



Tesis - TF185471

PENINGKATAN KINERJA *DYE SENSITIZED SOLAR CELLS* (DSSC) DENGAN MODIFIKASI FOTOANODA STRUKTUR *CORE-SHELL* Au@TiO₂ DAN SILIKA *MICROSHEET* PREKURSOR TEOS

RA'IDAH SYARIFAH
NRP. 023117 500 20003

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

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RA'IDAH SYARIFAH

NRP : 02311750020003

Tanggal Ujian : 25 Juli 2019

Periode Wisuda : September 2019

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Dr. -Ing. Doty Dewi Risanti, S.T, M.T
NIP: 19740903 199802 2 001

Penguji:

2. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc
NIP: 19500402 197901 1 001
3. Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D
NIP: 19771127 200212 1 002

Kepala Departemen Teknik Fisika

Fakultas Teknologi Industri



Agus Muhamad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D

NIP: 19780902 200312 1 002

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Peningkatan Kinerja *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC) dengan Modifikasi Fotoanoda Struktur *core-shell* Au@TiO₂ dan Silika *Microsheet* Prekursor TEOS

Nama mahasiswa : Ra'idah Syarifah
NRP : 02311750020003
Dosen pembimbing : Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

ABSTRAK

Strategi untuk meningkatkan performansi DSSC dapat dicapai salah satunya dengan memodifikasi fotoanoda. Hasil studi dari Wang dkk., menunjukkan bahwa fotoanoda dengan struktur *microsheet* mampu meningkatkan absorpsi cahaya dengan memperpanjang jalur hamburan cahaya pada fotoanoda. Pada penelitian ini digunakan modifikasi fotoanoda dengan penambahan material plasmonik pada struktur *core-shell* Au@TiO₂ dan silika *microsheet*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan volume Au yang semakin banyak dapat menurunkan Jsc dan Voc yang berakibat rendahnya efisiensi yang dibuktikan dengan semakin rendahnya presentase IPCE. Penambahan SiO₂ dengan ukuran lebih kecil (~560nm) menunjukkan peningkatan efisiensi pada fotoanoda struktur 2 lapis akibat dari pengaruh serapan *dye* yang lebih banyak. Ukuran SiO₂ yang lebih besar (~5µm) diketahui lebih efektif meningkatkan performansi pada fotoanoda struktur 3 lapis. DSSC dengan modifikasi fotoanoda Au@TiO₂-SiO₂ memiliki efisiensi sebesar 1,434% sehingga struktur ini mampu meningkatkan efisiensi sebanyak 10,66% dari fotoanoda dasar P25 tanpa modifikasi.

Kata kunci: DSSC, fotoanoda, *silicate microsheet*, nanopartikel Au, TEOS

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**Boosting Performance of Dye Sensitized Solar Cells
(DSSCs) with The Photoanode Modification of Structure
core-shell Au@TiO₂ and Silicate Microsheet using TEOS
precursor**

Name : Ra'idah Syarifah
ID Number : 02311750020003
Supervisor : Dr. -Ing. Doty Dewi Risanti, S.T, M.T.

ABSTRACT

Strategies to improve DSSC performance can be done by modification photoanode structures. The previously studies from Wang et al., showed that photoanode with a microsheet structure capable of increasing light absorption by enlarging the light path in the photoanode. In this study we used photoanodes of Au-SiO₂ microsheet and Au@TiO₂-SiO₂ microsheet. The Addition of volume Au increases the Jsc and Voc which results in low efficiency as evidenced by the lower percentage of IPCE. The addition of smaller particle size SiO₂ (~560nm) shows an increase the efficiency of 2-layer photoanode structure because of higher dye absorption. While increasing SiO₂ with the greater sizes (~5μm) was considered more effective in improving the performance of 3-layer structure photoanodes. DSSC with modification of Au@TiO₂-SiO₂ photoanode has an efficiency 1.434% so that this structure can increase efficiency by 10.66% from basic photoanode P25 without modification.

Keywords: DSSC, photoanode, silicate microsheet, Au nanoparticles, TEOS

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, kemudahan dan kekuatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“Peningkatan Kinerja *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC) dengan Modifikasi Fotoanoda Struktur *core-shell* Au@TiO₂ dan Silika *Microsheet* Prekursor TEOS”**. Selama proses penulisan tesis ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari pembimbing dan pihak-pihak lain, baik bantuan berupa moril maupun materil. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan kakak tercinta yang selalu memberikan dukungan serta doa kepada penulis.
2. Ketua Departemen Teknik Fisika ITS serta Ketua Program Studi Pascasarjana Teknik Fisika ITS.
3. Ibu Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing skripsi yang telah sangat banyak membantu memberikan bimbingan, masukan serta saran hingga terselesaikannya tesis ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc dan Bapak Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D, sebagai dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk mengevaluasi dan memberikan masukan pada tesis ini.
5. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T selaku dosen wali yang telah memberikan motivasi selama perkuliahan.
6. Devita, Friska, dan mbak Dilla selaku rekan satu tim penelitian.
7. Rekan pascasarjana Teknik Fisika ITS dan asisten Lab. Rekayasa Bahan Teknik Fisika ITS yang telah berbagi ilmu, cerita dan pengalaman bersama penulis.
8. Lab. Bahan dan Lab. Fotonika Dept. Teknik Fisika ITS, Lab. Kimia Material dan Energi Dept. Kimia ITS, Lab. Zat Padat Dept. Fisika ITS, Divisi Karakterisasi Material Dept. Teknik Material dan Metalurgi ITS, Lab. Fotonik, Lab. SEM dan Lab. Kimia Fisik Material FMIPA ITB dan Lab. Nano Material Research Center for Nanosciences and

Nanotechnology ITB yang telah membantu melakukan karakterisasi dan pengujian dalam Tugas Akhir ini

9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu atas bantuan, kebersamaan dan motivasinya.

Penulis menyadari terdapat kekurangan dalam tesis ini, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak untuk pengembangan dan perbaikan tesis ini. Penulis juga memohon maaf atas segala kekurangan dan keterbatasan yang ada dalam tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat untuk banyak pihak.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Modifikasi Fotoanoda DSSC	5
2.2 Pengaruh Modifikasi Fotoanoda Terhadap Absorbansi	.10
2.3 Aplikasi IPCE pada DSSC	.14
BAB 3 METODA PENELITIAN	17
3.1 Alat dan Bahan	18
3.2 Sintesis Fotoanoda	18
3.3 Perakitan DSSC	21
3.4 Karakterisasi	23
3.5 Pengujian DSSC	25
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Karakterisasi Material Fotoanoda DSSC	27
4.2 Karakterisasi Material Fotoanoda Struktur Lapis	34
4.3 Performansi DSSC	50
4.4 Pembahasan	60
BAB 5 KESIMPULAN	63
DAFTAR PUSTAKA	65

LAMPIRAN A	71
LAMPIRAN B	73
LAMPIRAN C	75
LAMPIRAN D	77
LAMPIRAN E	79
LAMPIRAN F	81
LAMPIRAN G	83
LAMPIRAN H	85
LAMPIRAN I	87
LAMPIRAN J	89
BIOGRAFI PENULIS	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	a) Skema komponen penyusun DSSC (Grätzel & Durrant, 2003)	5
Gambar 2.2	Ilustrasi (a) proses pembentukan Au@TiO ₂ <i>hollow sub-microspheres</i> dan (b) proses pemisahan muatan dalam DSSC dengan fotoanoda dari Au@TiO ₂ <i>hollow sub-microspheres</i> (Du et al., 2012).	8
Gambar 2.3	Diagram skematik (a) efek reflektif pada curved silicate microsheet, (b) hamburan pada planar <i>silicate microsheet</i> (Wang dkk., 2015).	9
Gambar 2.4	Skema konfigurasi fotoanoda DSSC berbasis TiO ₂ -Au dengan efek LSPR dari AuNPs, dan proses transfernya (Li dkk., 2013).	11
Gambar 2.5	(a) spektra absorbansi dari TiO ₂ , dye/TiO ₂ , dan dye/Au-TiO ₂ . (b) kurva J-V untuk normal DSSC dan Plamonik DSSC (Shah dkk., 2016).	12
Gambar 2.6	Skema penyerapan foton (a) tanpa mesopori SiO ₂ , (b) dengan mesopori SiO ₂ (Tanvi dkk., 2016).	13
Gambar 2.7	Spektra UV-Vis SiO ₂ , TiO ₂ dan SiO ₂ @TiO ₂ (Son dkk., 2013).	14
Gambar 2.8	Grafik IPCE untuk DSSC normal, TiO ₂ /SiO ₂ @TiO ₂ , TiO ₂ /SiO ₂ @TiO ₂ @AuNP, dan TiO ₂ @SiO ₂ @AuNP@TiO ₂ sebagai fotoanoda (Jang dkk., 2014).	15
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.	17
Gambar 3.2	Fotoanoda struktur Au-SiO ₂ <i>curved microsheet</i> .	20
Gambar 3.3	Fotoanoda struktur Au@TiO ₂ <i>core-shell</i> dengan SiO ₂ <i>curved microsheet</i> .	21
Gambar 3.4	Pelapisan pasta fotoanoda pada kaca FTO dengan metode <i>doctor-blade</i>	23
Gambar 3.5	Penentuan <i>optical bandgap</i> .	24

Gambar 3.6	Kurva I - V dari sel surya ideal.	25
Gambar 4.1	XRD TiO ₂ dari P25 komersil dan TiO ₂ dengan prekursor TiCl ₃	27
Gambar 4.2	Hasil FTIR Spectra untuk TiO ₂ dari P25 komersil dan TiO ₂ dengan prekursor TiCl ₃	28
Gambar 4.3	Hasil XRD pada SiO ₂ glass sphere dan SiO ₂ prekursor TEOS	29
Gambar 4.4	Distribusi ukuran partikel SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi molar katalis dan SiO ₂ <i>Glass sphere</i> .	30
Gambar 4.5	Hasil SEM (a.) SiO ₂ TEOS penambahan katalis 0.05mM (b.) SiO ₂ TEOS penambahan katalis 5mM, (c.) SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	30
Gambar 4.6	Hasil FTIR spectra SiO ₂ <i>glass sphere</i> dan SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi katalis.	31
Gambar 4.7	Hasil UV-Vis dari SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi katalis dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	32
Gambar 4.8	Tauc plot dari SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi katalis dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	33
Gambar 4.9	Hasil XRD Au-SiO ₂ TEOS dengan variasi ukuran silika dan Au-SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	34
Gambar 4.10	Hasil FTIR spectra Au-SiO ₂ TEOS dengan variasi ukuran dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	35
Gambar 4.11	Hasil SEM material fotoanoda Au-SiO ₂ <i>microsheet</i> (a) variasi volume Au 30ml (b) variasi volume Au 60ml.	36
Gambar 4.12	Hasil PSA untuk Au-SiO ₂ prekursor TEOS dan Au-SiO ₂ <i>Glass Sphere</i> (a) Variasi volume Au 30ml dan (b) Variasi volume Au 60ml.	37
Gambar 4.13	Hasil uji Raman pada fotoanoda Au-SiO ₂ <i>microsheet</i> dengan variasi jenis silika.	39
Gambar 4.14	Spektra photoluminescence (PL) material Au-SiO ₂ <i>microsheet</i> variasi silika (a) TEOS dan (b) GS.	40

Gambar 4.15	Pola XRD Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS dengan variasi ukuran SiO ₂ TEOS dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	42
Gambar 4.16	Hasil FTIR spectra Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS dengan variasi ukuran SiO ₂ TEOS dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	43
Gambar 4.17	Hasil SEM material fotoanoda Au@TiO ₂ -SiO ₂ <i>microsheet</i> (a) variasi volume Au 30ml (b) variasi volume Au 60ml.	43
Gambar 4.18	Hasil uji Raman pada fotoanoda Au@TiO ₂ -SiO ₂ <i>microsheet</i> dengan variasi jenis silika.	44
Gambar 4.19	Spektra photoluminescence (PL) untuk material Au@TiO ₂ -SiO ₂ <i>microsheet</i> variasi silika (a) TEOS dan (b) GS.	45
Gambar 4.20	Hasil UV-Vis dari Au-SiO ₂ dengan variasi silika.	46
Gambar 4.21	Hasil UV-Vis dari Au@TiO ₂ -SiO ₂ dengan variasi silika.	47
Gambar 4.22	Hasil UV-Vis material fotoanoda variasi struktur lapis dengan penambahan volume Au 60ml.	48
Gambar 4.23	Hasil Tauc Plot (a) Au-SiO ₂ variasi ukuran TEOS dan GS, (b) Au@TiO ₂ -SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi ukuran silika.	49
Gambar 4.24	Hasil IPCE fotoanoda dasar TiO ₂ dan SiO ₂ variasi TEOS dan GS.	50
Gambar 4.25	Hasil IPCE modifikasi fotoanoda struktur Au-SiO ₂ <i>glass sphere</i> untuk variasi volume Au.	51
Gambar 4.26	Hasil IPCE DSSC dengan modifikasi struktur fotoanoda (a) Au-SiO ₂ dan (b) Au@TiO ₂ -SiO ₂ .	53
Gambar 4.27	Hasil IPCE DSSC dengan variasi struktur lapisan pada Fotoanoda dasar P25 Degussa.	54
Gambar 4.28	Rapat arus – tegangan (Jsc-Voc) dengan fotoanoda variasi Silika TEOS dan <i>glass sphere</i> .	55
Gambar 4.29	Rapat arus – tegangan (Jsc-Voc) dengan fotoanoda TiO ₂ /Au-SiO ₂ TEOS variasi penambahan katalis.	56

Gambar 4.30	Rapat arus – tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $TiO_2/Au-SiO_2$ <i>glass sphere</i> variasi volume Au.	57
Gambar 4.31	Rapat arus - tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ TEOS dan $TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ <i>glass sphere</i> .	58
Gambar 4.32	Rapat arus - tegangan (J_{sc} - V_{oc}) variasi lapisan dengan fotoanoda dasar P25 Degussa.	59
Gambar A	Diagram skematik pengujian XRD (b) XRD Philips X'pert MPD	71
Gambar B	Skema pengujian FT-IR spectrometer	73
Gambar C	Diagram skematik pengujian UV-Vis spectrophotometer	75
Gambar D	Malvern Zetasizer	76
Gambar F-1	Rayleigh, Stokes, dan Anti-Stokes pada Raman	81
Gambar F-2	Skema Raman Spektroskopi	82
Gambar G-1	Prinsip kerja Photoluminescence Spektroscopy	83
Gambar G-2	Blok Diagram Photoluminescence Spektroscopy	84
Gambar H	Perancangan komponen solar simulator Pengujian IPCE (a) Skema pengujian (b) Set up alat pengujian di Laboratorium Fotonika	85
Gambar I-1	Perancangan komponen solar simulator di ITB	87
Gambar I-2	Rangkaian ekuivalensi sel surya	87
Gambar J-1	Skema hamburan cahaya pada DSSC dengan modifikasi struktur fotoanoda.	89
Gambar J-2	Skema hamburan cahaya pada modifikasi struktur fotoanoda (a) $Au-SiO_2$ <i>microsheet</i> dan (b) $Au@TiO_2-SiO_2$ <i>microsheet</i> .	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Modifikasi struktur fotoanoda terhadap efisiensi DSSC	7
Tabel 3.1	Sampel berdasarkan variasi struktur fotoanoda pada DSSC	22
Tabel 4.1	Lebar celah optik dan energi urbach plot dari SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi katalis dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	32
Tabel 4.2	Ukuran fotoanoda Au-SiO ₂ prekursor TEOS dan Au-SiO ₂ Glass Sphere dengan variasi Au 30ml dan 60ml.	36
Tabel 4.3	Lebar celah optik dan energi urbach plot dari SiO ₂ prekursor TEOS dengan variasi katalis dan SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	48
Tabel 4.4	Performansi DSSC fotoanoda dasar TiO ₂ , TiO ₂ /SiO ₂ TEOS variasi penambahan katalis dan TiO ₂ /SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	54
Tabel 4.5	Performansi DSSC fotoanoda TiO ₂ /Au-SiO ₂ TEOS variasi penambahan katalis.	55
Tabel 4.6	Performansi DSSC dengan fotoanoda TiO ₂ /Au- <i>glass sphere</i> variasi volume Au	56
Tabel 4.7	Performansi DSSC dengan fotoanoda TiO ₂ /Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS dan TiO ₂ /Au@TiO ₂ -SiO ₂ <i>glass sphere</i> .	57
Tabel 4.8	Performansi DSSC dengan variasi lapisan dengan fotoanoda dasar TiO ₂ komersil P25 Degussa.	59
Tabel 4.9	Ukuran SiO ₂ pada penambahan modifikasi fotoanoda.	61

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

DSSC (*Dye-sensitized solar cells*) pertama kali diperkenalkan oleh O'Regan dan Grätzel pada tahun 1991 dengan struktur *sandwich*. Struktur tersebut terdiri dari mesopori lapisan TiO_2 yang tertutupi oleh monolayer molekul zat warna, elektrolit redoks, dan elektroda kerja. Sel surya jenis ini telah menarik perhatian dalam penelitian konversi fotolistrik karena efisiensi yang cukup tinggi, biaya rendah dan kemudahan fabrikasi. Untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi konversi fotolistrik dari DSSC, telah banyak dikembangkan fabrikasi dengan modifikasi fotoanoda nano struktur TiO_2 (Bai dkk., 2014).

Upaya peningkatan efisiensi DSSC dilakukan melalui pemanenan cahaya atau dengan meminimalisir terjadinya rekombinasi. Berbagai pendekatan seperti peningkatan absorbansi yaitu melalui penambahan partikel SiO_2 yang berperan sebagai material penghambur yang baik, diketahui mampu meningkatkan pemanenan cahaya dan menghambat rekombinasi (Tanvi dkk., 2016). Wang et al., menawarkan strategi baru melalui penambahan silika *microsheet* struktur *planar* dan *curved* pada semikonduktor TiO_2 . Strategi ini menghasilkan peningkatan intensitas cahaya yang menembus substrat kaca FTO dan meningkatkan intensitas penyerapan cahaya oleh molekul pewarna. Pencapaian efisiensi yang diperoleh adalah 7,51% untuk struktur *planar microsheet* dan 9,22% untuk struktur *curved microsheet* (Wang dkk., 2015).

Silika *microsheet* dapat dibuat melalui berbagai jenis silika seperti silika komersil berupa silika gel dan *glass sphere*, adapun jenis silika lain yang dihasilkan dari prekursor TEOS (*tetraethylorthosilicate*) dan silika lumpur. Silika dengan prekursor TEOS memiliki keunggulan dibandingkan dengan jenis silika lainnya dalam kemudahan pembentukan material karena TEOS merupakan logam alkoksida yang dapat mempermudah kondisi reaksi (Bandyopadhyay dkk., 2006). Hal ini akan menguntungkan dalam proses pembuatan silika *microsheet* karena ukuran dan bentuk material silika dapat ditentukan. Ukuran partikel fotoanoda perlu dioptimalkan karena akan berdampak pada kemampuan penyerapan

pewarna. Salah satu metode untuk mengontrol ukuran silika adalah melalui penambahan katalis. Ukuran silika akan meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi katalis yang digunakan.

Modifikasi fotoanoda juga dapat dilakukan dengan penambahan logam mulia seperti perak (Ag) dan emas (Au) sebagai material plasmonik. Melalui penambahan logam mulia, pemanenan energi cahaya tampak meningkat akibat efek plasmonik dan meningkatkan pemisahan muatan sebagai penyimpanan elektron (Dong dkk., 2014). Nanopartikel Au pada nanostruktur *core-shell* $\text{SiO}_2\text{@Au@TiO}_2$ memberikan efek LSPR (*surface plasmon resonance*) sehingga sampel dapat menyerap cahaya tampak lebih kuat dibandingkan tanpa penambahan material plasmonik (Ye dkk., 2013).

Penelitian terdahulu (Bai dkk., 2014., Tanvi dkk., 2016., Wang dkk., 2015., Dong dkk., 2014., dan Ye dkk., 2013) telah menunjukkan peningkatan efisiensi DSSC melalui modifikasi fotoanoda. Berdasarkan dari penelitian tersebut, penambahan SiO_2 struktur *microsheet* sebagai material penghambur dan Au sebagai material plasmonik diharapkan mampu meningkatkan efisiensi DSSC. Peningkatan efisiensi yang dihasilkan disebabkan oleh kemampuan absorpsi yang tinggi akibat efek hamburan dan efek plasmoniknya sekaligus.

Penelitian ini akan dilakukan fabrikasi DSSC dengan fotoanoda dasar TiO_2 sintesis dan TiO_2 P-25 Degussa komersil. Selain itu, akan dilakukan modifikasi fotoanoda struktur lapis Au- SiO_2 *microsheet* dan *core-shell* $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$ *microsheet*. Partikel SiO_2 dihasilkan dari prekursor TEOS dan pewarna yang digunakan adalah N-719. Penambahan struktur *silicate microsheet* dan nanopartikel Au pada fotoanoda TiO_2 diharapkan dapat meningkatkan efisiensi DSSC akibat adanya efek hamburan dan efek LSPR.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan paparan latar belakang diatas, maka dapat diambil rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Bagaimana karakteristik material fotoanoda Au- SiO_2 *microsheet* dan $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$ *microsheet*?

- b. Bagaimana pengaruh *silicate microsheet* pada fotoanoda struktur lapis terhadap efisiensi DSSC?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan beberapa rumusan masalah diatas, tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

- a. Didapatkan analisa hasil karakteristik material fotoanoda Au-SiO₂ *microsheet* dan Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet*.
- b. Didapatkan analisa pengaruh *silicate microsheet* pada fotoanoda struktur lapis terhadap efisiensi DSSC.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang yang telah disebutkan, terdapat batasan masalah dari penelitian ini yaitu:

- a. Bahan semikonduktor yang digunakan sebagai fotoanoda dasar adalah nanopartikel TiO₂ dari prekursor TiCl₃ dan TiO₂ komersil P25 *degussa*.
- b. Prekursor yang digunakan dalam sintesis silika adalah *Tetraethyl Orthosilicate* (TEOS).
- c. Dye yang digunakan adalah N-719 produksi dari Sigma Aldrich.
- d. Kaca konduktif yang digunakan adalah kaca FTO.
- e. Teknik pendeposisian pasta TiO₂ pada kaca konduktif dilakukan menggunakan teknik *doctor blade*. Tidak dilakukan variasi teknik, ketebalan, dan luas permukaan TiO₂.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

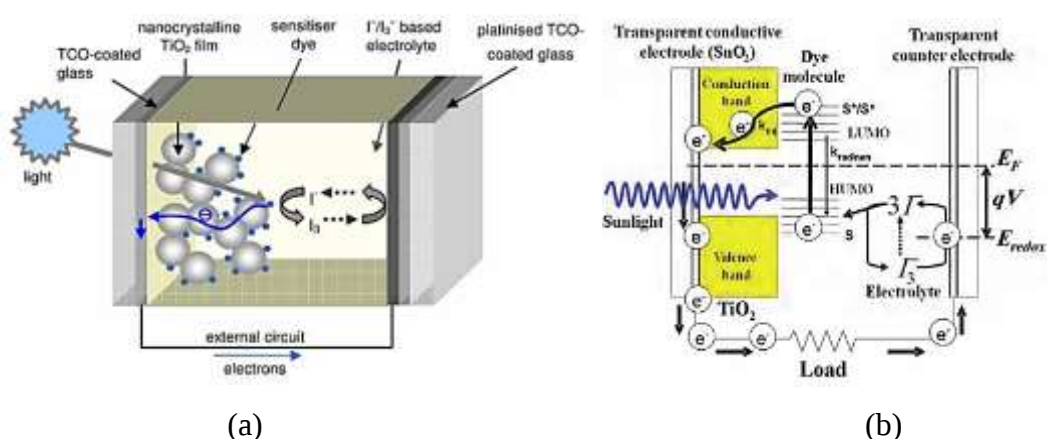
BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Modifikasi Fotoanoda DSSC

Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) adalah jenis solar sel generasi ketiga dengan biaya produksi paling murah dalam mengkonversi energi. DSSC dibuat dengan susunan *sandwich* yang terdiri dari fotoanoda yang dilingkupi oleh molekul pewarna, elektrolit dan elektoda lawan (O'Regan & Grätzel, 1999). Pada dasarnya, terdapat 4 komponen utama yang memainkan peran penting dalam DSSC yaitu termasuk sumber cahaya, semikonduktor, sensitizer dan elektrolit yang ditunjukkan pada gambar 2.1 a.

