \Sigma \gamma \delta \\ \Sigma \delta \sin^2 \theta &= C \Sigma \alpha \delta + B \Sigma \gamma \delta + A \Sigma \delta^2 \end{aligned} \quad [L.3]$$

dimana a, c adalah parameter kisi; h, k, l, adalah indeks Miller; λ adalah panjang gelombang; θ adalah sudut difraksi; $\alpha = h^2 + k^2$, $\gamma = l^2$; $\delta = 10 \sin^2 2\theta$, $A = D/10$; $B = \lambda^2/(4c^2)$; $C = \lambda^2/(4a^2)$; dan A, B, C adalah numerator.

hkl	α	δ	α^2	γ	γ^2	$\alpha\gamma$
[101]	25.181	12.5905	1	1	1	1
[103]	36.888	18.444	1	1	9	9
[004]	37.701	18.8505	0	0	16	0
[112]	38.406	19.203	2	4	4	8
[200]	48.053	24.0265	4	16	0	0
[105]	53.961	26.9805	1	1	25	25
[211]	54.991	27.4955	5	25	1	5
[204]	62.579	31.2895	4	16	16	64
E				64		1236

lanjutan

$\sin^2 2\theta$	$\sin^2 \theta$	δ	δ^2	$\gamma\delta$	$\alpha\delta$
0.1810326	0.0475159	1.810326	3.27728	1.810326	1.810326
0.3603033	0.1000948	3.603033	12.981847	32.427297	3.603033
0.3739822	0.1043936	3.739822	13.986269	59.837152	0
0.3859265	0.1081858	3.859265	14.893926	15.43706	7.71853
0.5531841	0.1657786	5.531841	30.601265	0	22.127364
0.653861	0.2058321	6.53861	42.753421	163.46525	6.53861
0.6708624	0.2131474	6.708624	45.005636	6.708624	33.54312
0.7879166	0.2697374	7.879166	62.081257	126.066656	31.516664
E			225.580901	405.752365	106.857647

lanjutan

$\alpha \sin^2 \theta$	$\gamma \sin^2 \theta$	$\delta \sin^2 \theta$
0.0475159	0.0475159	0.0860193
0.1000948	0.9000853	0.3606449
0	1.6702976	0.3904135
0.2163716	0.4327432	0.4175177
0.6631144	0	0.9170608
0.2058321	5.1458025	1.3458558
1.065737	0.2131474	1.4299258
1.0789496	4.3157984	2.1253058
3.3776154	12.7253903	7.0727436

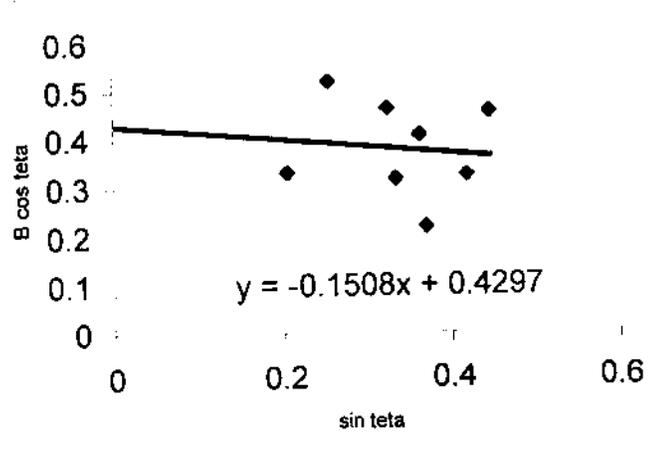
Setelah dimasukkan pada persamaan [lamp 04], $A = 1,357 \times 10^{-6}$, $B = 6,552 \times 10^{-3}$, $C = 0,0413$ nilai a didapatkan dari numerator C, dan nilai c didapatkan dari numerator B, nilai parameter kisi $a = 3,790\text{\AA}$ dan $c = 9,516\text{\AA}$

Untuk menentukan ukuran kristal menggunakan persamaan:

$$B \cos \theta = \frac{0.94\lambda}{\sigma} + \eta \sin \theta \quad [L.4]$$

B adalah FWHM (*Full Width Half Maximum*), λ adalah panjang gelombang, θ adalah sudut difraksi dan σ adalah ukuran kristal. Dari persamaan tersebut dimasukkan seluruh puncak pada hasil XRD kemudian dibuat regresi linear dengan $Y = B \cos \theta$, dan $X = \sin \theta$ sehingga persamaan diatas analogi dengan $Y = a + bX$, dari nilai konstanta a dapat diketahui ukuran kristal σ

$B \cos \theta$	$\sin \theta$
0.369886	0.2179814
0.333927	0.3163776
0.4192396	0.3230999
0.2049259	0.3289161
0.3626028	0.4071591
0.44647165	0.45368723
0.32465924	0.46167895
0.2546571	0.51936252



dari hasil regresi linear didapatkan nilai $\sigma = 33,70 \text{ nm}$