Setiap komponen pada DSSC memiliki peranannya masing-masing yaitu TiO_2 yang merupakan salah satu material semikonduktor sebagai kolektor elektron pada DSSC. TiO_2 telah banyak digunakan sebagai fotoanoda karena sifatnya yang stabil, murah, dan tidak beracun. Fotosensitizer pewarna berfungsi untuk menyerap foton (Narayan, 2012). Elektrolit yaitu pasangan redoks iodide/triiodide bertindak sebagai perantara antara fotoelektroda TiO_2 dan elektroda lawan (Wu dkk., 2008). Elektroda lawan berfungsi untuk mentransfer elektron yang tiba dari sirkuit eksternal dan kembali ke elektrolit redoks (Grätzel, 2003).



Gambar 2.1 a) Skema komponen penyusun DSSC (Grätzel & Durrant, 2003).

b) Ilustrasi prinsip kerja DSSC (Jasim, 2011).

Prinsip kerja pada DSSC dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1 b. Tahapan kinerja DSSC berawal dari foton yang mengenai elektroda kerja pada DSSC. Sensitizer akan menyerap foton dan terjadi eksitasi elektron (S^*) pada molekul *dye* dari level *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) ke LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) yang disebut dengan fotoeksitasi. Selanjutnya elektron akan terinjeksi menuju pita konduksi semikonduktor TiO_2 yang kemudian mencapai substrat kaca TCO (pada tahap ini, molekul *dye* teroksidasi). Elektrolit (I^-) akan memberikan elektron pada molekul *dye* yang teroksidasi dan molekul *dye* kembali pada keadaan awal. Elektron yang tereksitasi bergerak ke elektroda kerja dan mengalir menuju rangkaian eksternal. Elektron ditransfer ke elektrolit pada katoda. Ion I^{3-} akan mencapai katoda untuk mengganti elektron yang hilang dari elektroda lawan.

Ditinjau dari prinsip kerja, fotoanoda merupakan komponen penting dalam fabrikasi DSSC mengingat fungsinya sebagai kolektor elektron. Oleh karena itu bentuk dan ukuran harus dipilih dengan cermat dan dioptimalkan dibandingkan dengan komponen yang lain. Berikut karakteristik fotoanoda ideal untuk dapat meningkatkan efisiensi DSSC :

- Fotoanoda harus memiliki area permukaan yang luas untuk meningkatkan kapasitas penyerapan pewarna.
- Fotoanoda harus memfasilitasi transfer elektron yang cepat dari pewarna ke sirkuit eksternal dan injeksi elektron cepat dari pewarna.
- Fotoanoda harus memiliki ketahanan yang tinggi terhadap korosi.
- Fotoanoda harus memiliki kemampuan untuk menyerap/menyebarakan sinar matahari untuk meningkatkan fungsi kerja pewarna.
- Fotoanoda harus menjadi akseptor elektron yang baik.
- Fotoanoda harus memiliki kontak antarmuka optimal dengan molekul pewarna dan dengan lapisan konduktif pada substrat.

Berdasarkan dari karakteristik fotoanoda ideal yang telah disebutkan, perlu adanya strategi dalam pemilihan bahan dan struktur fotoanoda. Hal ini akan sangat berpengaruh terhadap karakteristik tegangan arus, kerapatan arus foto yang dihasilkan (J_{sc}), serta hamburan dan penyerapan cahaya pada DSSC (Ahmad dkk., 2017). Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan

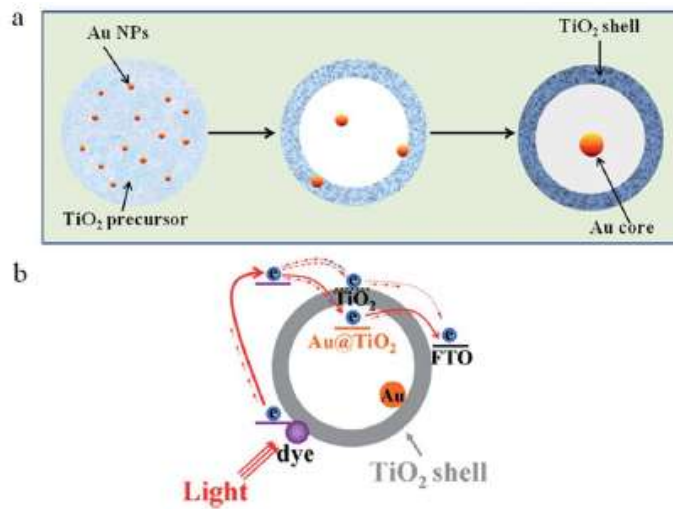
performansi dan efisiensi DSSC, diantaranya menggunakan modifikasi struktur seperti *core-shell* dan *microsheet* yang dirangkum pada tabel 2.1. Melalui penambahan modifikasi struktur fotoanoda diketahui mampu meningkatkan efisiensi DSSC dibandingkan dengan hanya fotoanoda TiO₂ murni.

Tabel 2.1. Modifikasi struktur fotoanoda terhadap efisiensi DSSC

Tahun	Penulis	Struktur Fotoanoda	Efisiensi DSSC
2003	Grätzel	TiO ₂ murni	6,51%
2014	Bai, dkk.	<i>core-shell</i> TiO ₂ /AuNR@SiO ₂	7,21%
2015	Falahatdoost	<i>core-shell</i> TiO ₂ /SiO ₂ @TiO ₂	7,98%
2015	Wang, dkk.	TiO ₂ /SiO ₂ planar <i>microsheet</i>	7,51%
		TiO ₂ /SiO ₂ curved <i>microsheet</i>	9,22%

2.1.1 Struktur *Core-shell*

Struktur *core-shell* terdiri dari inti (*core*) yang terbuat dari bahan nano dan *shell* yang menutupi permukaan inti. *Shell* berperan sebagai penghalang fisik antara *core* dengan medium sekitarnya, sehingga struktur ini tidak terlalu terpengaruh dengan perubahan lingkungan, permukaan kimia, dan foto-oksidasi (gambar 2.2a). Untuk membangun penghalang energi pada antarmuka semikonduktor dan elektrolit, pita konduksi dari *shell* harus lebih negatif dibandingkan dengan intinya. Sehingga transfer muatan antarmuka meningkat dan rekombinasi dapat ditekan (Pandikumar, dkk., 2016). Fotoanoda TiO₂ memiliki ukuran partikel skala nano yang berdampak pada rekombinasi antarmuka akibat dari permukaan internal yang luas dan pembelokan yang terbatas. Struktur *core-shell* digunakan sebagai modifikasi fotoanoda DSSC untuk menekan proses rekombinasi antarmuka (Zhang, 2011).



Gambar 2.2 Ilustrasi (a) proses pembentukan Au@TiO₂ hollow sub-microspheres dan (b) proses pemisahan muatan dalam DSSC dengan fotoanoda dari Au@TiO₂ hollow sub-microspheres (Du et al., 2012).

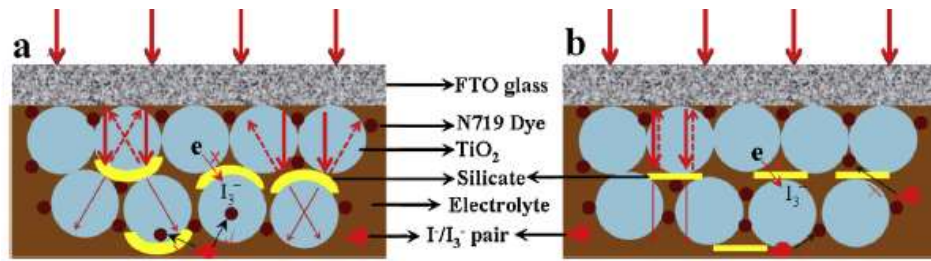
Proses transfer elektron yang terjadi dalam *core-shell* Au@TiO₂ hollow sub-microspheres ditunjukkan pada Gambar 2.2(b). Pertama, tingkat Fermi dari Au@TiO₂ hollow sub-microspheres terbentuk karena elektron dalam sub-microsphere dipindahkan untuk mencapai keadaan yang stabil. Selama proses iluminasi, elektron pada pewarna N719 tereksitasi kemudian mengalir ke pita konduksi nanopartikel TiO₂. Kemudian tingkat Fermi dari sub-mikrosfer Au@TiO₂ bergerak menuju ke energi yang lebih rendah. Hal ini mengakibatkan penghalang *schottky* Au@TiO₂ hollow sub-microspheres meningkat sehingga dapat mencegah transfer elektron yang kembali ke pewarna maupun elektrolit. Rendahnya tingkat rekombinasi elektron ini akan meningkatkan kinerja DSSC (Du dkk., 2012). Penelitian yang dilakukan oleh Du et al., ini memiliki efisiensi konversi daya sebesar 8.13%.

2.1.2 Struktur Microsheet

Struktur *silicate microsheet* mampu menambah efisiensi DSSC dengan menghambat rekombinasi elektron dan meningkatkan kerapatan elektron pada pita konduksi TiO₂. Struktur ini memiliki efek reflektansi dengan meningkatkan intensitas cahaya yang menembus kaca FTO serta meningkatkan intensitas cahaya yang diserap molekul pewarna. Pada Gambar 2.3a menunjukkan dua peristiwa

pada struktur *curved microsheet* TiO₂/silicate untuk setiap berkas cahaya yang masuk, yaitu reflektansi dan penetrasi (Wang dkk., 2015).

Berkas cahaya yang dipantulkan akan berpengaruh pada reaksi eksitasi dari pewarna (N719) di dekat lapisan FTO, sedangkan berkas cahaya yang menembus kaca akan mengarah ke molekul pewarna dibawahnya. Stuktur *planar silicate microsheet* memiliki efek hamburan terhadap cahaya tampak dan dapat menghambat rekombinasi elektron yang ditunjukkan dengan gambar 2.3b, meskipun cahaya yang dipantulkan memiliki jalur yang lebih pendek dibandingkan dengan *curved silicate microsheet* (Wang dkk., 2015).



Gambar 2.3 Diagram skematik (a) efek reflektif pada *curved silicate microsheet*, (b) hamburan pada *planar silicate microsheet* (Wang dkk., 2015).

Untuk mengetahui potensi peningkatan transmisi pada fotoanoda digunakan teori Fresnel seperti pada persamaan (2.1)

$$n = \sqrt{n_o n_s} \quad (2.1)$$

dimana,

n = indeks bias *silicate microsheet*

n_o = indeks bias elektrolit cair di udara

n_s = indeks bias TiO₂

Persamaan (2.1) merupakan prasyarat untuk menyesuaikan indeks bias dalam fabrikasi *antireflective film* untuk meningkatkan transmisi. n_o di udara atau elektrolit adalah 1, karena itu n harus sesuai dengan akar kuadrat n_s . Indeks bias *silicate microsheet* yang sebagian besar terdiri dari SiO₂ adalah sekitar 1,50 dan indeks bias TiO₂ anatase adalah 2,55. Karena itu ada kesesuaian antara nilai n dan $\sqrt{n_o n_s}$ (Wang et al., 2015).

Persamaan dispersi optik TiO₂ sesuai dengan persamaan (2.2), sedangkan persamaan dispersi optik SiO₂ ditampilkan pada persamaan (2.3).

$$n_s^2 = 5,913 + \frac{0,2441}{\lambda^2 - 0,803} \quad (2.2)$$

$$n^2 = 1,286 + \frac{1,0704\lambda^2}{\lambda^2 - 0,01} + \frac{1,102\lambda^2}{\lambda^2 - 100} \quad (2.3)$$

Dari persamaan (2.1) diketahui bahwa indeks bias SiO₂ yang paling sesuai adalah 1,59 dengan asumsi indeks bias elektrolit adalah 1.

Penelitian Wang dkk. menunjukkan efisiensi yang signifikan pada penggunaan variasi struktur *planar* dan *curved silicate microsheet* masing-masing adalah sebesar 7,51% dan 9,22% dibandingkan dengan TiO₂ murni tanpa modifikasi yaitu 6,51%. Spektrum transmisi TiO₂/*curved silicate* menunjukkan peningkatan dibandingkan hanya dengan TiO₂ murni. Hal ini dikarenakan intensitas cahaya yang diserap oleh molekul pewarna meningkat akibat adanya efek reflektansi dari *curved silicate microsheet*.

2.2 Pengaruh Modifikasi Fotoanoda Terhadap Absorbansi

Modifikasi fotoanoda dapat meningkatkan absorbansi terhadap panjang gelombang tampak, baik dengan penambahan partikel plasmonik maupun material penghambur. Kedua material tersebut memiliki karakteristik yang mampu meningkatkan efisiensi DSSC dibandingkan dengan fotoanoda konvensional. Hal ini dikarenakan efek *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) dan efek *scattering* yang dibawa oleh masing-masing material Au (material plasmonik) dan SiO₂ (material penghambur).

2.2.1 Efek LSPR Oleh Material Au

Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) merupakan suatu fenomena optik yang disebabkan oleh plasmon yang berosilasi lokal di sekitar nanopartikel dengan frekuensi tertentu. Sebagai akibat adanya interaksi cahaya tampak dengan partikel yang berukuran lebih kecil dari panjang gelombang cahaya yang masuk. Fenomena ini merupakan hasil dari interaksi antara cahaya

masuk dengan awan elektron dalam pita konduksi. Interaksi ini menghasilkan osilasi plasmon lokal yang koheren dengan frekuensi resonansi yang sangat bergantung pada komposisi, ukuran, geometri, lingkungan dielektrik dan jarak permisahan partikel-partikel dari nanopartikel. Bahan yang umum digunakan untuk produksi nanopartikel adalah logam mulia seperti Ag dan Au, hal ini berkaitan dengan level energi dari transisi d-d yang menunjukkan LSPR dalam rentang spektrum cahaya tampak. Interaksi nanopartikel dengan cahaya memungkinkan sebagian foton akan diserap dan sebagian akan dihamburkan (Willems & Duyne, 2007).

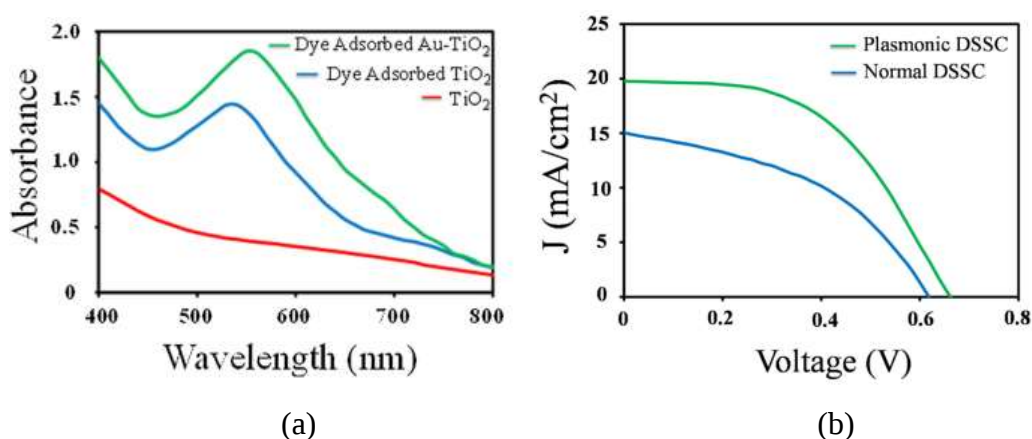
Pada struktur nano-logam mulia, peluruhan non-radiatif dapat terjadi melalui *intraband excitations* dalam pita konduksi atau melalui *interband excitations* yang dihasilkan dari transisi antara pita-pita lainnya (misalnya, d band) dan pita konduksi. Sifat LSPR dari nanopartikel Au menyebabkan fotoanoda dengan TiO_2 -Au berperan dalam menambah pemanenan cahaya tampak, injeksi elektron dan mempercepat transfer elektron (Pandikumar dkk., 2016).



Gambar 2.4 Skema konfigurasi fotoanoda DSSC berbasis TiO_2 -Au dengan efek LSPR dari AuNPs, dan proses transfernya (Li dkk., 2013).

Pada gambar 2.4 merupakan skema konfigurasi fotoanoda DSSC berbasis TiO_2 -Au dengan efek LSPR dari AuNP. Ilustrasi tersebut menunjukkan elektroda

kerja pada DSSC terdiri dari pewarna organik logam bebas dan *redox electrolyte* khas *iodida/triiodide*. Penyerapan oleh pewarna *plasma-induced* seperti pada fotoanoda $\text{TiO}_2\text{-Au}$ menunjukkan level *tunable quasi-Fermi* lebih berpotensi negatif dengan mengendalikan rasio massa Au dan TiO_2 (Li dkk., 2013).



Gambar 2.5 (a) spektra absorbansi dari TiO_2 , dye/ TiO_2 , dan dye/Au- TiO_2 . (b) kurva J-V untuk normal DSSC dan Plamonik DSSC (Shah dkk., 2016).

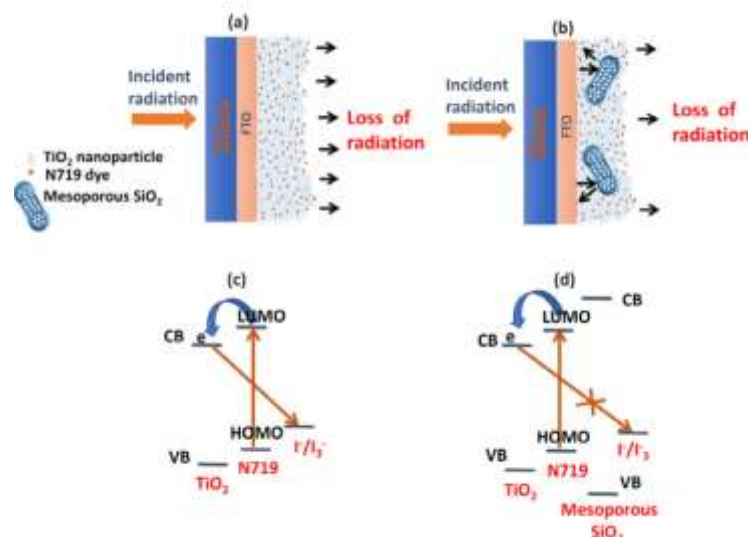
Peningkatan absorbansi pada DSSC dibuktikan dengan hasil spektra absorbansi (gambar 2.5) yang dilakukan oleh Shah, dkk. Penambahan material nanopartikel Au ke dalam dye- TiO_2 menyebabkan penyerapan pada panjang gelombang 500-600nm. Peningkatan absorbansi DSSC berakibat pada meningkatnya V_{oc} yaitu pada DSSC normal 0,61V kemudian meningkat menjadi 0,67 V ketika Au nanopartikel ditambahkan ke dalam struktur DSSC. Faktor yang paling berpengaruh pada peningkatan tersebut adalah peningkatan *fill factor* (FF). Berdasarkan hasil ini, dapat dikatakan bahwa nanopartikel Au dapat meningkatkan aktivitas optik dye- TiO_2 . Hal ini dimungkinkan adanya efek plasmonik pada Au dan pembentukan kekosongan oksigen di TiO_2 (Shah dkk., 2016).

Medan elektromagnetik lokal yang disebabkan oleh resonansi eksitasi plasmon nanopartikel Au dengan ukuran lebih kecil (< 50) terbukti efektif untuk sebagian kecil molekul pewarna terluar namun tidak berlaku untuk sebagian besar bagian dalam molekul pewarna (Zhang & Wang, 2016). Teori Mie memprediksi

bahwa nanopartikel logam dengan ukuran yang lebih besar ($>50\text{nm}$) memiliki kemampuan hamburan yang signifikan, sedangkan partikel nano yang lebih kecil memiliki kemampuan hamburan yang lemah bahkan cenderung tidak ada (Duche dkk., 2009). Berdasarkan analisis tersebut, kontribusi terbesar dalam kenaikan arus-foto pada penambahan Au ($d>50$) berasal dari hamburan cahaya nanopartikel Au. Hal ini dibuktikan dari penelitian Zhang, bahwa perangkat dengan hamburan cahaya lebih tinggi memiliki efek penyerapan foton yang lebih banyak. Seiring bertambahnya ukuran partikel Au menyebabkan peningkatan penyerapan cahaya karena efek hamburan cahaya lapisan Au.

2.2.2 Efek *Scattering* Oleh Material SiO_2

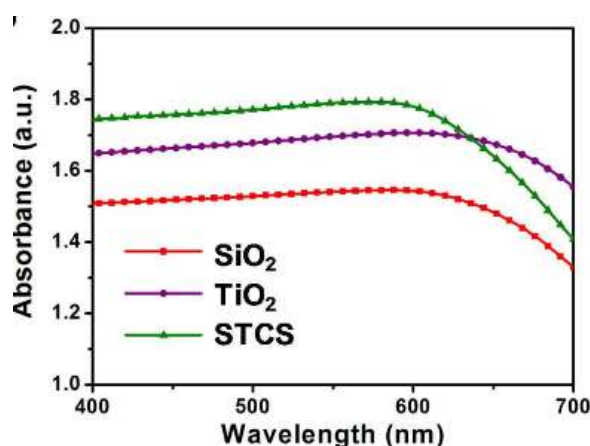
Efek hamburan (*scattering*) cahaya yang kuat sebagian besar tergantung pada ukuran partikel dan perbedaan indeks bias antara lapisan aktif dan lapisan penghambur. Berdasarkan dari teori *Mie Scattering*, partikel dengan ukuran sebanding dengan panjang gelombang merupakan partikel penghambur yang efektif. Teori ini mengindikasikan bahwa semakin besar perbedaan indeks bias antara partikel penghambur dan media sekeliling akan memperbesar hamburan cahaya. Peningkatan hamburan cahaya pada fotoanoda tersebut dapat memperpanjang jalan cahaya (Falahatdoost dkk., 2015).



Gambar 2.6 Skema penyerapan foton (a) tanpa mesopori SiO_2 , (b) dengan mesopori SiO_2 (Tanvi dkk., 2016).

Material penghambur dapat meningkatkan penyerapan cahaya seperti pada Gambar 2.6 yang menunjukkan perbandingan penyerapan foton dengan dan tanpa SiO_2 . Peningkatan absorbansi melalui penggabungan SiO_2 disebabkan oleh peningkatan pemanenan cahaya akibat adanya sifat hamburan cahaya. Hal ini menunjukkan kemampuan material SiO_2 yang dapat dimanfaatkan sebagai penghambur yang efisien dalam fabrikasi DSSC (Tanvi dkk., 2016).

Perbedaan indeks bias yang besar antara TiO_2 (2,56) dan SiO_2 (1,46) akan memberikan efek hamburan cahaya. Efisiensi konversi daya DSSC juga meningkat 50% akibat adanya partikel penghambur (Wang, dkk. 2013). Gambar 2.6 menunjukkan skema hamburan cahaya pada TiO_2 dan $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$. Cahaya pada $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ yang dibiaskan akan melewati jalur pantulan internal karena adanya perbedaan indeks bias sehingga jalur cahaya lebih panjang dibandingkan dengan TiO_2 saja. Hal ini terjadi akibat perbedaan indeks bias pada struktur $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ sehingga memberikan efek hamburan yang kuat. Hamburan cahaya yang kuat inilah yang akan mempengaruhi peningkatan penyerapan cahaya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. (Son dkk., 2013)



Gambar 2.7 Spektra UV-Vis SiO_2 , TiO_2 dan $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$ (Son dkk., 2013).

2.3 Aplikasi IPCE pada DSSC

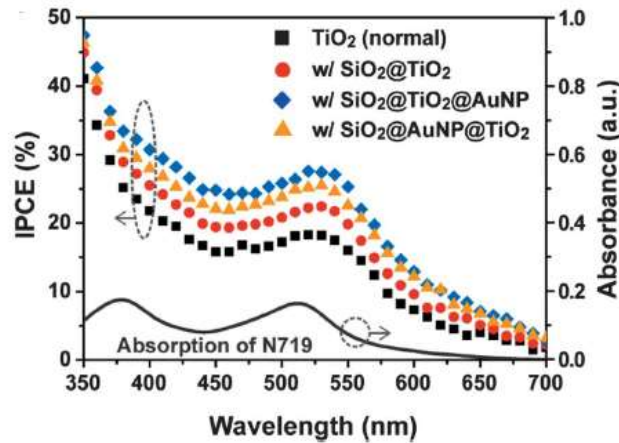
Incident Photon to Current Conversion Efficiency (IPCE) digunakan untuk menentukan efisiensi konversi cahaya pada DSSC. IPCE digunakan sebagai parameter untuk mengukur seberapa efektifitas DSSC dalam mengkonversi foton menjadi arus. Pengukuran eksperimental *Incident photon to current efficiency*

(IPCE) didapatkan dari keterbatasan dan jangkauan penggunaan model dengan mengukur spektral respon sel yang berisi informasi tentang efisiensi kuantum (Gentilini dkk., 2010).

IPCE memberikan rasio antara hasil generasi arus yang dikonversikan elektron pada DSSC dengan banyaknya foton yang mengenai luasan aktif pada panjang gelombang tertentu. 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, semikonduktor yang tidak dapat menyerap pewarna secara sempurna, rekombinasi elektron pada semikonduktor dan sebagainya. Untuk menghitung nilai IPCE dapat menggunakan persamaan berikut (Varghese & Grimes, 2008). Untuk menghitung nilai IPCE digunakan persamaan berikut (Varghese & Grimes, 2008):

$$IPCE [\%] = \frac{1240 [eV \cdot nm] \times J_{sc} [\mu A \cdot cm^{-2}]}{\lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W \cdot cm^{-2}]} \quad (2.7)$$

dimana 1240 (eV nm) adalah faktor konversi cahaya ke arus, J_{sc} adalah kerapatan arus $[\mu A \cdot cm^{-2}]$, λ adalah panjang gelombang yang diubah-ubah pada monokromator (nm), dan P_{cahaya} adalah daya yang diukur pada setiap panjang gelombang ($\mu W \cdot cm^{-2}$).



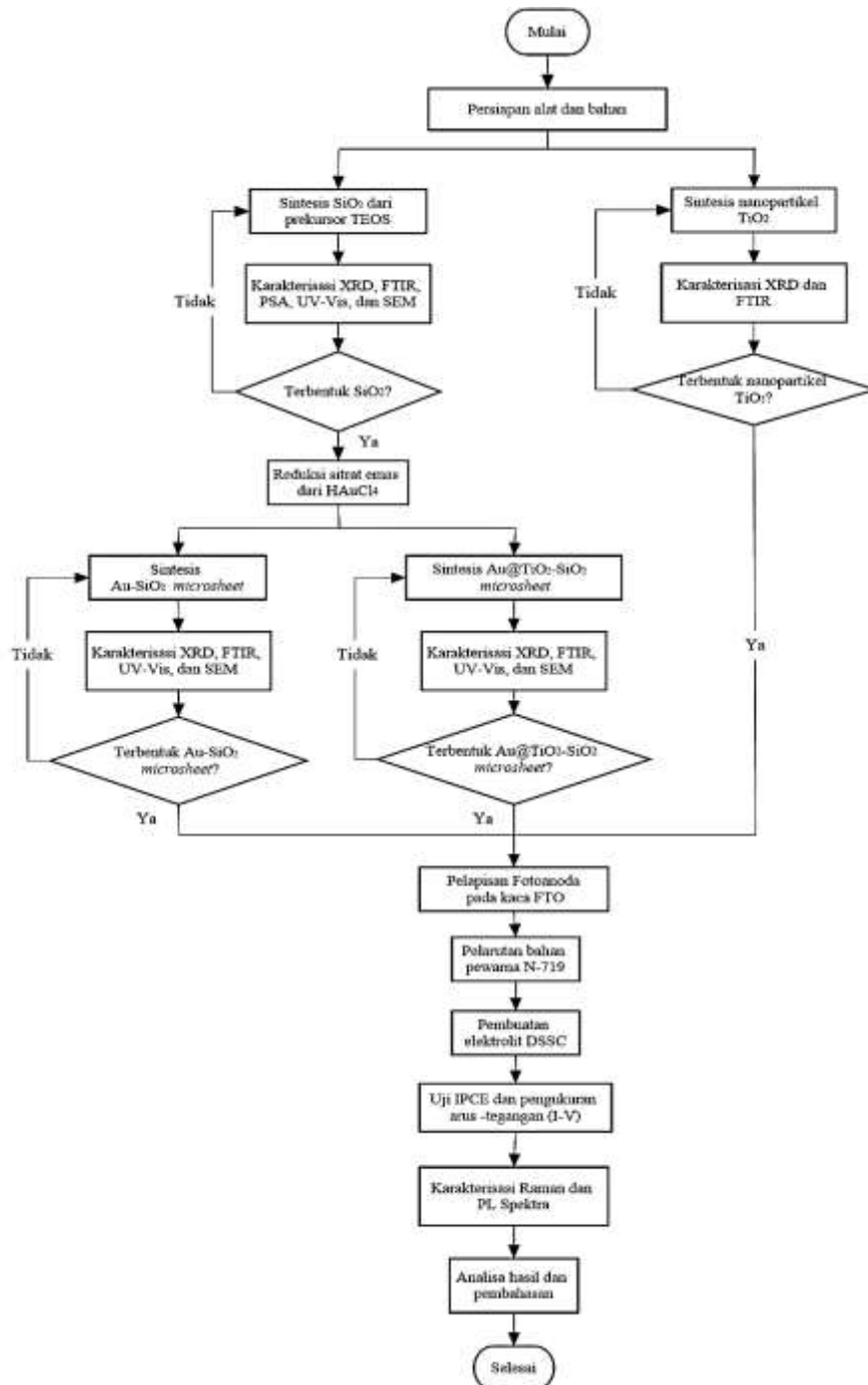
Gambar 2.8 Grafik IPCE untuk DSSC normal, $TiO_2/SiO_2@TiO_2$, $TiO_2/SiO_2@TiO_2@AuNP$, dan $TiO_2@SiO_2@AuNP@TiO_2$ sebagai fotoanoda (Jang dkk., 2014).

Gambar 2.8 menunjukkan IPCE dari panjang gelombang pada rentang 350–700 nm. Berdasarkan dari grafik tersebut dapat diamati bahwa IPCE pada rentang panjang gelombang 400-600 nm meningkat secara signifikan melalui adanya penggabungan nanopartikel SiO₂ dan Au. Spektrum IPCE mengikuti prinsip yang sama seperti UV-VIS, dimana peningkatan efisiensi menunjukkan peningkatan penyerapan foton oleh molekul pewarna terutama di sekitar penyerapan nanopartikel Au. Oleh karena itu peningkatan penyerapan foton dan tingkat rekombinasi *electron-hole* yang rendah meningkatkan *power conversion efficiency* (PCE) pada DSSC (Jang dkk., 2014). Melalui hasil tersebut, pengaruh penambahan material penghambur dan material plasmonik mampu memberikan peningkatan efek kapasitansi kuantum secara efektif pada kinerja DSSC.

BAB 3

METODA PENELITIAN

Keseluruhan tahapan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain gelas beker, gelas ukur, pipet tetes, mortar, *magnetic stirrer*, oven, furnace, pH meter, timbangan digital. Bahan yang digunakan untuk sintesis SiO₂ antara lain, *tetraethyl orthosilicate* (TEOS), HCl, NaOH, NH₄OH, etanol dan aquades. Bahan yang digunakan untuk mensintesis Au-SiO₂ yaitu SiO₂ hasil sintesis dari prekursor TEOS, (3-Aminopropyl) trimethoxysilane, etanol, H₂SO₄, trisodium sitrat serta *deionized water*. Bahan kimia yang digunakan untuk sintesis Au@TiO₂ adalah koloid emas (500ml, 5x10⁻⁴M) H₂SO₄, trisodium sitrat, asam *mercaptoundecanoic*, amonia, HCl, titanium (IV) isopropoxide (TTIP) dan *triethanolamin* (TEOA). Bahan kimia yang digunakan untuk sintesis Au@TiO₂-SiO₂ antara lain Au@TiO₂, SiO₂ hasil sintesis prekursor TEOS, HCL serta EtOH.

Bahan kimia yang digunakan untuk pembuatan pewarna adalah ruthenium N-719 *industry standard dye* dan etanol. Sedangkan bahan kimia yang digunakan untuk pembuatan elektrolit antara lain, kalium iodide (KI), iodide (I), PEG 4000, *chloroform* dan *acetonitrile*. Bahan kimia yang digunakan untuk pembuatan pasta DSSC yaitu aquades, CH₃COOH dan Triton X-100. Bahan yang digunakan untuk fabrikasi DSSC antara lain kaca *Fluorine-doped Tin Oxide* (FTO) dan kaca FTO *Pt-coated*.

3.2 Sintesis Fotoanoda

3.2.1 Sintesis Nanopartikel TiO₂

Nanopartikel TiO₂ disintesis dari prekursor TiCl₃ dengan metode kopresipitasi. 10 ml TiCl₃, 4,7 ml aquades, dan 0,3 ml HCl diaduk selama 3 menit dengan suhu 45°C. Setelah itu, 20 ml HCl 37% ditambahkan kedalam larutan tersebut. Setelah beberapa saat, larutan akan berubah warna menjadi ungu tua kemudian 50 ml NH₄OH 25% ditambahkan kedalam larutan sambil diaduk hingga larutan berwarna ungu kehitaman. Suspensi yang mengandung endapan putih dicuci dengan menggunakan aquades hingga suspensi tidak berbau amonia. Selanjutnya untuk mendapatkan TiO₂ fasa anatase maka endapan putih dikalsinasi pada suhu 400°C selama 5 jam (Castro dkk., 2008).

3.2.2 Sintesis SiO₂ dari prekursor TEOS

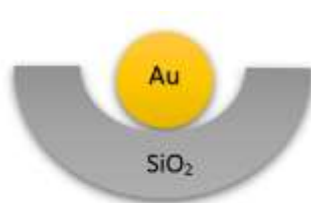
Nanopartikel SiO₂ disintesis menggunakan metode Stöber yang telah dimodifikasi, larutan TEOS sebanyak 29,13 ml, 9,5 ml aquades, 46,4 ml etanol dicampur ke dalam gelas beker. Larutan tersebut diaduk dan dipanaskan pada suhu 50°C dengan menggunakan *magnetic stirrer*. Penambahan amonia dilakukan secara tetes demi tetes sampai habis dalam waktu 5 jam. Larutan yang diperoleh kemudian diendapkan dan dicuci dengan aquades. Setelah mendapatkan endapan yang telah melalui proses pencucian, selanjutnya dikalsinasi pada suhu 600°C dengan waktu tahan selama 3 jam. Serbuk SiO₂ yang telah diperoleh kemudian digerus sampai halus (Bracho dkk., 2012).

3.2.3 Reduksi Nanopartikel Au

Koloid emas (500ml, $5 \times 10^{-4} \text{M}$) $\text{HauCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan trinitrium sitrat digunakan sebagai bahan awal dan pereduksi. Asam mercaptoundecanoic (MUA=1mM) dilarutkan ke dalam 2,5% larutan amonia. Larutan MUA kemudian ditambahkan ke dalam koloid emas dan diinkubasi selama 2 jam. Selanjutnya ditambahkan 1M HCl tetes demi tetes sampai pH sama dengan 3. Emas yang dihasilkan dicuci menggunakan air dengan sentrifugasi 3800 rpm (Kwon dkk., 2007).

3.2.4 Sintesis Au-SiO₂ *microsheet*

Sintesis Au-SiO₂ dilakukan dengan metode kopresipitasi. Sebelum sintesis, larutan APTMS (1mM) dipersiapkan, dimana 18,3 µl APTMS ditambahkan pada gelas ukur 100 ml dan tambahkan DI-water hingga penuh kemudian dapat langsung digunakan. Proses sintesis Au-SiO₂ dilakukan dengan mengaduk larutan 30 ml larutan Au dan ditambahkan dengan 0,4 larutan APTMS (1mM) selama 15 menit. Kemudian ditambahkan 150 ml larutan SiO₂ yang didapatkan dengan cara mencampurkan 0,5 gram serbuk SiO₂ dengan 0,7 ml aquades, 2 ml amonia dan 39,5 ml etanol. Campuran ini diaduk selama 1 jam menggunakan *magnetic stirrer* hingga didapatkan larutan SiO₂.



Gambar 3.2 Fotoanoda struktur Au-SiO₂ *curved microsheet*.

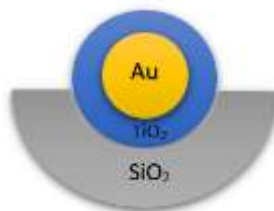
3.2.5 Sintesis Au@TiO₂ *core-shell*

Koloid emas (500ml, $5 \times 10^{-4} \text{M}$) $\text{HauCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan trinitrium sitrat digunakan sebagai bahan awal dan pereduksi. Asam mercaptoundecanoic (MUA=1mM) dilarutkan ke dalam 2,5% larutan amonia. Larutan MUA kemudian ditambahkan ke dalam koloid emas dan diinkubasi selama 2 jam. Selanjutnya ditambahkan 1M HCl tetes demi tetes sampai pH sama dengan 3. Emas yang dihasilkan dicuci menggunakan air dengan sentrifugasi 3800 rpm. Partikel emas dicampurkan ke dalam 20ml air dan 20 mL larutan amonia. Untuk mendapatkan larutan Ti^{4+} yaitu dengan mencampur titanium (IV) isopropoxide (TTIP) dengan trietanolamin (TEOA) di bawah atmosfer nitrogen pada rasio molar TEOA / TTIP = 2/1. Senyawa Ti^{4+} diletakan di suhu kamar dengan menambahkan TEOA. Kemudian ditambahkan air untuk membuat larutan Ti^{4+} 0.50M. Sebelum digunakan larutan tersebut disaring melalui membran PTFE dengan ukuran pori 0,2 μm . Kemudian ditambahkan koloid MUA-Au ke dalam larutan Ti^{4+} dengan fraksi yang ditentukan Au:TiO₂ adalah 3.0:97.0 dan 5.0:95.0 Larutan yang disimpan selama 24 jam pada 80°C (Kwon dkk., 2007).

3.2.6 Sintesis Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet*

Struktur *core-shell* Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet* dari prekursor TEOS dengan memodifikasi metode kopresipitasi melalui penambahan nanopartikel Au@TiO₂. Sebelum dilakukan titrasi HCl, 0,5 gram Au@TiO₂ didispersikan ke dalam 30 ml EtOH, lalu ditambahkan dengan 150 ml larutan SiO₂ hasil sintesis. Selanjutnya dititrasi dengan HCl hingga pH larutan mencapai 7. Selanjutnya tetap diaduk sampai terbentuk larutan berwarna putih kemudian larutan diendapkan. Endapan tersebut dipisahkan dengan kertas saring, lalu dicuci dengan aquades

untuk menghilangkan kadar asam, basa, dan garam. Kemudian dikeringkan pada temperatur 80°C selama 24 jam.



Gambar 3.3 Fotoanoda struktur Au@TiO₂ *core-shell* dengan SiO₂ *curved microsheet*.

3.3 Perakitan DSSC

3.3.1 Pembuatan Pewarna

Pewarna yang digunakan dalam penelitian ini adalah pewarna standar industri, ruthenium kompleks N-719 dengan warna merah bata. Pewarna yang digunakan adalah 0,3 mM larutan C₅₈H₈₆N₈O₈RuS₂.

3.3.2 Pembuatan Elektrolit

Elektrolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasangan iodide/triiodide. Kalium iodide (KI) sebanyak 0,8 gram dilarutkan dalam 10 ml *acetonitrile* hingga larut seluruhnya. Kemudian 0,127 gram iodide ditambahkan kedalam larutan elektrolit dengan terus diaduk hingga iodide larut seluruhnya. PEG 4000 sebanyak 7 gram dilarutkan dalam 25 ml *chloroform* hingga larut dan membentuk gel. Kemudian larutan elektrolit dicampur dengan gel tersebut dan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 1 jam pada suhu 80°C.

3.3.3 Fabrikasi DSSC

Dalam penelitian ini, fotoanoda dasar yang digunakan adalah TiO₂ fase anatase dengan prekursor TiCl₃ dan TiO₂ P25 Degussa komersil. Divariasikan jenis *microsheet* yaitu *planar* dan *curved* untuk masing-masing struktur sebagai pembanding. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1.

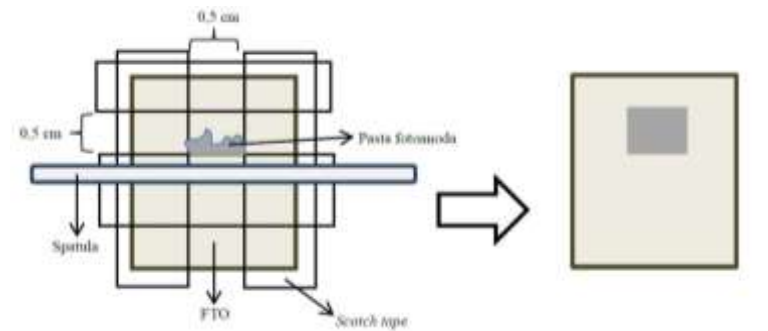
Tabel 3.1 Sampel berdasarkan variasi struktur fotoanoda pada DSSC

No.	Fotoanoda Dasar	Modifikasi Fotoanoda	Volume Au (ml)
1.	Nanopartikel TiO ₂ prekursor TiCl ₃	SiO ₂ TEOS(k _{0.05})	-
2.		SiO ₂ TEOS(k ₅)	-
3.		SiO ₂ <i>Glass sphere</i> (GS)	-
4.		Au-SiO ₂ GS	30
5.		Au-SiO ₂ GS	40
6.		Au-SiO ₂ GS	50
7.		Au-SiO ₂ GS	60
8.		Au-SiO ₂ TEOS	30
9.		Au-SiO ₂ TEOS	60
10.		Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS	30
11.		Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS	60
12.		Au@TiO ₂ -SiO ₂ GS	30
13.		Au@TiO ₂ -SiO ₂ GS	60
14.	Nanopartikel TiO ₂ P25 degussa komersil	Au-SiO ₂ TEOS	Terbaik
15.		Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS	
16.		Au-SiO ₂ GS	
17.		Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS	

Sebelum dilakukan pelapisan fotoanoda ke kaca FTO, sampel terlebih dahulu dibuat pasta. Serbuk partikel sebanyak 0,25 gram yang telah dihaluskan dilarutkan dengan 87,5 μL aquades, 125 μL CH₃COOH, dan 125 μL Triton X-100. Substrat kaca FTO ($12 \Omega \text{ square}^{-1}$) dengan ukuran $2 \times 2 \text{ cm}^2$ dicuci dengan *deionized water* dan *anhydrous ethanol*. Pelapisan pasta fotoanoda pada substrat kaca FTO digunakan metode *doctor-blade* seperti pada gambar 3.2. Pasta ditetaskan ke kaca FTO dan diratakan menggunakan spatula kaca. Luasan aktif fotoanoda yang digunakan adalah $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$. Kaca FTO yang telah dilapisi pasta dan telah mengering dipanaskan pada suhu 225°C selama 2 menit menggunakan *hot plate*.

Kemudian kaca FTO direndam ke dalam larutan pewarna selama 12 jam. Selanjutnya dilakukan penyusunan komponen-komponen DSSC dengan struktur *sandwich*, terdiri dari kaca FTO yang dilapisi fotoanoda dan telah direndam dalam larutan pewarna, larutan elektrolit dan kaca FTO yang dilapisi platina yang

bertindak sebagai elektroda lawan. Selanjutnya susunan DSSC ini direkatkan menggunakan penjepit.



Gambar 3.4 Pelapisan pasta fotoanoda pada kaca FTO dengan metode *doctor-blade*.

3.4 Karakterisasi

Struktur kristal serbuk fotoanoda dikarakterisasi menggunakan X-ray diffraction (XRD) Philips X'pert MPD 30 mA, 40 kV (Lampiran A). Permukaan antarmuka dari sampel dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform InfraRed* (FTIR) Thermo Nicolet i510 dengan bilangan gelombang $500\text{ cm}^{-1} - 4000\text{ cm}^{-1}$ (Lampiran B). Absorbansi pada serbuk dengan panjang gelombang cahaya tampak (200nm – 800nm) dikarakterisasi menggunakan spektroskopi Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Lambda 750 uv/vis/nir *spectrophotometer* (Lampiran C). Ukuran partikel pada masing-masing penambahan material pada fotoanoda diketahui dari pengukuran *Physical Size Analyzer* (PSA) Malvern Zetasizer (Lampiran D). Morfologi sampel dapat dilihat dengan menggunakan karakterisasi *scanning electron microscope* (SEM) JSM-6510A/ JSM-6510LA (*Analytical / Analytical low vacuum SEM*) dan Hitachi SU 3500 (Lampiran E). Spektra Raman menggunakan spektroskopi (*Bruker–Senterra*) menggunakan laser Nd:YAG DPSS (*diode-pumped solid-state*) (532 nm; 2 mW; 5s) (Lampiran F). Sinyal *photoluminescence* diukur dengan spektrometer serat UV-visible (USB4000 Ocean optics) yang digabungkan ke lensa objektif perbesaran 120 kali dan dilengkapi dengan filter laser dengan panjang gelombang panjang 405 nm (Lampiran G).

Penentuan energi *gap* dapat ditentukan dengan metode *Tauc plot*. Metode *Tauc Plot* didapatkan dengan menarik ekstrapolasi pada daerah linier ($h\nu$) dari grafik hubungan sebagai absis dan $(\alpha h\nu)^2$ hingga memotong sumbu energi (hingga $(\alpha h\nu)^2 = 0$) (Belahmar & Chouiyakh, 2016). Perhitungan tersebut menggunakan persamaan $(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n$. Jika transisi terjadi secara langsung (hanya dibutuhkan sebuah foton), maka $n = \frac{1}{2}$. Hubungan antara koefisien absorpsi (α) dan energi foton datang ($h\nu$) dapat ditulis sebagai berikut :

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$(\alpha h\nu)^2 = (A)^2(h\nu - E_g) \quad (3.2)$$

$$(\alpha h\nu)^2 = A^2 h\nu - A^2 E_g \quad (3.3)$$

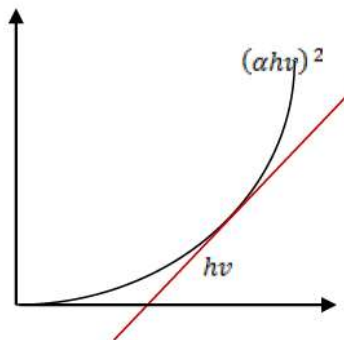
dengan menggunakan persamaan garis $Y = mx + C$, maka

$$0 = A^2 h\nu - A^2 E_g \quad (3.4)$$

$$0 = h\nu - E_g \quad (3.5)$$

$$E_g = h\nu \quad (3.6)$$

A adalah sebuah konstanta dan E_g adalah lebar celah pita optik bahan semikonduktor. Dengan h konstanta planck, ν frekuensi foton dengan $\nu = c/\lambda$. Gambar 3.3 dibawah ini menggambarkan hubungan antara dengan yang digunakan untuk menentukan energi *gap*.



Gambar 3.5 Penentuan *optical bandgap*.

Koefisien absorpsi (α) merupakan hubungan antara transmitansi sebagai fungsi gelombang dengan ketebalan lapisan tipis yang diukur

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.7)$$

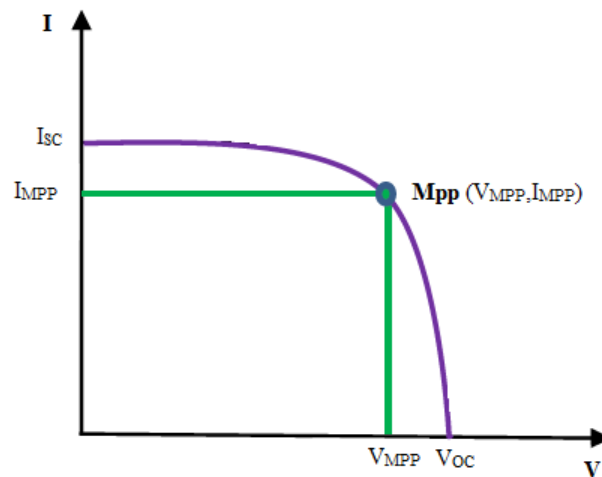
$$T = 10^{-A} \quad (3.8)$$

Ketebalan wadah sampel (t) adalah 1 cm, T adalah transmisi dan A adalah absorptansi.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.9)$$

3.5 Pengujian DSSC

Pengujian unjuk kerja DSSC dilakukan dengan pengukuran IPCE untuk mengetahui konversi foton menjadi arus. Pengukuran IPCE diperlukan monokromator (CT-10T, JASCO) dan lampu halogen (GR-150) seperti yang terdapat pada Lampiran H. Selain itu, dilakukan pengukuran arus dan tegangan dengan menggunakan *solar simulator* yang menggunakan lampu halogen sebagai sumbernya dan terhubung via PXI-E1073 & SMU PXI-4130 (Lampiran I). Berdasarkan hasil pengukuran akan didapatkan kurva I-V seperti pada Gambar 3.5 yang merupakan kurva I-V dari sel surya ideal.



Gambar 3.6 Kurva I - V dari sel surya ideal.

V_{OC} adalah tegangan *open circuit*, I_{SC} adalah arus *short circuit*, sedangkan MPP adalah *maximum power point* atau daya maksimum yang terdiri dari V_{MPP} (tegangan dari daya maksimum) dan I_{MPP} (arus dari daya maksimum). Nilai *fill*

factor (FF) digunakan untuk menghitung nilai efisiensi DSSC. FF dihitung dengan Persamaan (3.10).

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3.10)$$

Semakin besar nilai daya maksimum dan semakin tajam siku kurva I-V maka nilai FF akan semakin besar. Dengan menggunakan FF maka maksimum daya dari DSSC dapat dihitung dengan Persamaan (3.11).

$$P_{MAX} = V_{OC} I_{SC} FF \quad (3.11)$$

Sedangkan efisiensi DSSC dalam mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik dapat dihitung dengan Persamaan (3.12).

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{MATAHARI}} \quad (3.12)$$

Nilai $P_{MATAHARI}$ diperoleh dari pengukuran lampu halogen selanjutnya dilakukan pengukuran arus dan tegangan.

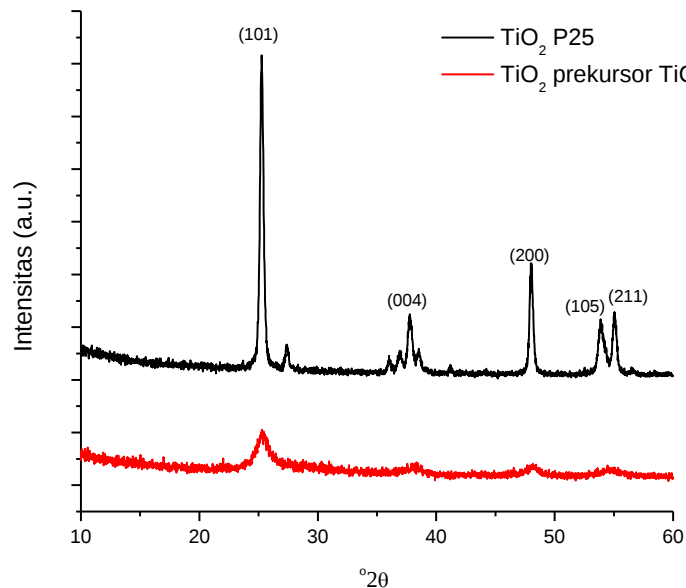
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

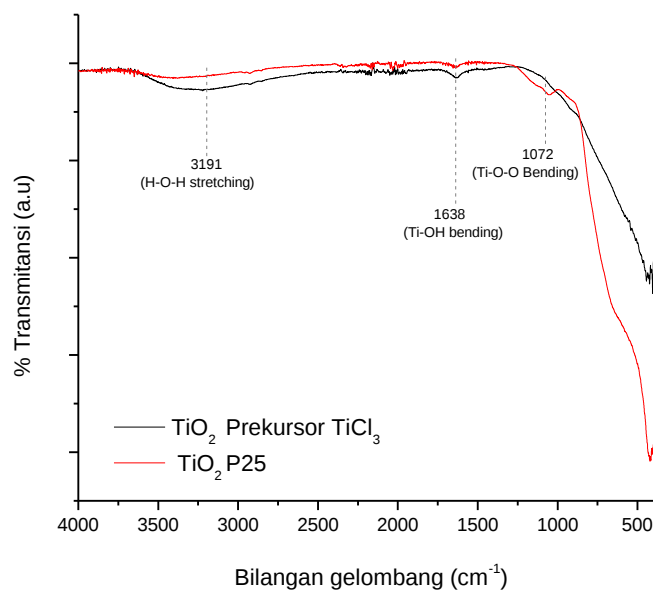
4.1 Karakterisasi Material Fotoanoda DSSC

4.1.1 Nanopartikel TiO₂ sebagai Fotoanoda Dasar

Fotoanoda dasar yang digunakan pada penelitian ini yaitu nanopartikel TiO₂ dari prekursor TiCl₃ dan TiO₂ komersil P25 *Degussa* sebagai pembanding. Nanopartikel TiO₂ anatase hasil sintesis dari prekursor TiCl₃ didapatkan melalui proses kalsinasi dengan suhu 400°C selama 5 jam. Hal tersebut dapat dibuktikan pada gambar 4.1 bahwa masing-masing sampel TiO₂ sintesis maupun komersil memiliki fasa anatase pada puncak utama $2\theta = 25,48^\circ$ (JCPDS 21-1272). Kedua sampel TiO₂ memiliki puncak paling tinggi pada orientasi bidang (101) dan (200). Berdasarkan hasil XRD untuk TiO₂ dengan prekursor TiCl₃ terdapat 4 puncak, dengan puncak utama pada $2\theta = 25,23^\circ$ dan puncak lainnya pada $2\theta = 37,96^\circ$, $47,81^\circ$, dan $53,58^\circ$. Sedangkan untuk P25 memiliki puncak yang lebih banyak, yaitu $25,30^\circ$, $26,75^\circ$, $38,03^\circ$, $48,12^\circ$, dan $53,24^\circ$.



Gambar 4.1 XRD TiO₂ dari P25 komersil dan TiO₂ dengan prekursor TiCl₃



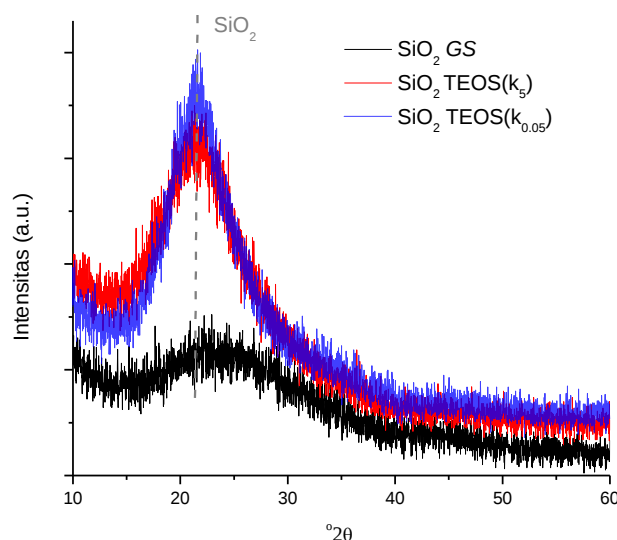
Gambar 4.2 Hasil FTIR Spectra untuk TiO_2 dari P25 komersil dan TiO_2 dengan prekursor TiCl_3

Gambar 4.2 merupakan grafik spektra FTIR untuk TiO_2 dengan prekursor TiCl_3 dan TiO_2 komersil P25 *degussa* pada bilangan gelombang 450-4000 cm^{-1} . Berdasarkan hasil spektra FT-IR, pada puncak lebar 3191 cm^{-1} menunjukkan ikatan H-OH dikarenakan penyerapan air dalam nanopartikel. Puncak pada 1638 cm^{-1} dan 1072 masing-masing disebabkan karena adanya *bending vibration* dari Ti-OH dan Ti-O-O (Karuppuchamy & Jeong, 2006).

4.1.2 Material SiO_2 *microsheet*

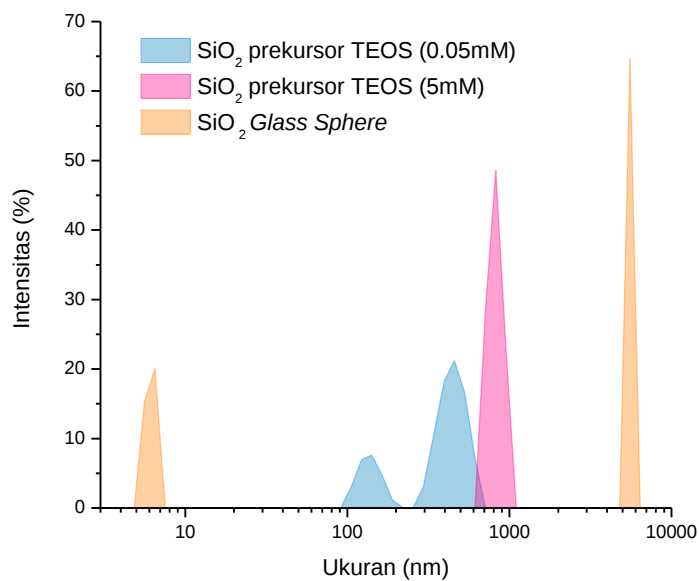
Pada penelitian ini digunakan material SiO_2 yang berperan sebagai material penghambur pada fotoanoda DSSC. Material SiO_2 ini didapatkan melalui sintesis prekursor *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) dan SiO_2 komersil yaitu *Glass Sphere*. Hasil XRD SiO_2 pada Gambar 4.3 dengan ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) No. 00-005-0490, puncak SiO_2 terbentuk pada sudut $2\theta = 22,59^\circ$ dari kedua sampel TEOS dengan variasi penambahan katalis dan $23,07^\circ$ dari *Glass Sphere*. Intensitas pada puncak SiO_2 TEOS dengan variasi penambahan katalis 0.05mM memiliki puncak difraksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan katalis 5mM. Sedangkan pada puncak difraksi SiO_2 *glass sphere*

memiliki puncak yang rendah dan cenderung melebar, sehingga mengindikasikan jenis nanopartikel SiO_2 ini merupakan SiO_2 *amorf*.

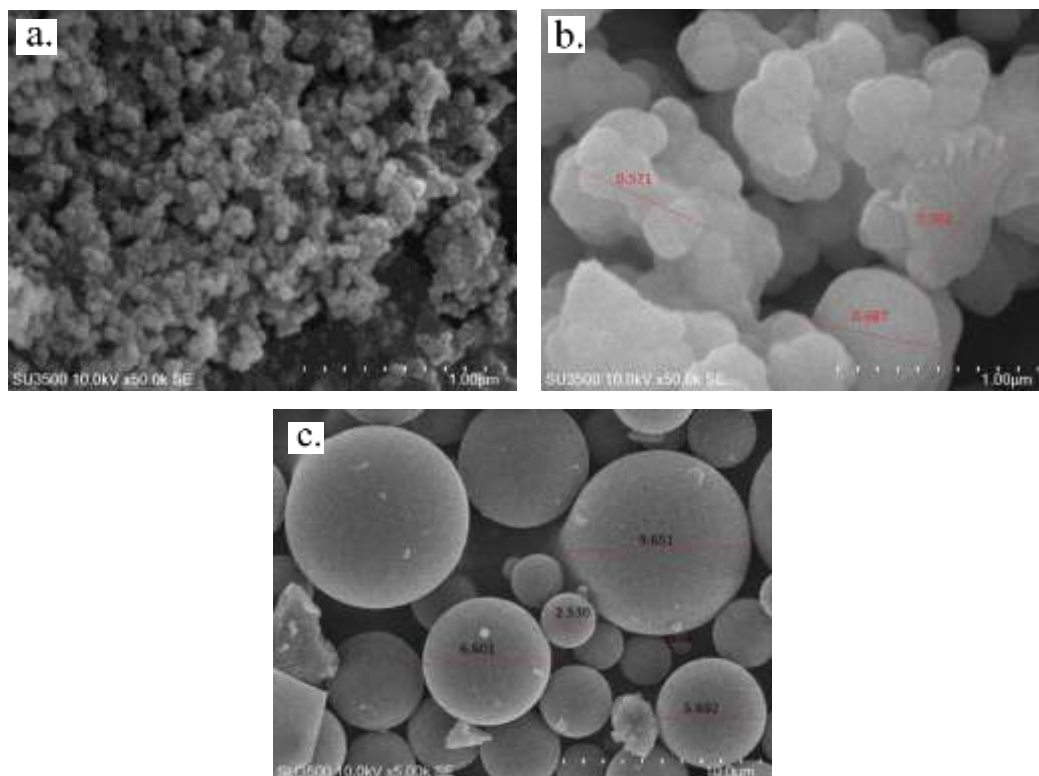


Gambar 4.3 Hasil XRD pada SiO_2 *glass sphere* dan SiO_2 prekursor TEOS.

Penambahan variasi katalis pada sintesis SiO_2 prekursor TEOS pada penelitian ini dimaksudkan untuk didapatkan variasi ukuran partikel yang terbentuk. Berdasarkan uji PSA, SiO_2 prekursor TEOS memiliki rata-rata partikel yang lebih kecil dibandingkan dengan SiO_2 *glass sphere*. Penambahan katalis 0.05mM pada SiO_2 prekursor TEOS menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil dengan rata-rata ukuran $\sim 681\text{nm}$ dan $\sim 5.352\text{nm}$ untuk penambahan katalis 5mM. hal ini berkesesuaian dengan penelitian Ibrahim, dkk., yang menyebutkan bahwa ukuran partikel silika meningkat seiring kenaikan konsentrasi katalis yang digunakan, dimana konsentrasi TEOS dan air adalah konstan. Pada saat konsentrasi amonia dinaikkan, maka kecepatan hidrolisis dan kondensasi juga menjadi cepat, sehingga produk intermediat yang dihasilkan semakin tinggi. Sedangkan rata-rata ukuran partikel untuk SiO_2 *glass sphere* berkisar $\sim 6.512\text{nm}$. Gambar 4.4 menunjukkan distribusi ukuran partikel SiO_2 TEOS dan SiO_2 *Glass Sphere*. Berdasarkan dari hasil pengujian PSA, diketahui bahwa distribusi partikel SiO_2 prekursor TEOS lebih homogen dibandingkan dengan distribusi SiO_2 *glass sphere*.

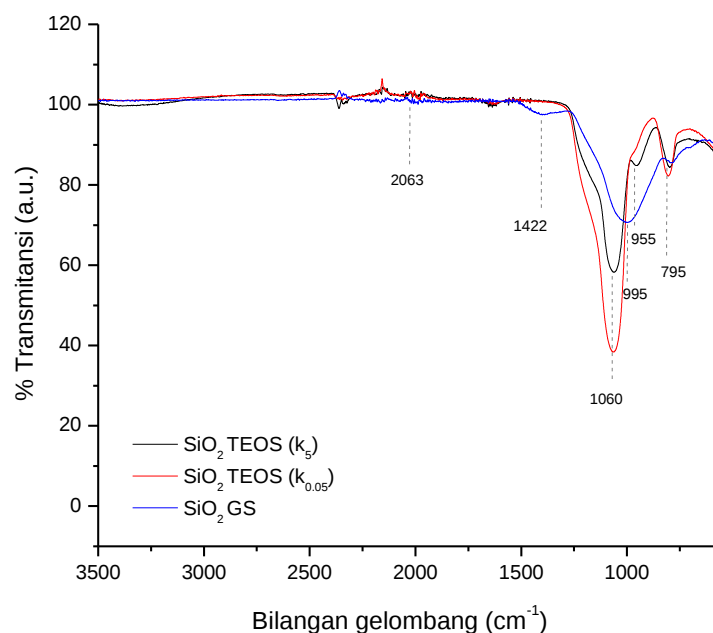


Gambar 4.4 Distribusi ukuran partikel SiO_2 prekursor TEOS dengan variasi molar katalis dan SiO_2 Glass sphere.



Gambar 4.5 Hasil SEM (a.) SiO_2 TEOS penambahan katalis 0.05mM (b.) SiO_2 TEOS penambahan katalis 5mM, (c.) SiO_2 glass sphere.

Morfologi bentuk material SiO_2 dapat diketahui melalui karakterisasi SEM. Hasil SEM untuk SiO_2 prekursor TEOS dengan variasi molar katalis dan SiO_2 *Glass sphere* terdapat pada gambar 4.5. Partikel pada ketiga material SiO_2 memiliki morfologi yang hampir sama yaitu cenderung bulat. Sampel SiO_2 *Glass sphere* menunjukkan distribusi ukuran partikel yang cenderung tidak merata adapun bentuk fisik berdasarkan *datasheet* material tersebut berupa *hollow*, manik-manik kaca yang bulat dan tidak berpori. Sedangkan pada sampel SiO_2 TEOS pada kedua variasi katalis memiliki distribusi yang lebih homogen namun terlihat adanya partikel yang bergerombol atau aglomerasi. Hasil pengujian distribusi ukuran partikel menggunakan PSA pada material SiO_2 prekursor TEOS menunjukkan hasil yang lebih besar dibandingkan dengan pengukuran yang dilakukan pada hasil karakterisasi SEM. Hal ini disebabkan pada saat pengukuran PSA terdapat partikel yang tidak homogen atau mengalami aglomerasi.



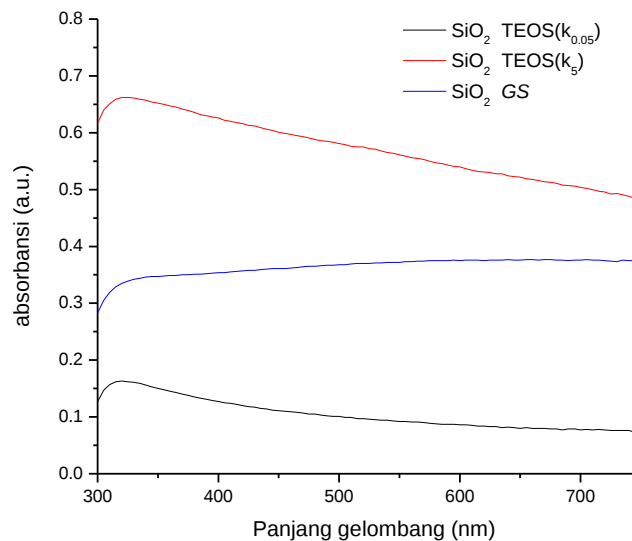
Gambar 4.6 Hasil FTIR spectra SiO_2 *glass sphere* dan SiO_2 prekursor TEOS dengan variasi katalis.

Grafik spektra FTIR untuk SiO_2 sintesis dengan prekursor TEOS variasi katalis 0.05mM, 5mM dan SiO_2 *glass sphere* pada panjang gelombang 500-4000 cm^{-1} ditunjukkan oleh Gambar 4.6. Berdasarkan hasil spektra FTIR, terdapat

puncak lebar ikatan Si-H *stretching* pada 2063 cm^{-1} . Pada sampel SiO_2 *glass sphere* terdapat ikatan H-O-H *bending of water* pada 1422 cm^{-1} (saikia & parthasarathy, 2010). Ikatan Si-O-Si *asymmetric stretching* untuk SiO_2 yang disintesis dari TEOS berada pada puncak 1060 cm^{-1} sedangkan SiO_2 komersil *glass sphere* berada pada puncak 995 cm^{-1} . Adapun ikatan Si-O-Si *symmetric bending* pada ketiga sampel berada pada puncak 795 cm^{-1} (Yukhymchuk & Yaremko, 2010).

4.1.3 Sifat Optis Material SiO_2

Kemampuan absorbansi material pada penelitian ini dapat diketahui melalui pengujian UV-Vis *spectrophotometer*. Hasil pengujian UV-Vis yang diperoleh juga dapat digunakan untuk mengetahui lebar celah pita energi melalui *Tauc Plot* dan energi *urbach* dari suatu material. Absorbansi pada sampel silika dengan masing-masing material TEOS dan *glass sphere* disajikan pada gambar 4.7.

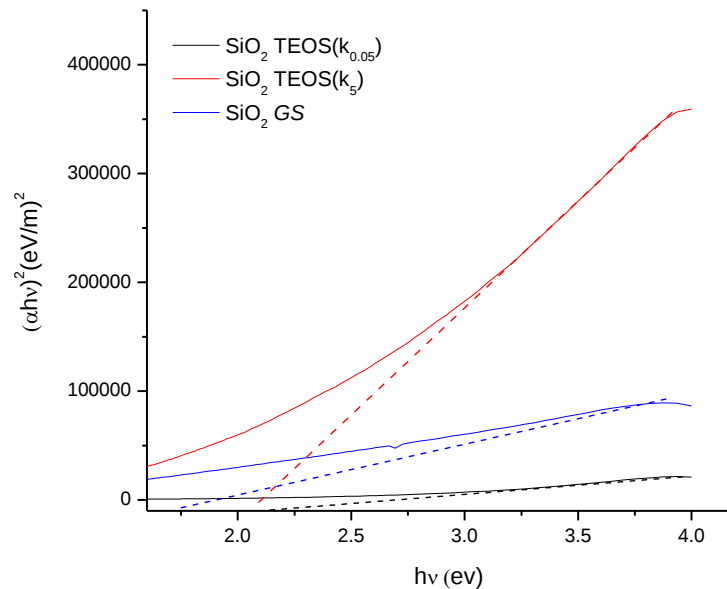


Gambar 4.7 Hasil UV-Vis dari SiO_2 prekursor TEOS dengan variasi katalis dan SiO_2 *glass sphere*.

SiO_2 prekursor TEOS dengan variasi katalis 0.05mM dan 5mM menunjukkan adanya absorbansi pada panjang gelombang 320nm. Sedangkan pada material SiO_2 *glass sphere* tidak terlihat adanya absorbansi pada rentang panjang

gelombang 300nm-750nm. Hal ini disebabkan rata-rata ukuran *SiO₂ glass sphere* lebih besar dari panjang gelombang cahaya yang masuk, sehingga dapat menyebabkan penyerapan cahaya yang terjadi pada *SiO₂* dipantulkan (Jentoft, 2004).

Hasil *Tauc Plot* *SiO₂* prekursor TEOS dan *SiO₂ glass sphere* dapat dilihat pada Gambar 4.8. Material *SiO₂* prekursor TEOS variasi penambahan katalis 0.05mM, 5mM dan *SiO₂ glass sphere* memperoleh energi celah pita masing-masing sebesar 2.18 eV, 2.05eV dan 1.74 eV. Hasil tersebut menunjukkan bahwa celah pita energi pada kedua variasi material *SiO₂* prekursor TEOS lebih besar dibandingkan dengan *SiO₂ glass sphere*. Hasil absorbansi dari suatu material juga dapat digunakan untuk mengetahui energi *urbach*. Energi *urbach* terbentuk karena adanya cacat kristal atau konsentrasi doping yang tinggi. Efek ini menghasilkan tepi absorpsi eksponensial pada bahan semikonduktor. Energi *urbach* tertinggi dimiliki oleh material *SiO₂ glass sphere* yang mengindikasikan material tersebut mengalami cacat kristal paling banyak dibandingkan dengan *SiO₂* prekursor TEOS yang dirangkum pada tabel 4.1.



Gambar 4.8 Tauc plot dari *SiO₂* prekursor TEOS dengan variasi katalis dan *SiO₂ glass sphere*.

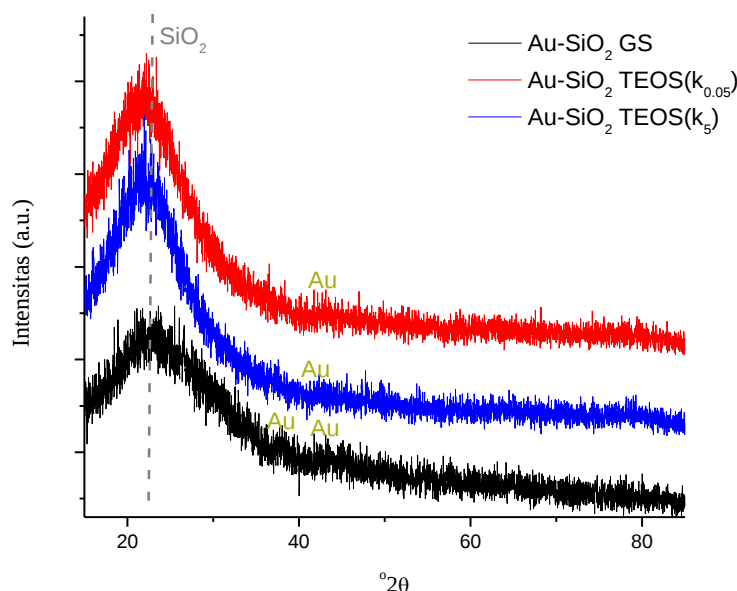
Tabel 4.1 Lebar celah optik dan energi *urbach plot* dari SiO₂ prekursor TEOS dengan variasi katalis dan SiO₂ *glass sphere*.

Sampel	Lebar celah optik E _g (eV)	Energi <i>Urbach</i> E _u (eV)
SiO ₂ TEOS(k _{0.05})	2.18	2.82
SiO ₂ TEOS(k ₅)	2.05	8.13
SiO ₂ GS	1.74	12.98

4.2 Karakterisasi Material Fotoanoda Struktur Lapis

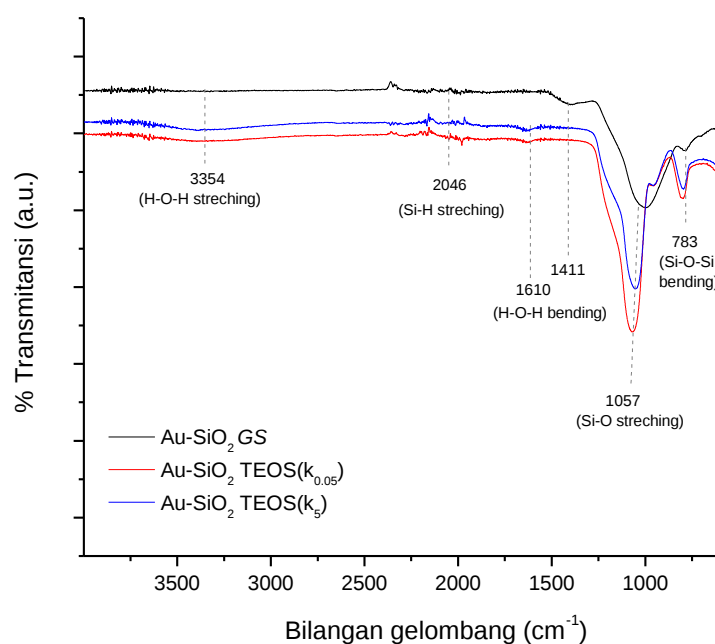
Pada penelitian ini digunakan modifikasi fotoanoda melalui variasi struktur lapisan Au-SiO₂ *microsheet* dan Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet*. Pada masing-masing lapisan digunakan penambahan material plasmonik (Au) dan material penghambur (SiO₂). SiO₂ yang digunakan adalah dari prekursor TEOS (katalis 0.05mM dan 5mM) serta SiO₂ komersil *glass sphere* sebagai pembanding.

4.2.1 Material Au-SiO₂ *microsheet*



Gambar 4.9 Hasil XRD Au-SiO₂ TEOS dengan variasi ukuran silika dan Au-SiO₂ *glass sphere*.

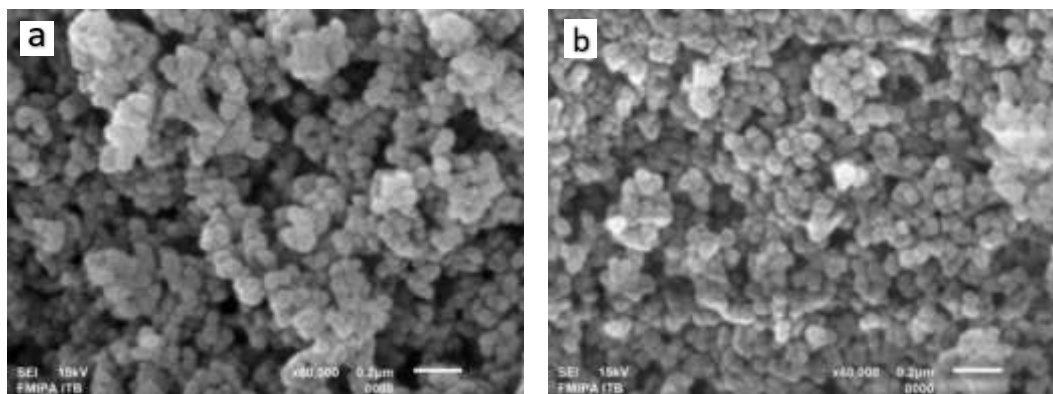
Pola XRD Au-SiO₂ menggunakan TEOS dengan variasi ukuran silika dan Au-SiO₂ *glass sphere* ditampilkan pada gambar 4.9. Pada ketiga sampel menunjukkan puncak tertinggi pada $2\theta = 26,64^\circ$ dengan orientasi bidang (101) yang merupakan puncak milik SiO₂ (JCPDS 039-1425). Selanjutnya muncul puncak dengan intensitas rendah pada $2\theta = 38^\circ$ dengan orientasi bidang (111) dan $2\theta = 43^\circ$ dengan orientasi bidang (200) yang diketahui merupakan puncak Au berdasarkan pada JCPDF 004-784. Pola hasil XRD yang terbentuk pada ketiga sampel menunjukkan intensitas kristalinitas Au yang sangat rendah. Hal ini diduga disebabkan oleh nanopartikel Au yang terlapisi oleh sifat nanopartikel SiO₂ amorf (Sun dkk., 2017).



Gambar 4.10 Hasil FTIR spectra Au-SiO₂ TEOS dengan variasi ukuran dan SiO₂ *glass sphere*.

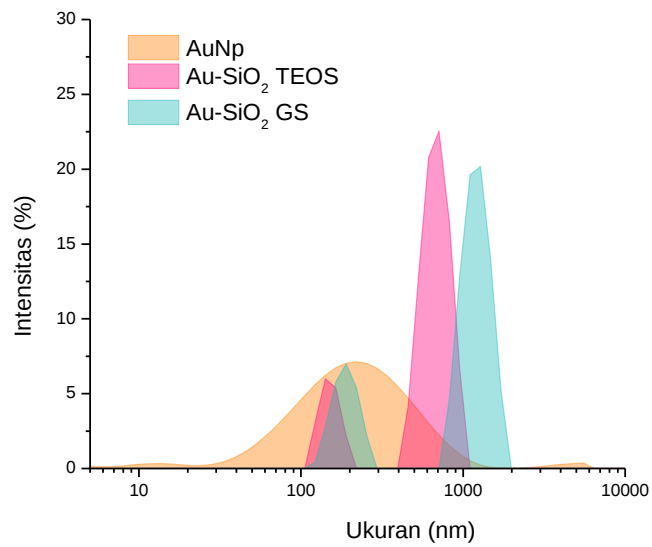
Gambar 4.10 merupakan hasil pengujian FTIR dari sampel Au-SiO₂ TEOS dengan variasi ukuran dan SiO₂ *glass sphere*. Pola spektra FTIR pada kedua sampel dengan SiO₂ cenderung sama, sedangkan pada sampel dengan SiO₂ *glass sphere* mengalami pergeseran pita untuk beberapa ikatan pada bilangan gelombang 500-1500 cm⁻¹. Berdasarkan hasil spektra FTIR, terdapat puncak lebar

pada 3354 cm^{-1} menunjukkan ikatan H-OH karena penyerapan air. Ikatan Si-H *stretching* pada 2046 cm^{-1} , H-O-H *bending of water* pada 1610 cm^{-1} pada kedua sampel Au-SiO₂ prekursor TEOS sedangkan pada sampel SiO₂ GS mengalami pergeseran pada 1411 cm^{-1} . Ikatan Si-O *stretching* terbentuk pada 1057 cm^{-1} dan 1005 cm^{-1} . Sedangkan pada 783 cm^{-1} merupakan Si-O-Si *bending*. Pada bilangan gelombang $960\text{--}970\text{ cm}^{-1}$ seharusnya menunjukkan adanya nanopartikel Au yang berikatan dengan silika yang ditentukan dari *stretching vibration* ikatan Si-O-M (*metal bond*) (Malik dkk., 2016), namun pada penelitian ini tidak dapat terlihat. Hal ini dikarenakan ukuran nanopartikel Au yang lebih kecil dibandingkan ukuran SiO₂ sehingga pada saat pengujian, yang dimungkinkan adalah material Au terlingkupi oleh SiO₂.

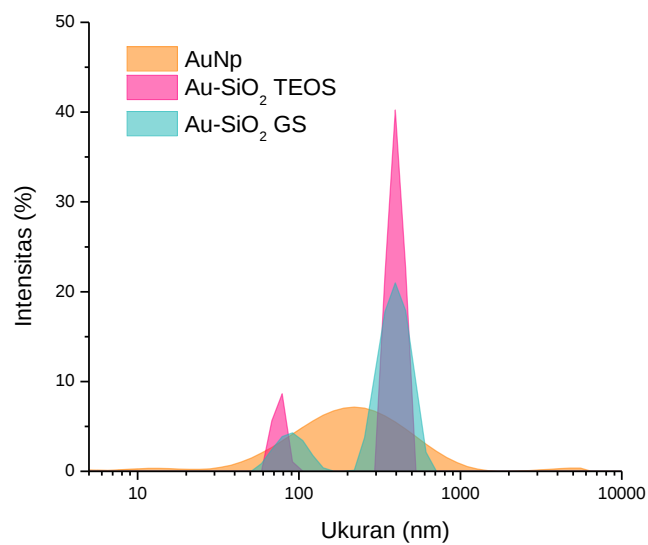


Gambar 4.11 Hasil SEM material fotoanoda Au-SiO₂ *microsheet* (a) variasi volume Au 30ml (b) variasi volume Au 60ml.

Morfologi material Au-SiO₂ *microsheet* prekursor TEOS dengan variasi penambahan volume Au terdapat pada gambar 4.11. Pada kedua sampel terlihat morfologi yang hampir sama dengan hasil SEM material SiO₂ yang cenderung bulat dan homogen. Fotoanoda struktur Au-SiO₂ *microsheet* dengan morfologi nanopartikel yang bulat dan homogen ini bersifat menguntungkan karena luas permukaannya yang besar. Hal ini akan menghasilkan efisiensi konversi cahaya yang lebih tinggi karena penyerapan pewarna yang lebih banyak (Lim dkk., 2015).



(a)



(b)

Gambar 4.12 Hasil PSA untuk Au-SiO₂ prekursor TEOS dan Au-SiO₂ *Glass Sphere* (a) Variasi volume Au 30ml dan (b) Variasi volume Au 60ml.

Penambahan volume Au sebanyak 60ml pada material Au-SiO₂ *microsheet* tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan pada hasil karakterisasi SEM. Hal ini dikarenakan sampel didominasi oleh partikel SiO₂

dengan ukuran yang lebih besar yaitu ~681nm sedangkan ukuran partikel rata-rata Au yang digunakan adalah ~150nm. Berdasarkan mekanisme *Ostwald Ripening* atau *particle coarsening*, terdapat 3 fase pembentukan nanopartikel Au yaitu nukleasi, pertumbuhan lambat dan pertumbuhan cepat. Fase pertama adalah pembentukan inti, diikuti dengan pertumbuhan inti menjadi partikel yang lebih besar, dan kemudian partikel tumbuh hingga ukuran akhir (Ji dkk., 2007; Polte dkk., 2010). Pembentukan Au pada fotoanoda struktur material Au-SiO₂ *microsheet* dapat diamati melalui hasil pengujian PSA yang ditunjukkan dengan gambar 4.12.

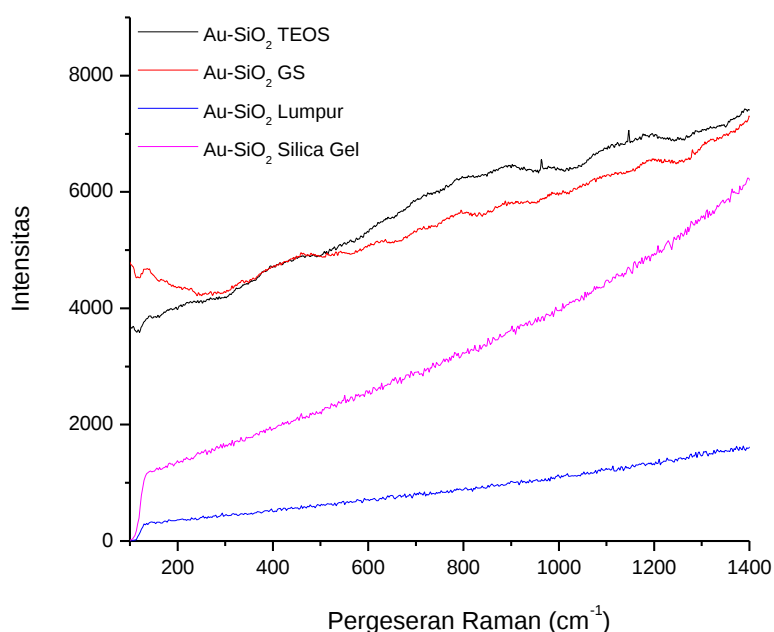
Hasil PSA pada fotoanoda struktur material Au-SiO₂ *microsheet* pada variasi silika menghasilkan dua puncak pada masing-masing sampel. Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan ukuran partikel yang signifikan di kedua puncak. Puncak pertama memiliki intensitas lebih tinggi yaitu pada rentang ukuran 220nm–1900nm, sedangkan pada puncak kedua dengan intensitas yang lebih rendah berada diantara rentang ukuran 50nm–300nm. Pada puncak pertama diindikasikan puncak dari material SiO₂ sedangkan pada puncak kedua merupakan milik material Au. Hal ini berkesesuaian dengan hasil pengujian PSA yang telah dilakukan pada masing-masing material SiO₂ dan Au sebelum dilakukan modifikasi struktur *microsheet*. Ukuran puncak pertama dan kedua pada masing-masing sampel disajikan pada tabel 3.

Tabel 4.2 Ukuran fotoanoda Au-SiO₂ prekursor TEOS dan Au-SiO₂ *Glass Sphere* dengan variasi Au 30ml dan 60ml.

Sampel	Volume Au (ml)	Ukuran (nm)	
		Puncak 1	Puncak 2
Au-SiO ₂ TEOS	30	689,4	151,9
Au-SiO ₂ GS	30	1221	189,8
Au-SiO ₂ TEOS	60	398,8	75,73
Au-SiO ₂ GS	60	400,1	90,69

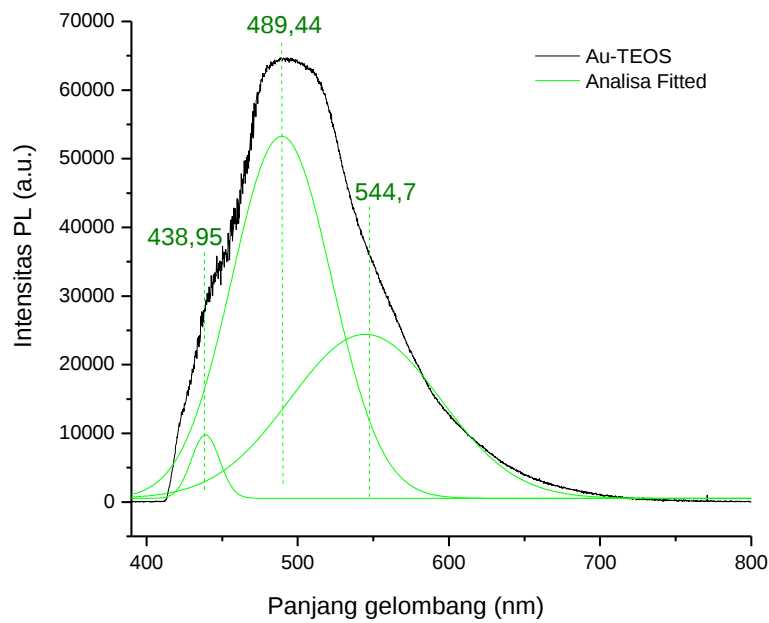
Hasil pengujian Raman untuk fotoanoda Au-SiO₂ *microsheet* dengan variasi jenis silika yaitu TEOS, *glass sphere*, lumpur dan silika gel dapat dilihat

pada gambar 4.13. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa fotoanoda Au-SiO₂ variasi jenis silika yaitu TEOS, *glass sphere*, dan silika gel memiliki intensitas pergeseran Raman yang semakin meningkat. Sedangkan untuk sampel Au-SiO₂ dengan silika hasil ekstraksi lumpur Sidoarjo memiliki intensitas pergeseran raman yang cenderung tetap. Hal ini disebabkan oleh pengaruh nanopartikel SiO₂ pada hasil ekstraksi lumpur yang memiliki struktur amorf sehingga menghambat peningkatan dari Raman scattering (pramudita, 2018., Rasalingam, dkk., 2014).

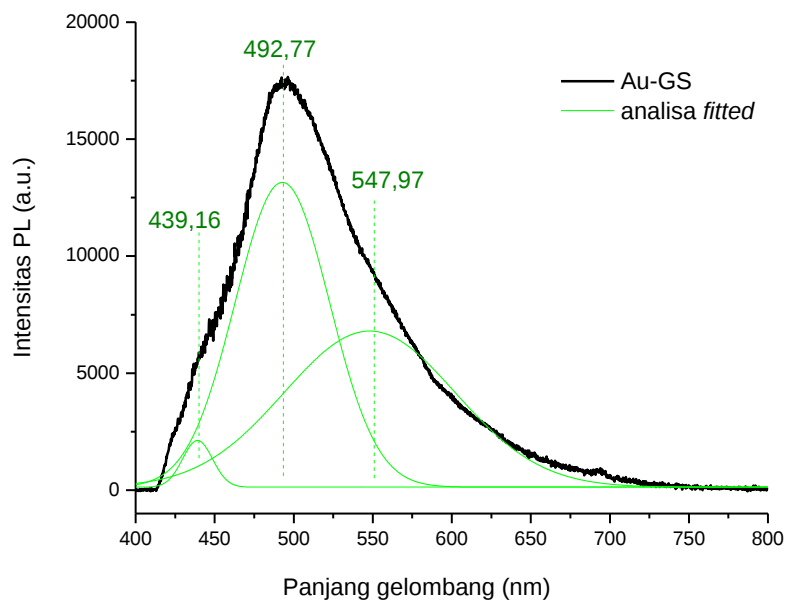


Gambar 4.13 Hasil uji Raman pada fotoanoda Au-SiO₂ microsheet dengan variasi jenis silika.

Spektra *photoluminescence* pada fotoanoda Au-SiO₂ *microsheet* dengan variasi silika prekursor TEOS dan silika *glass sphere* ditunjukkan dalam Gambar 4.14. Hasil pengujian pada masing-masing sampel kemudian dianalisa dengan plot *fitted* dan menghasilkan tiga puncak pada rentang panjang gelombang 400-800nm. Puncak analisa *fitted* pada ketiga sampel dirangkum dalam tabel 4.3. Pada masing-masing sampel menunjukkan dua puncak dengan intensitas tertinggi berada pada panjang gelombang 490nm dan intensitas rendah pada 445nm.



(a)



(b)

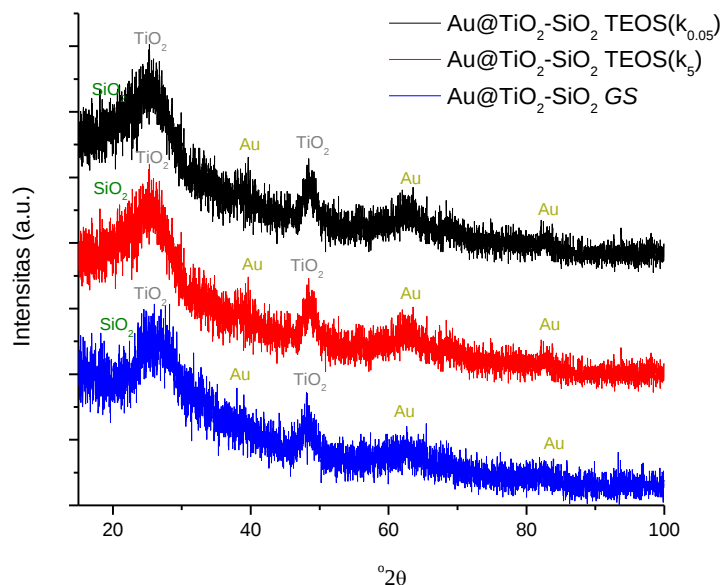
Gambar 4.14 Spektra *photoluminescence* (PL) material Au-SiO₂ *microsheet* variasi silika (a) TEOS dan (b) GS.

Puncak pada intensitas 445nm menunjukkan puncak PL dari material Au akibat dari efek LSPR. Hal ini didukung oleh penelitian Yang dkk, yang menyebutkan bahwa puncak emisi Au dengan ukuran partikel 100nm berada pada panjang gelombang 440nm, sedangkan untuk ukuran dibawahnya tidak ditemukan adanya puncak di panjang gelombang yang sama. Selain itu, puncak Au juga dapat ditemukan pada panjang gelombang 525nm. Sedangkan pada penelitian ini puncak tersebut tidak ditemukan namun muncul puncak pada panjang gelombang 492 nm yang mengindikasikan adanya pergeseran puncak Au (Yang dkk., 2012).

Pada penelitian sebelumnya, Rahman dkk. menunjukkan pengaruh ukuran silika terhadap kenaikan intensitas PL, yaitu semakin kecil partikel silika akan meningkatkan intensitas PL. pada penelitian ini, fotoanoda Au-SiO₂ dengan material silika dari prekursor TEOS memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan silika *glass sphere*. Hal ini diindikasikan bahwa ukuran silika TEOS ~680nm akan meningkatkan intensitas PL dibandingkan dengan silika GS yang berukuran lebih besar yaitu ~6500nm.

4.2.2 Material Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet*

Pola XRD modifikasi fotoanoda Au@TiO₂-SiO₂ ditunjukkan pada gambar 4.15. Hasil menunjukkan puncak utama SiO₂ pada masing-masing sampel berada pada $2\theta = 22,17^\circ$ kemudian puncak tertinggi TiO₂ anatase pada $2\theta = 25,17^\circ$ dan diikuti oleh puncak kedua pada $2\theta = 48,64^\circ$ dengan orientasi bidang masing-masing yaitu (101) dan (200). Selanjutnya terlihat adanya tiga puncak yang diketahui milik Au dengan puncak utama pada $2\theta = 39,69^\circ$ dengan orientasi bidang (111). Selanjutnya muncul puncak dengan intensitas rendah pada $2\theta = 62,78^\circ$ dan $2\theta = 83,09^\circ$ dengan orientasi bidang (200) dan (311). Hasil XRD pada modifikasi material fotoanoda struktur lapisan ini menunjukkan adanya perbedaan intensitas puncak Au.

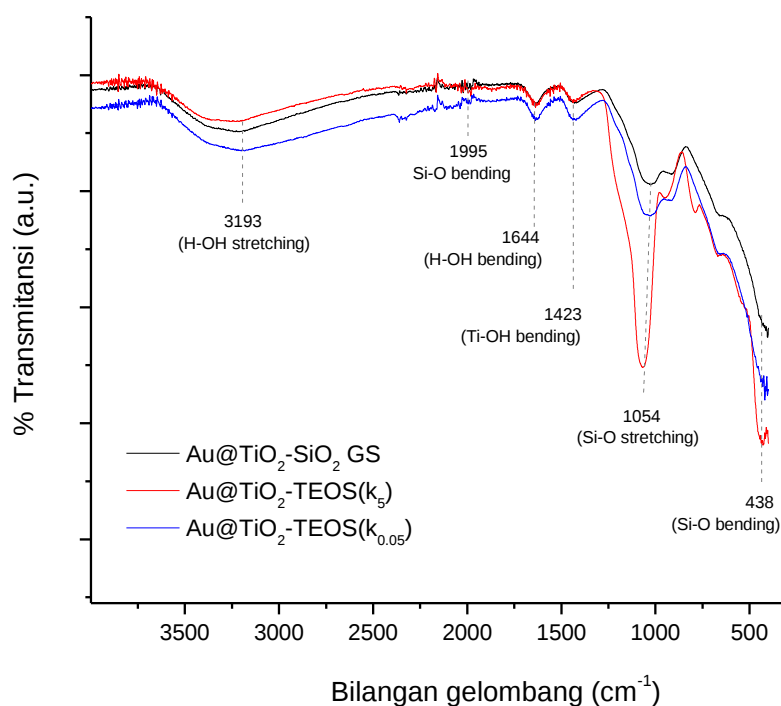


Gambar 4.15 Pola XRD $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$ TEOS dengan variasi ukuran SiO_2 TEOS dan SiO_2 *glass sphere*.

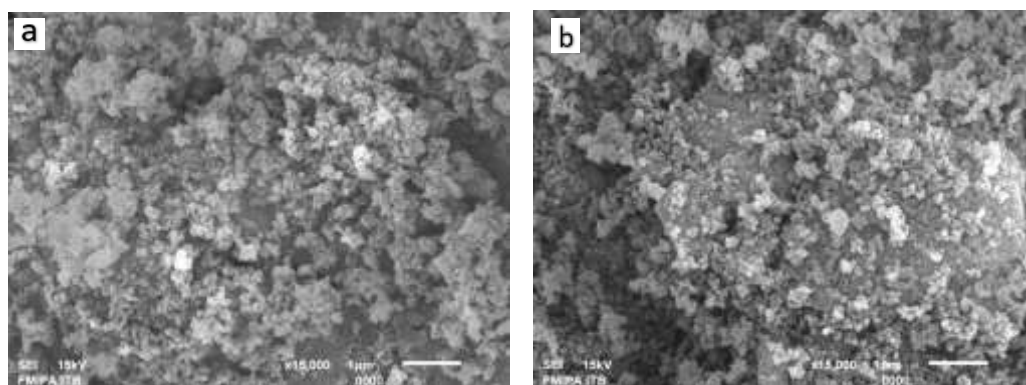
Pada subbab sebelumnya diketahui bahwa struktur Au-SiO_2 cenderung memiliki intensitas puncak Au yang rendah. Sedangkan untuk struktur $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$, puncak difraksi Au memiliki intensitas yang lebih tinggi dan terlihat di tiga puncak pada masing-masing variasi sampel. Hal ini mengindikasikan bahwa $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan fraksi volume yang sama pada struktur *core-shell* berhasil terbentuk.

Hasil FTIR pada gambar 4.16 menunjukkan sampel $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan SiO_2 prekursor TEOS penambahan katalis 5mM memiliki puncak yang tajam pada ikatan Si-O stretching . Hal ini mengindikasikan bahwa ikatan antar atom pada SiO_2 lebih *rigid*, terjadi ikatan dengan atom lainnya, dibandingkan dengan puncak gugus fungsi nanopartikel SiO_2 TEOS 0.05mM dan SiO_2 *glass sphere*. Sama halnya dengan modifikasi fotoanoda struktur dua lapis, pada struktur tiga lapis juga tidak dijumpai puncak vibrasi seharusnya menunjukkan adanya nanopartikel Au yang berikatan dengan silika yang ditentukan dari *stretching vibration* ikatan Si-O-M pada bilangan gelombang $960\text{-}970 \text{ cm}^{-1}$ disebabkan lapisan TiO_2 dan SiO_2 yang melapisi Au terlalu tebal. Hal ini dapat dibuktikan

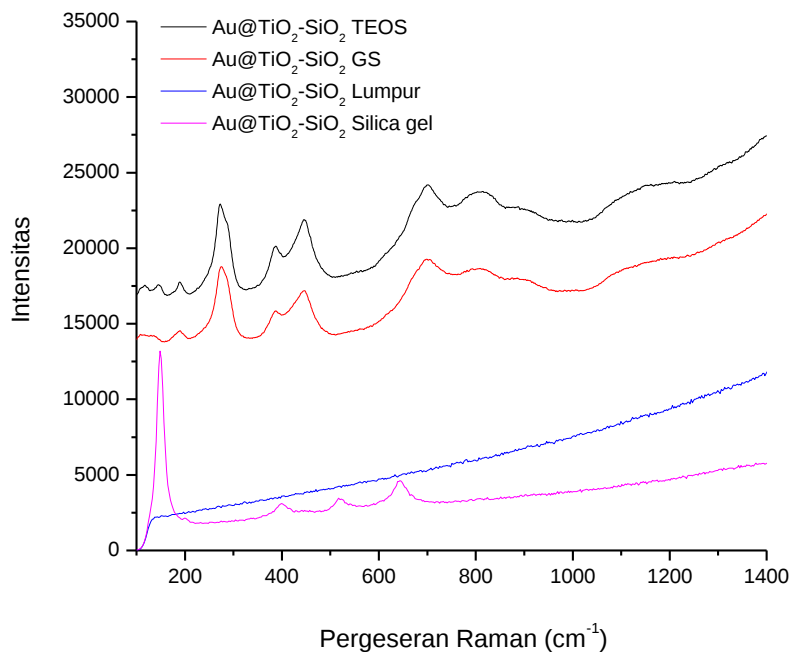
dengan Morfologi material Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet* ditunjukkan pada gambar 4.17. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel Au terlingkupi oleh nanopartikel TiO₂ sehingga Au tidak terlihat. Sedangkan *silicate microsheet* menempel pada material TiO₂ dan menyebar pada seluruh permukaan TiO₂ yang terlihat pada bagian terluar.



Gambar 4.16 Hasil FTIR spectra Au@TiO₂-SiO₂ TEOS dengan variasi ukuran SiO₂ TEOS dan SiO₂ *glass sphere*.

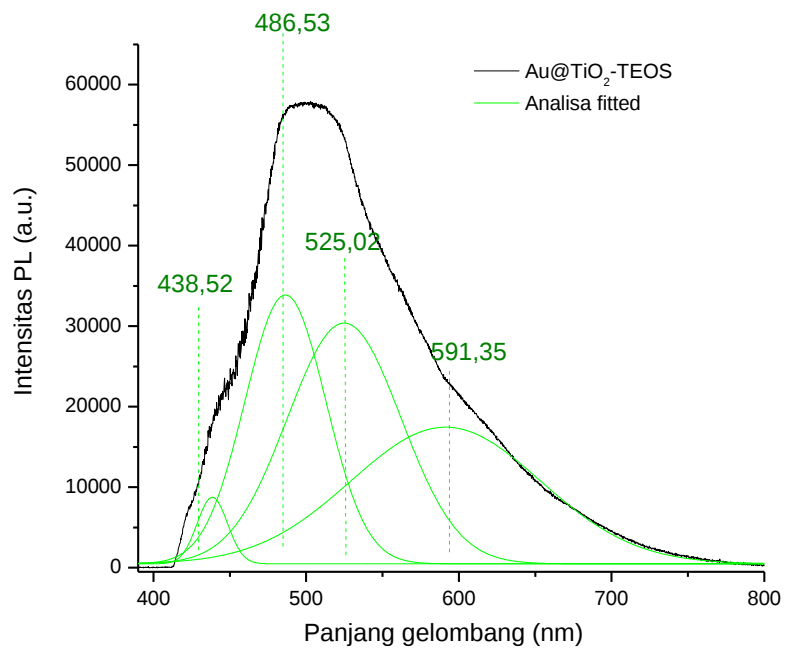


Gambar 4.17 Hasil SEM material fotoanoda Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet* (a) variasi volume Au 30ml (b) variasi volume Au 60ml.

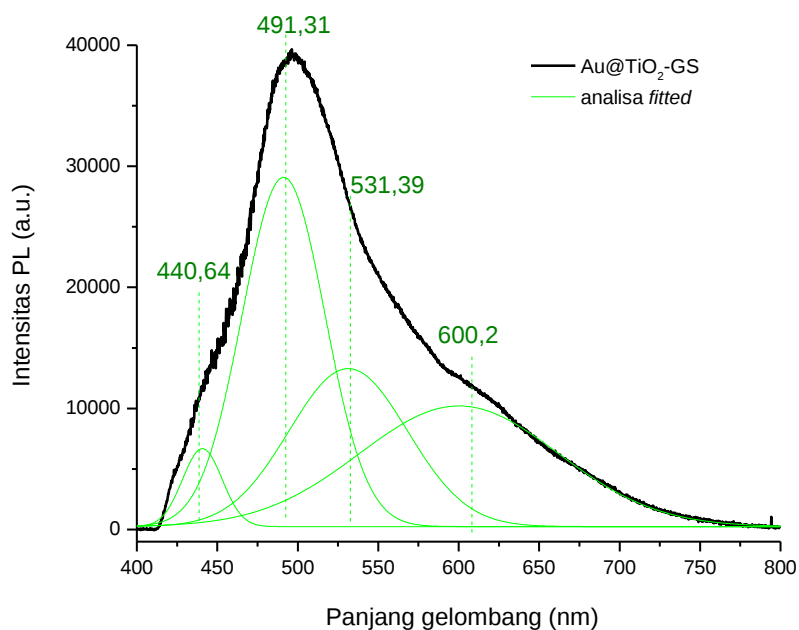


Gambar 4.18 Hasil uji Raman pada fotoanoda Au@TiO₂-SiO₂ microsheet dengan variasi jenis silika.

Gambar 4.18 menunjukkan spektra raman material fotoanoda struktur Au@TiO₂-SiO₂ dengan variasi jenis silika. Spektra raman struktur tiga lapis dengan variasi silika TEOS dan GS memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi silika gel maupun lumpur yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya, Paramudita, 2018. Keduanya memiliki karakteristik yang identik pada puncak utama di panjang gelombang 272 cm⁻¹ (mode B_{1g}), 448 cm⁻¹ (mode A_{1g}/B_{1g}), dan 700 cm⁻¹ (mode E_g) yang masing-masing menunjukkan puncak TiO₂. Mode E_g adalah *asymmetric bending* dari ikatan O–Ti–O, Sedangkan mode A_{1g} merupakan *symmetric stretching* dari ikatan O–Ti–O. Intensitas puncak Raman meningkat dengan adanya Au akibat dari peningkatan medan elektromagnetik. Hal ini berkesesuaian dengan penelitian sebelumnya bahwa penambahan material Au tidak menyebabkan transisi fase apapun terhadap TiO₂ melainkan hanya meningkatkan intensitas puncak Raman (Lim dkk., 2015).



(a)

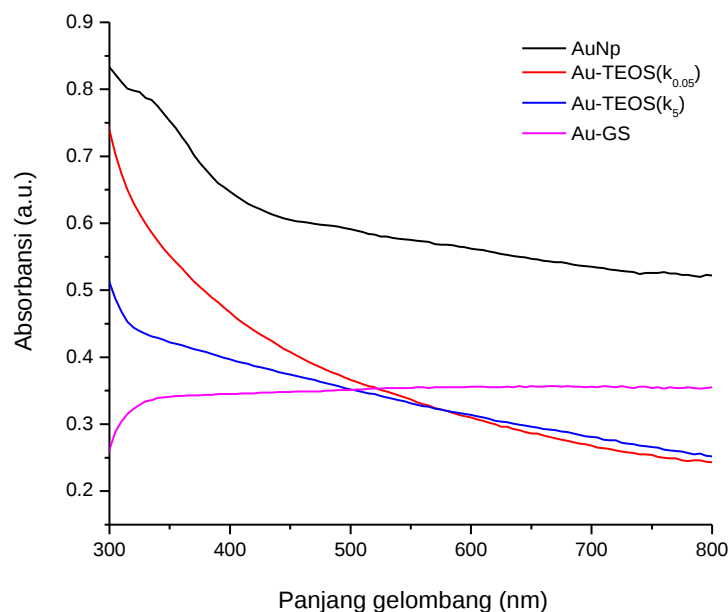


(b)

Gambar 4.19 Spektra photoluminescence (PL) untuk material Au@TiO₂-SiO₂ microsheet variasi silika (a) TEOS dan (b) GS.

Gambar 4.19 menunjukkan spektra *photoluminescence* pada fotoanoda Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet* dengan variasi silika prekursor TEOS dan silika *glass sphere*. Pada masing-masing sampel menunjukkan adanya perbedaan intensitas pada puncak fitted panjang gelombang 486,53nm dan 491,31nm yang merupakan puncak PL material SiO₂. Sedangkan pada dua puncak *fitted* 438,52 dan puncak *fitted* 591,35 merupakan puncak PL Au (Rahman dkk., 2009 & Yang dkk., 2012). Hasil pengujian PL pada struktur tiga lapis ini tidak menunjukkan adanya pergeseran puncak yang signifikan dibandingkan dengan struktur dua lapis. Namun, terlihat adanya puncak baru yaitu pada analisa *fitted* pada panjang gelombang 525,02nm dan 531,39nm yang diduga milik puncak PL material TiO₂.

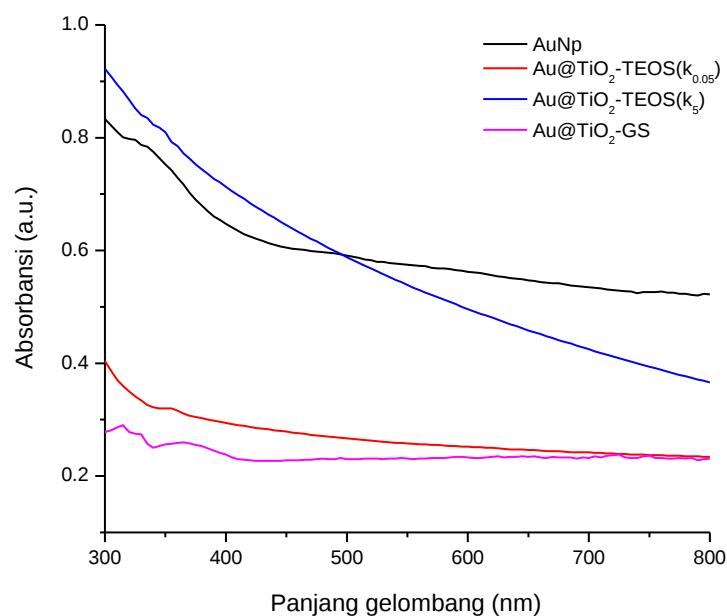
4.2.3 Sifat Optis Material Fotoanoda Struktur Lapis



Gambar 4.20 Hasil UV-Vis dari Au-SiO₂ dengan variasi silika.

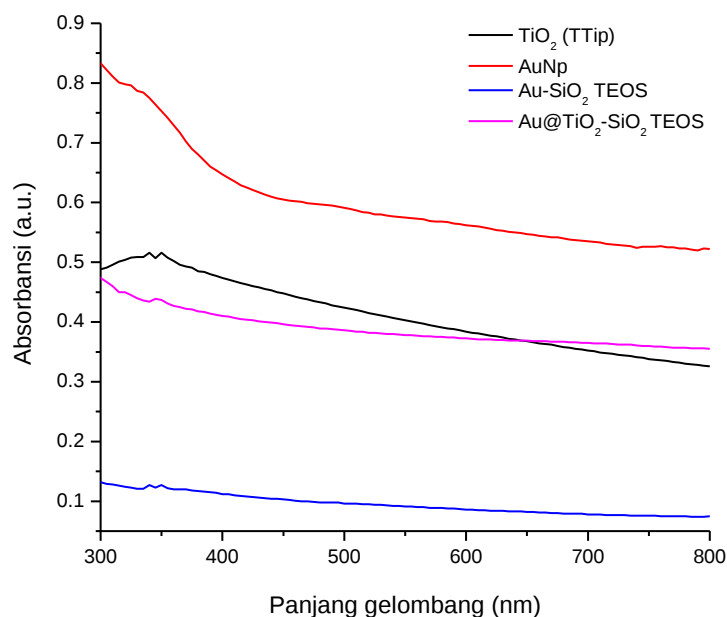
Kemampuan absorbansi pada material fotoanoda Au-SiO₂ tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada sampel SiO₂ saja. Hal ini ditunjukkan dengan adanya absorbansi pada panjang gelombang yang sama yaitu pada 320nm yang merupakan milik SiO₂ prekursor TEOS yang ditunjukkan pada gambar 4.20. Hasil pengujian UV-Vis material SiO₂ GS sebelumnya tidak

mengindikasikan adanya absorbansi pada panjang gelombang 300-330nm, hal ini juga dialami pada material Au-SiO₂ GS. Selain itu, pada ketiga material Au-SiO₂ tidak dapat ditemui puncak LSPR pada nanopartikel emas di sekitar panjang gelombang sekitar 500 nm – 550 nm.



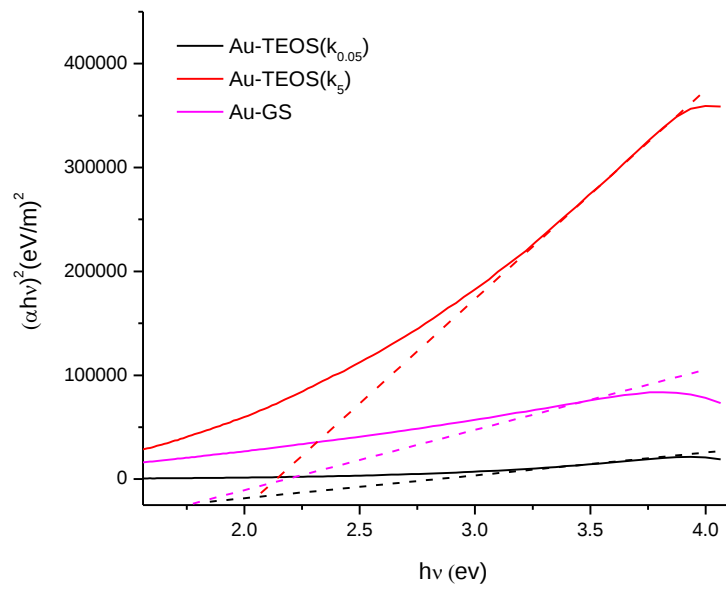
Gambar 4.21 Hasil UV-Vis dari Au@TiO₂-SiO₂ dengan variasi silika.

Pengujian UV-Vis juga dilakukan pada material fotoanoda dengan struktur lapis Au@TiO₂-SiO₂. Berdasarkan dari hasil pengujian UV-Vis pada gambar 4.21., terlihat bahwa pada struktur 3 lapis diketahui tidak mengindikasikan adanya absorbansi LSPR material Au. Adapun absorbansi yang terlihat hanya pada panjang gelombang 320nm yang merupakan milik material SiO₂. Selanjutnya pada material fotoanoda untuk kedua variasi struktur lapis dengan penambahan volume Au 60ml menunjukkan hasil yang menyerupai hasil pada volume Au 30ml yang dibuktikan dengan gambar 4.22. Perbedaan yang tampak adalah pada intensitas absorbansi yang terbentuk. Hasil penambahan volume Au 60ml pada kedua struktur lapis menunjukkan penurunan intensitas absorbansi bahkan cenderung tidak ada serapan. Hal ini dimungkinkan oleh Au yang terlingkupi oleh lapisan TiO₂.

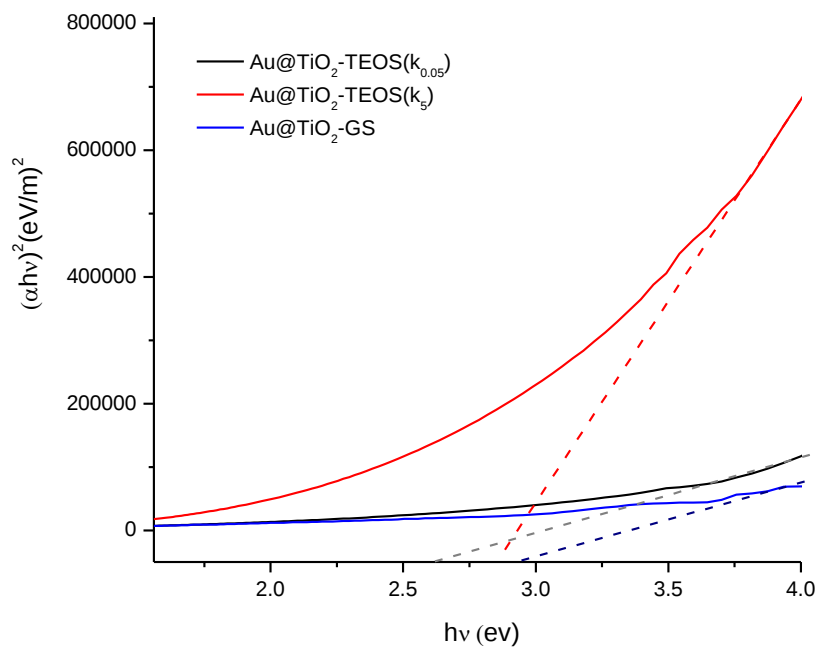


Gambar 4.22 Hasil UV-Vis material fotoanoda variasi struktur lapis dengan penambahan volume Au 60ml.

Gambar 4.23 (a) menampilkan *Tauc plot* untuk sampel dengan variasi 2 lapis, Au-SiO₂, dan (b) variasi tiga lapis, Au@TiO₂-SiO₂. Hasil *tauc plot* untuk sampel pada penambahan SiO₂ prekursor TEOS dengan ukuran yang lebih besar didapatkan celah energi yang lebih besar pada struktur dua lapis dan menyempit pada struktur tiga lapis. Adapun SiO₂ prekursor TEOS dengan ukuran yang lebih kecil didapatkan hasil yang berkebalikan yaitu celah energi cenderung menyempit pada struktur dua lapis dan melebar pada struktur tiga lapis. Masing-masing data analisa tersebut disajikan pada tabel 4.3.



(a)



(b)

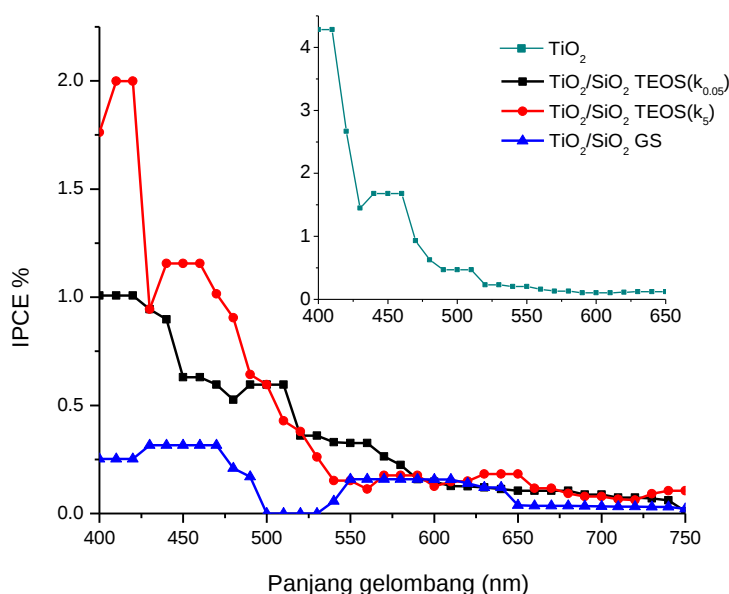
Gambar 4.23 Hasil Tauc Plot (a) Au-SiO₂ variasi ukuran TEOS dan GS, (b) Au@TiO₂-SiO₂ prekursor TEOS dengan variasi ukuran silika.

Tabel 4.3 Lebar celah optik dan energi *urbach plot* material fotoanoda dengan variasi struktur lapisan.

Sampel	Lebar celah optik E_g (eV)	Energi <i>Urbach</i> E_u (eV)
Au-SiO ₂ TEOS($k_{0,05}$)	1,84	3,09
Au-SiO ₂ TEOS(k_5)	2,03	7,49
Au-SiO ₂ GS	1,98	16,23
Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS($k_{0,05}$)	3,59	4,43
Au@TiO ₂ -SiO ₂ TEOS(k_5)	2,69	3,31
Au@TiO ₂ -SiO ₂ GS	2,92	9,91

4.3 Performansi DSSC

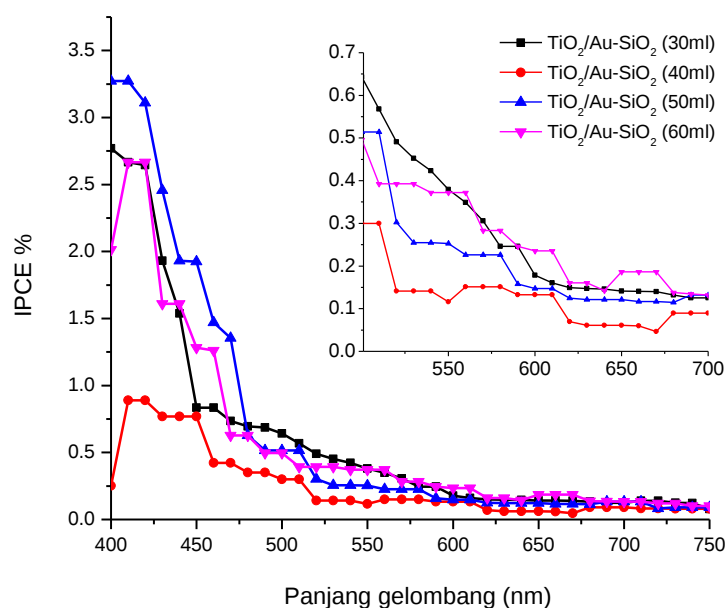
Performansi DSSC untuk semua sampel pada penelitian ini akan diketahui melalui hasil pengukuran IPCE. Nilai IPCE menunjukkan proses transfer elektron dari pewarna ke semikonduktor dan dari I⁻ yang teroksidasi ke pewarna. Semakin besar nilai IPCE menunjukkan bahwa transfer elektron berlangsung secara efektif dan ketika nilai IPCE mencapai 100%, semua foton yang diserap oleh pewarna akan diubah menjadi arus (Qi dkk, 2011., Varghese & Grimes, 2008).



Gambar 4.24 Hasil IPCE fotoanoda dasar TiO₂ dan SiO₂ variasi TEOS dan GS.

Gambar 4.24 menunjukkan hasil IPCE pada variasi SiO_2 dengan fotoanoda dasar TiO_2 sebagai pembanding. DSSC untuk fotoanoda dasar TiO_2 menunjukkan presentasi IPCE yang tinggi pada rentang panjang gelombang 400nm-450nm. Variasi ukuran SiO_2 prekursor TEOS menunjukkan adanya kecenderungan pada peningkatan presentase DSSC yang dihasilkan bahwa semakin besar ukuran silika pada orde nano mampu meningkatkan presentase DSSC pada rentang panjang gelombang 400nm-650nm. Selain itu, SiO_2 dengan ukuran yang lebih besar memiliki kecenderungan puncak pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar.

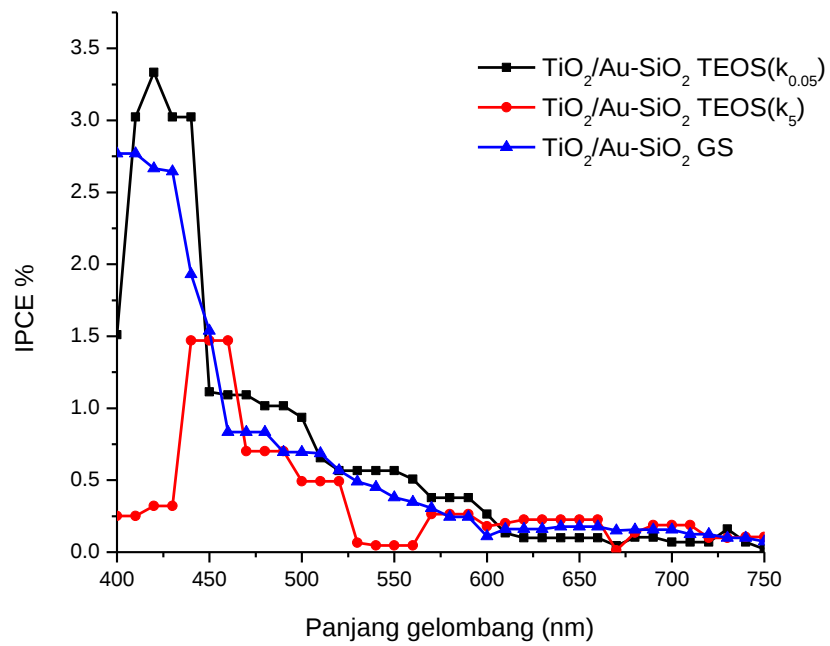
Pada DSSC dengan penambahan SiO_2 diketahui pada masing-masing sampel variasi memiliki persentase yang tinggi pada panjang 400nm – 450nm yang mengndikasikan puncak dari fotoanoda dasar TiO_2 . Selanjutnya tampak adanya persentase IPCE sekitar panjang gelombang 600nm yang mengindikasikan puncak dari SiO_2 . Berdasarkan hasil uji UV-vis, tidak terjadi adanya puncak pada panjang gelombang di sekitar 500 nm. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh dari penyerapan pewarna N719 yang umumnya muncul pada panjang gelombang 530nm (Sheehan dkk., 2013).



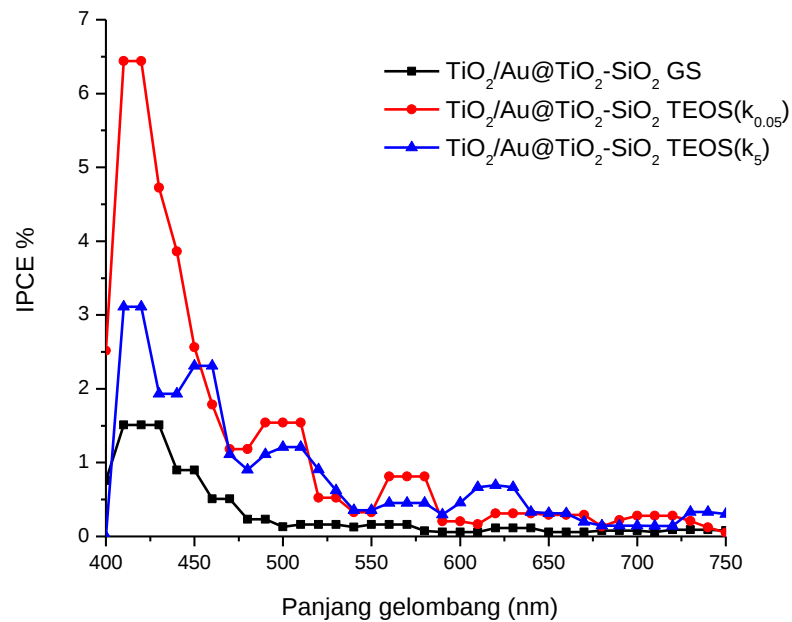
Gambar 4.25 Hasil IPCE modifikasi fotoanoda struktur Au-SiO_2 *glass sphere* untuk variasi volume Au.

Hasil IPCE untuk variasi penambahan volume Au (30ml-60ml) pada struktur fotoanoda Au-SiO₂ GS disajikan pada gambar 4.25. presentase IPCE tertinggi pada masing-masing sampel tersebut menunjukkan intensitas puncak yang tinggi pada rentang 400-450nm yang merupakan puncak fotoanoda dasar TiO₂. Selain itu terdapat puncak yang muncul pada rentang panjang gelombang 600nm-680nm. López-muñoz, dkk, melaporkan bahwa ukuran emas dengan diameter 16nm-120nm menunjukkan pergeseran puncak penyerapan pada panjang gelombang 520nm-590nm. Sedangkan pada penelitian ini digunakan diameter ukuran Au sebesar 150nm sehingga mengindikasikan bahwa puncak serapan Au terjadi pada panjang gelombang 590-630nm.

Hasil IPCE dengan modifikasi struktur lapis Au@TiO₂-SiO₂ menunjukkan presentase IPCE tertinggi dibandingkan dengan struktur Au-SiO₂. Hal ini dibuktikan pada gambar 4.26 (b). Adanya struktur *core-shell* Au@TiO₂ meningkatkan presentase IPCE pada rentang panjang gelombang 400nm-700nm dengan puncak tertinggi berada pada 430nm. Pada kedua variasi struktur lapis menunjukkan presentase IPCE terendah dimiliki oleh SiO₂ *glass sphere*. Sedangkan pada penambahan SiO₂ prekursor pada masing-masing variasi struktur lapis memiliki perbedaan intensitas presentase DSSC seperti yang terlihat pada gambar 4.26 (a) dan (b). Struktur fotoanoda Au-SiO₂ memiliki puncak IPCE tertinggi dimiliki oleh silika TEOS dengan ukuran yang lebih kecil. Sedangkan pada struktur Au@TiO₂-SiO₂, presentase tertinggi cenderung dimiliki oleh silika TEOS dengan ukuran yang lebih besar.



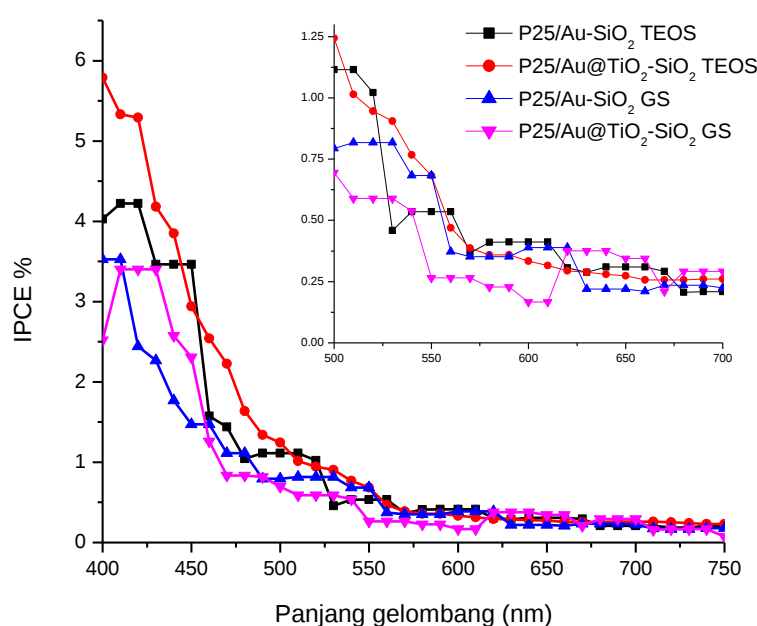
(a)



(b)

Gambar 4.26 Hasil IPCE DSSC dengan modifikasi struktur fotoanoda (a) Au-SiO₂ dan (b) Au@TiO₂-SiO₂.

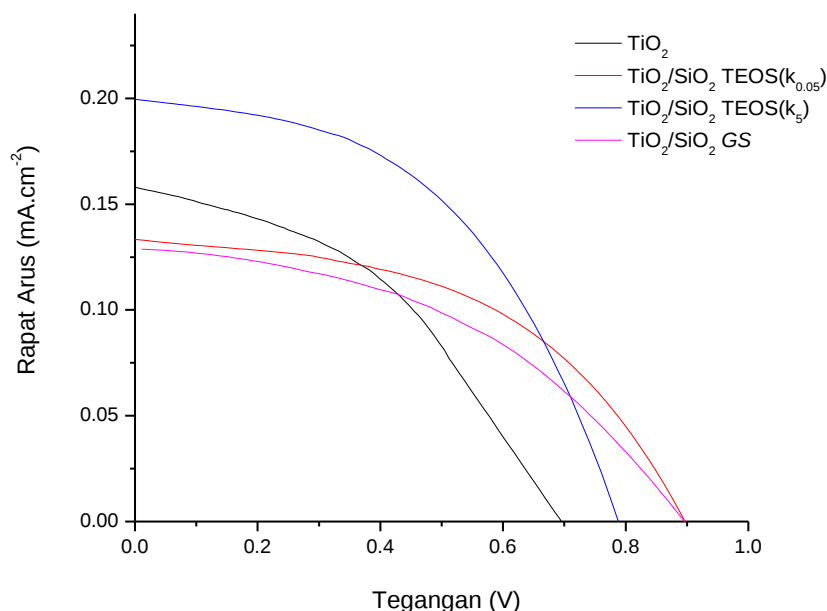
Pengujian IPCE pada penambahan struktur lapis dilakukan tidak hanya pada TiO_2 dari prekursor TiCl_3 , tetapi juga pada fotoanoda P25 degussa komersil. Hasil menunjukkan bahwa penambahan struktur $\text{Au@TiO}_2\text{-SiO}_2$ mampu meningkatkan presentase IPCE dengan luasan serapan pada panjang gelombang yang lebih lebar dibuktikan dengan gambar 4.27.



Gambar 4.27 Hasil IPCE DSSC dengan variasi struktur lapisan pada Fotoanoda dasar P25 Degussa.

Setelah diperoleh analisa hasil pengujian IPCE, selanjutnya dilakukan pengukuran rapat arus–tegangan (J_{sc} - V_{oc}) untuk mengetahui efisiensi DSSC yang dihasilkan pada semua sampel. Gambar 4.28 menunjukkan hasil performansi DSSC pada fotoanoda dengan penambahan variasi silika TEOS dan *glass sphere*. Performansi terbaik untuk variasi penambahan silika diperoleh material SiO_2 prekursor TEOS penambahan katalis 5mM dengan nilai efisiensi 0,076%. Sedangkan pada penambahan SiO_2 GS menunjukkan peningkatan V_{oc} namun menurunkan J_{sc} . Performansi DSSC dengan fotoanoda TiO_2 murni, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ TEOS, dan $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ GS disajikan pada Tabel 4.4. Hasil pengujian menunjukkan

bahwa penambahan SiO_2 sebanyak 1% pada fotoanoda, menggunakan SiO_2 TEOS maupun SiO_2 GS mampu meningkatkan daya dan efisiensi DSSC.



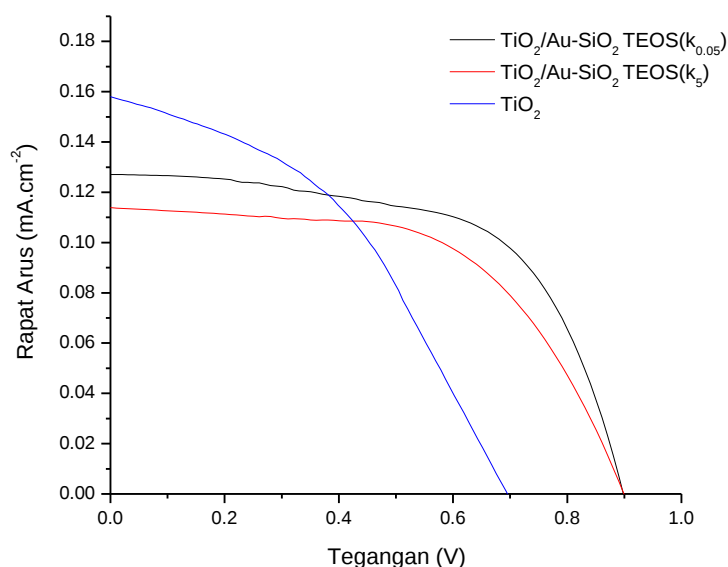
Gambar 4.28 Rapat arus – tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda variasi Silika TEOS dan *glass sphere*.

Tabel 4.4 Performansi DSSC fotoanoda dasar TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ TEOS variasi penambahan katalis dan $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ *glass sphere*.

Sampel	V_{oc}	J_{sc}	P_{max}	FF	η
	(V)	(mA/cm^2)	(mW)	(%)	(%)
TiO_2	0,693	0,158	0,012	42,226	0,046
$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2\text{TEOS}(k_{0.05})$	0,891	0,134	0,015	49,458	0,059
$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2\text{ TEOS}(k_5)$	0,781	0,120	0,019	48,791	0,076
$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2\text{ GS}$	0,899	0,132	0.018	48,110	0,074

Grafik rapat arus-tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ TEOS variasi penambahan katalis 0.05mM dan 5mM terdapat pada gambar 4.20. Hasilnya menunjukkan bahwa J_{sc} dengan efisiensi tertinggi yaitu 0,069% dimiliki oleh sampel dengan penambahan katalis 0.05mM dibandingkan dengan penambahan katalis 5mM. Hasil karaterisasi Au- SiO_2 TEOS variasi penambahan

katalis menunjukkan pengaruh pada ukuran partikel SiO_2 yang dihasilkan. Sehingga pada penelitian ini, untuk variasi SiO_2 prekursor TEOS memiliki performansi terbaik pada ukuran yang lebih kecil untuk modifikasi fotoanoda struktur Au- SiO_2 .



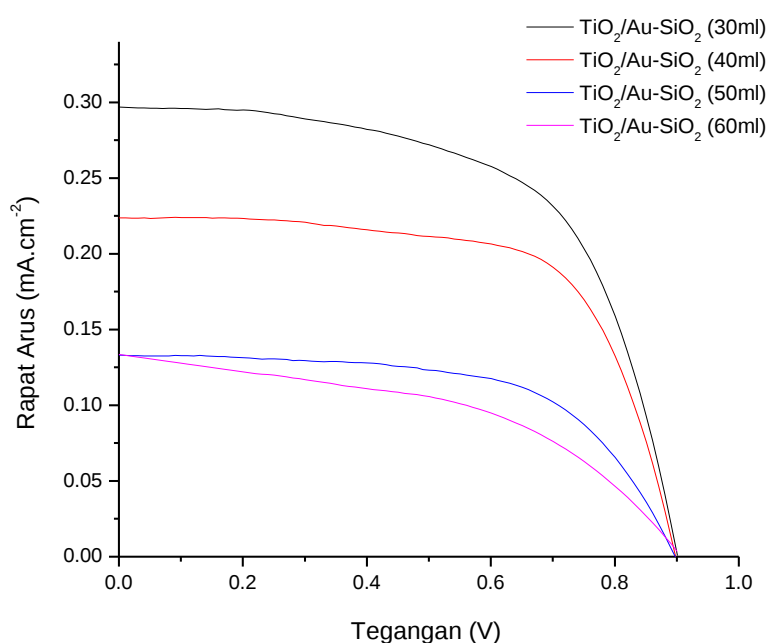
Gambar 4.29 Rapat arus – tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ TEOS variasi penambahan katalis.

Tabel 4.5 Performansi DSSC fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ TEOS variasi penambahan katalis.

Sampel	V_{oc}	J_{sc}	P_{max}	FF	η
	(V)	(mA/cm^2)	(mW)	(%)	(%)
TiO_2	0,693	0,158	0,012	42,23	0,046
$\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ TEOS($k_{0.05}$)	0,891	0,127	0,017	60,94	0,069
$\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ TEOS(k_5)	0,891	0,120	0,016	59,62	0,064

Gambar 4.30 menunjukkan grafik rapat arus - tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ *glass sphere* variasi volume Au. Hasilnya menunjukkan bahwa J_{sc} tertinggi diperoleh pada penambahan volume Au 30ml. Pada Tabel 4.6. menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi dicapai pada penambahan Au 30ml yaitu 0,163%. Hal ini berkesesuaian dengan penelitian sebelumnya (Paramudita, 2018),

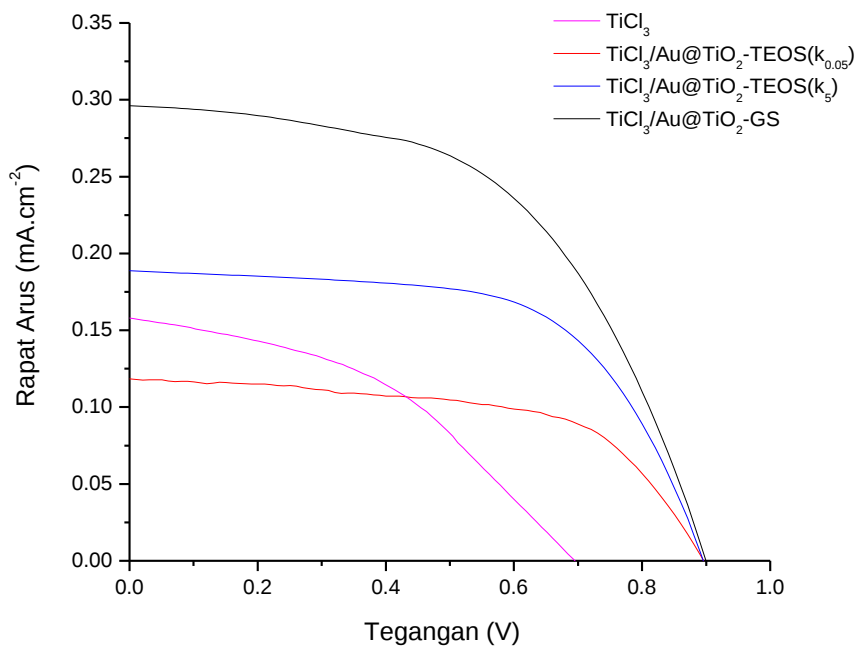
bahwa penambahan volume Au yang terlalu banyak akan menurunkan J_{sc} dan V_{oc} yang berakibat rendahnya efisiensi. Hal ini disebabkan oleh kelebihan nanopartikel Au yang berakibat pada meningkatnya rekombinasi antara elektron dan hole karena berkurangnya jumlah carrier untuk membangkitkan arus. Penurunan efisiensi DSSC dengan penambahan volume Au ini juga dapat disebabkan oleh berkurangnya volume pewarna yang dapat diserap oleh fotoanoda (Zarick dkk., 2016).



Gambar 4.30 Rapat arus – tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au-SiO}_2$ *glass sphere* variasi volume Au.

Tabel. 4.6 Performansi DSSC dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au-glass sphere}$ variasi volume Au

Sampel	V_{oc}	J_{sc}	P_{max}	FF	η
	(V)	(mA/cm^2)	(mW)	(%)	(%)
$\text{TiO}_2/\text{Au-glass sphere}$ 30ml Au	0,681	0,297	0,041	60,79	0,163
$\text{TiO}_2/\text{Au-glass sphere}$ 40ml Au	0,691	0,224	0,033	67,21	0,134
$\text{TiO}_2/\text{Au-glass sphere}$ 50ml Au	0,661	0,133	0,018	61,41	0,073
$\text{TiO}_2/\text{Au-glass sphere}$ 60ml Au	0,611	0,134	0,014	47,40	0,057



Gambar 4.31 Rapat arus - tegangan (J_{sc} - V_{oc}) dengan fotoanoda $TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ TEOS dan $TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ *glass sphere*.

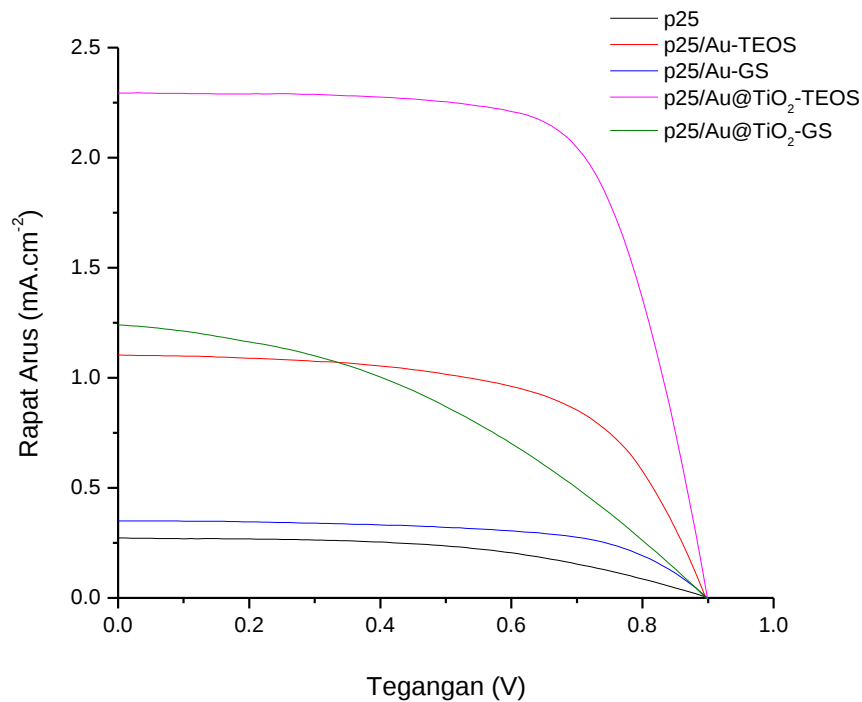
Tabel 4.7 Performansi DSSC dengan fotoanoda $TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ TEOS dan $TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ *glass sphere*.

Sampel	V_{oc}	J_{sc}	P_{max}	FF	η
	(V)	(mA/cm ²)	(mW)	(%)	(%)
TiO_2	0,693	0,158	0,012	42,23	0,046
$TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ K-0.05	0,891	0,118	0,016	59,52	0,063
$TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ K-5	0,891	0,189	0,026	61,33	0,103
$TiO_2/Au@TiO_2-SiO_2$ GS	0.901	0.296	0.035	53,06	0,142

Performansi modifikasi fotoanoda struktur $Au@TiO_2-SiO_2$ dengan material SiO_2 prekursor TEOS dan *glass sphere* disajikan pada gambar 4.31 dan tabel 4.7. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya dan efisiensi tertinggi dimiliki oleh fotoanoda $Au@TiO_2-SiO_2$ *glass sphere* sebesar 0,109mW dan 0,4361%. Sedangkan untuk fotoanoda struktur $Au@TiO_2-SiO_2$ dengan material SiO_2 prekursor TEOS, performansi terbaik dimiliki oleh penambahan katalis pada SiO_2 sebanyak 5mM. Hal ini berkebalikan dengan hasil performansi struktur

fotoanoda Au-SiO₂ TEOS penambahan katalis 0.05mM. Sehingga pada penelitian ini, ukuran SiO₂ yang terbentuk dengan ukuran yang lebih kecil memberikan performansi yang lebih baik dengan struktur Au-SiO₂. Sedangkan pada struktur Au@TiO₂-SiO₂, performansi terbaik dihasilkan oleh penambahan SiO₂ dengan ukuran yang lebih besar.

Performansi DSSC dengan fotoanoda dasar *P25 Degussa* menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi. Hal ini dibuktikan dengan gambar 4.32 yang menunjukkan rapat arus pada variasi lapisan meningkat dibandingkan dengan fotoanoda dasar TiCl₃. Variasi struktur fotoanoda Au@TiO₂-SiO₂ memiliki efisiensi sebesar 1,434% sehingga struktur ini mampu meningkatkan efisiensi sebanyak 10,66% dari fotoanoda dasar P25 tanpa modifikasi.



Gambar 4.32 Rapat arus - tegangan (J_{sc} - V_{oc}) variasi lapisan dengan fotoanoda dasar *P25 Degussa*.

Tabel 4.8 Performansi DSSC dengan variasi lapisan dengan fotoanoda dasar TiO₂ komersil P25 Degussa.

Sampel	V_{oc}	J_{sc}	P_{max}	FF	η
	(V)	(mA/cm ²)	(mW)	(%)	(%)
P25	0,890	0.273	0.031	50.74	0.123
P25/Au-SiO ₂ (TEOS)	0,891	1.104	0.031	50.85	0.124
P25/Au-SiO ₂ (GS)	0.891	0.349	0.055	71.11	0.221
P25/Au@TiO ₂ -SiO ₂ (TEOS)	0,891	2.293	0.359	70.19	1.434
P25/Au@TiO ₂ -SiO ₂ (GS)	0.891	1.24	0.109	39.46	0.436

Performansi DSSC dengan fotoanoda dasar P25 Degussa menunjukkan peningkatan efisiensi pada material Au-SiO₂ dengan silika prekursor TEOS. Faktor yang menyebabkan peningkatan efisiensi DSSC menurut Chen, dkk. adalah elektroda berpori dari TiO fase anatase (~20 nm) karena memiliki luas permukaan internal yang tinggi sehingga dapat memaksimalkan penyerapan molekul pewarna. Peningkatan absorpsi cahaya tersebut akan mempengaruhi arus dan tegangan (I-V) yang dihasilkan. Pertumbuhan porositas TiO₂ yang semakin besar akan menyebabkan elektron transport menjadi lambat dan elektron yang terjebak pada pori TiO₂ akan bereaksi dengan ion I₃⁻ sehingga menimbulkan rekombinasi (Liang dkk., 2006). Ukuran pori TiO₂ yang optimum pada aplikasi DSSC adalah 0,38 hingga 0,4. Porositas yang lebih dari 0,4 dapat menyebabkan penurunan absorpsi cahaya karena penurunan luas permukaan pada penyerapan pewarna dan mempersempit area rentang penyerapan pada panjang gelombang cahaya tampak (Zouhri dkk., 2017).

4.4 Pembahasan

Penelitian ini dilakukan sintesis material fotoanoda dengan variasi struktur Au-SiO₂ *microsheet* dan Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet*. Adapun variasi jenis silika yang digunakan yaitu SiO₂ prekursor TEOS dan SiO₂ komersil *glass sphere*. Pada kedua fotoanoda struktur lapisan diketahui adanya peningkatan performa DSSC apabila dibandingkan dengan fotoanoda dasar tanpa modifikasi. Berdasarkan dari hasil karakterisasi, faktor yang mempengaruhi modifikasi fotoanoda terhadap

peningkatan efisiensi DSSC pada penelitian ini yaitu, ukuran partikel SiO_2 , penambahan volume Au, dan struktur lapis yang digunakan. Variasi ukuran partikel SiO_2 yang dihasilkan dari penambahan katalis pada proses sintesis silika dengan prekursor TEOS dan Silika komersil yaitu *glass sphere* yang dirangkum pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Ukuran SiO_2 pada penambahan modifikasi fotoanoda.

Jenis Silika	Penambahan katalis (mM)	Ukuran (nm)
TEOS	0.05	680
TEOS	5	5.352
<i>Glass sphere</i>	-	6.512

Penambahan silika dengan variasi ukuran yang dihasilkan menunjukkan adanya perbedaan pada peningkatan performansi DSSC. Berdasarkan dari hasil pengujian I-V, ukuran silika yang lebih kecil yaitu SiO_2 TEOS($k_{0.05}$) akan berdampak pada peningkatan performansi untuk fotoanoda struktur Au- SiO_2 dengan efisiensi DSSC 0,069%. Hal ini dikarenakan partikel SiO_2 TEOS($k_{0.05}$) dengan ukuran yang lebih kecil memiliki morfologi bentuk bulat yang homogen sehingga memiliki keuntungan luas permukaannya yang besar. Hal ini akan menghasilkan efisiensi konversi cahaya yang lebih tinggi karena penyerapan pewarna yang lebih banyak (Lim dkk, 2015). Sedangkan ukuran silika yang lebih besar akan meningkatkan efisiensi DSSC apabila diterapkan pada fotoanoda struktur Au@ TiO_2 - SiO_2 dengan efisiensi yang dihasilkan sebesar 1,434%. Hal ini dikarenakan silika dengan ukuran yang lebih besar berperan sebagai penghambur yang baik terhadap struktur *core-shell* Au@ TiO_2 . Dimana TiO_2 berperan sebagai pelindung *core* Au nanopartikel untuk mencegah terjadinya kontak langsung antara Au dan elektrolit yang menyebabkan terjadinya rekombinasi dan korosi yang dapat menurunkan performansi DSSC (Ye et al., 2013).

Penambahan material Au nanopartikel sebagai material plasmonik mampu meningkatkan efisiensi DSSC yang didukung hasil karakterisasi Raman dengan meningkatnya intensitas puncak Raman yang dihasilkan. Namun, melalui variasi

volume Au sebanyak 30 – 60ml dapat diketahui adanya penurunan performansi DSSC seiring dengan penambahan volume Au. Hasilnya menunjukkan bahwa Jsc tertinggi diperoleh pada penambahan volume Au 30ml. Efisiensi tertinggi yang dicapai oleh DSSC dengan modifikasi fotoanoda Au-SiO₂ pada penambahan Au 30ml adalah 0,163%. Penambahan volume Au akan berakibat pada berkurangnya volume pewarna yang dapat diserap oleh fotoanoda (Zarick dkk., 2016). Sehingga pada penelitian ini, penambahan volume Au (> 30ml) pada modifikasi fotoanoda akan menurunkan Jsc dan Voc yang berakibat rendahnya efisiensi.

Penambahan struktur lapis pada modifikasi fotoanoda akan berpengaruh terhadap jalur pemanenan cahaya yang berakibat pada peningkatan performansi DSSC. Skema hamburan cahaya pada penelitian ini terlampir pada Lampiran J. Peningkatan pemanenan cahaya dapat dibuktikan dengan hasil pengujian IPCE bahwa penambahan modifikasi fotoanoda struktur Au@TiO₂-SiO₂ dapat meningkatkan konversi foton-arus sebesar 6,47%, sedangkan untuk modifikasi fotoanoda struktur Au-SiO₂ adalah 3,34%. Selain itu, hasil pengujian IPCE pada keseluruhan penambahan struktur lapis Au@TiO₂-SiO₂ maupun Au-SiO₂ diketahui dapat memperlebar serapan pada panjang gelombang cahaya tampak dibandingkan dengan fotoanoda tanpa modifikasi.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut:

- a. Penambahan volume Au pada material Au-SiO₂ menunjukkan semakin rendahnya absorbansi sehingga mengakibatkan penurunan konversi arus-foton yang dibuktikan dengan rendahnya hasil presentase IPCE. Penambahan nanopartikel Au yang terlingkupi oleh TiO₂ pada struktur Au@TiO₂-SiO₂ mampu meningkatkan intensitas raman akibat adanya efek hamburan dan efek plasmonik dari nanopartikel Au.
- b. Penambahan *silicate microsheet* pada fotoanoda struktur lapis mampu meningkatkan efisiensi DSSC. Hal ini disebabkan oleh faktor ukuran silika yang digunakan. Ukuran silika yang semakin kecil menghasilkan luas permukaan yang besar sehingga meningkatkan kemampuan penyerapan pewarna. Analisa tersebut dibuktikan dengan peningkatan performansi untuk fotoanoda struktur Au-SiO₂ dengan efisiensi DSSC 0.124%. Ukuran silika yang lebih besar memiliki kemampuan efek penghambur yang lebih tinggi sehingga lebih efisien apabila diterapkan pada fotoanoda sruktur Au@TiO₂-SiO₂ dengan efisiensi DSSC yang dihasilkan sebesar 1.434%.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Alagarsamy Pandikumar, Su-Pei Lim, Subramaniam Jayabal, Nay Ming Huang, Hong Ngee Lim, R. R. (2016). *Titania@gold plasmonic nanoarchitectures An ideal photoanode for dyesensitized solar cells* (pp. 408–420). pp. 408–420.
- Bai, L., Li, M., Guo, K., Luoshan, M., Mehnane, H. F., Pei, L., Zhao, X. (2014). Plasmonic enhancement of the performance of dye-sensitized solar cell by core-shell AuNRs@SiO₂ in composite photoanode. *Journal of Power Sources*, 272, 1100–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.083>
- Belahmar, A., & Chouiyakh, A. (2016). Investigation of Surface Plasmon Resonance and Optical Band Gap Energy in Gold / Silica Composite Films Prepared by RF-Sputtering. *Nanoscience and Technology*, 2(2), 81–84.
- Bracho, D., Dougnac, V. N., Palza, H., & Quijada, R. (2012). Functionalization of silica nanoparticles for polypropylene nanocomposite applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/263915>
- Castro, A. L., Nunes, M. R., Carvalho, A. P., Costa, F. M., & Flore, M. H. (2008). Synthesis of anatase TiO₂ nanoparticles with high temperature stability and photocatalytic activity. *Solid State Sciences*, 10, 602–606. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2007.10.012>
- Chen, B. D., Huang, F., Cheng, Y., & Caruso, R. A. (2009). *Mesoporous Anatase TiO₂ Beads with High Surface Areas and Controllable Pore Sizes: A Superior Candidate for High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells*. 2206–2210. <https://doi.org/10.1002/adma.200802603>
- Dong, H., Wu, Z., Lu, F., Gao, Y., El-Shafei, A., Jiao, B., Hou, X. (2014). Optics-electrics highways: Plasmonic silver nanowires@TiO₂ core-shell nanocomposites for enhanced dye-sensitized solar cells performance. *Nano Energy*, 10, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.09.011>
- Duche, D., Torchio, P., Escoubas, L., Monestier, F., Simon, J. J., Flory, F., & Mathian, G. (2009). Improving light absorption in organic solar cells by plasmonic contribution. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(8),

- 1377–1382. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.02.028>
- Falahatdoost, S., Ara, M. H. M., Shaban, Z., & Ghazyani, N. (2015). Optical investigation of shell thickness in light scattering SiO₂ particle with TiO₂nanoshells and its application in dye sensitized solar cells. *Optical Materials*, 47, 51–55. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.06.053>
- Gentilini, D., D’Ercole, D., Gagliardi, A., Brunetti, A., Reale, A., Brown, T., & Di Carlo, A. (2010). Analysis and simulation of incident photon to current efficiency in dye sensitized solar cells. *Superlattices and Microstructures*, 47(1), 192–196. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2009.10.005>
- Grätzel, M. (2003). Dye sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*.
- Grätzel, O. & M. (1999). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films.
- Ibrahim, I. A. M., Zikry, A. A. F., & Sharaf, M. A. (2010). Preparation of spherical silica nanoparticles : Stober silica. 6(11), 985–989.
- Jang, Y. H., Jang, Y. J., Kochuveedu, S. T., Byun, M., Lin, Z., & Kim, D. H. (2014). Plasmonic dye-sensitized solar cells incorporated with Au–TiO₂ nanostructures with tailored configurations. *Nanoscale*, 6(3), 1823–1832. <https://doi.org/10.1039/C3NR05012B>
- Jentoft, F. (2004). Diffuse Reflectance IR and UV-vis Spectroscopy Modern Methods in Heterogeneous Catalysis. *Modern Methods in Heterogeneous Catalysis*, 1–56. <https://doi.org/10.1007/s11064-009-0051-4>
- Ji, X., Song, X., Li, J., Bai, Y., & Yang, W. (2007). Size Control of Gold Nanocrystals in Citrate Reduction : The Third Role of Citrate. (8), 1957–1962.
- Jiang Du, Jian Qi, D. W. and Z. T. (2012). Facile synthesis of Au@TiO₂ core–shell hollow spheres for dye-sensitized solar cells with remarkably improved efficienc. *Energy & Environmental Science*, 6914–6918. <https://doi.org/10.1039/c2ee21264a>
- Karuppuchamy, S., & Jeong, J. M. (2006). Synthesis of Nano-particles of TiO₂ by Simple Aqueous Route. *Journal of Oleo Science*, 55(5), 263–266.
- Kwon, H.-W., Lim, Y.-M., Tripathy, S. K., & Kim, B. (2007). Synthesis of Au /

- TiO₂ Core-Shell Nanoparticles from Titanium Isopropoxide and Thermal Resistance Effect of TiO₂ Shell. *Japanese Journal of Applied Physics*, 46(April), 2567–2570. <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.2567>
- Li, Y., Wang, H., Feng, Q., Zhou, G., & Wang, Z.-S. (2013). Gold nanoparticles inlaid TiO₂ photoanodes: a superior candidate for high-efficiency dye-sensitized solar cells. *Energy & Environmental Science*, 6(7), 2156. <https://doi.org/10.1039/c3ee23971c>
- Liang, L., Dai, S., Hu, L., Kong, F., Xu, W., & Wang, K. (2006). *Porosity Effects on Electron Transport in TiO₂ Films and Its Application to Dye-Sensitized Solar Cells*. 12404–12409.
- Lim, S. P., Pandikumar, A., Lim, H. N., Ramaraj, R., & Huang, N. M. (2015). Boosting Photovoltaic Performance of Dye-Sensitized Solar Cells Using Silver. *Nature Publishing Group*, (April), 1–14. <https://doi.org/10.1038/srep11922>
- López-muñoz, G. A., Pescador-rojas, J. A., Ortega-lopez, J., & Salazar, J. S. (2012). *Thermal diffusivity measurement of spherical gold nanofluids of different sizes / concentrations*. (June 2014). <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-423>
- Malik, R., Chaudhary, V., Tomer, V. K., Rana, P. S., Nehra, S. P., & Duhan, S. (2016). Visible light-driven mesoporous Au-TiO₂/SiO₂ photocatalysts for advanced oxidation process. *Ceramics International*, 42(9), 10892–10901. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.222>
- Nanostructures, S. S., Sheehan, W., Noh, H., Brudvig, G. W., Cao, H., & Schmittenmaer, C. A. (2013). *Plasmonic Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells Using Core – Shell – Shell Nanostructures*.
- Paramudita, I. (2018). Fabrikasi dan Karakterisasi Fotoanoda Struktur Silicate Microsheet dengan Silica Gel dan SiO₂ Hasil Ekstraksi Lumpur Sidoarjo untuk Aplikasi Dye Sensitized Solar Cells. *Master Thesis*.
- Polte, J., Ahner, T. T., Delissen, F., & Sokolov, S. (2010). *Mechanism of Gold Nanoparticle Formation in the Classical Citrate Synthesis Method Derived from Coupled In Situ XANES and SAXS Evaluation*. (9), 1296–1301.
- Rahman, I. A., Sipaut, C. S., & Ismail, J. (2009). *Size-dependent physicochemical*

- and optical properties of silica nanoparticles. (March).
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.09.068>
- Rasalingam, S., Peng, R., & Koodali, R. T. (2014). Removal of hazardous pollutants from wastewaters: Applications of TiO₂-SiO₂ mixed oxide materials. *Journal of Nanomaterials*, 2014(January 2014).
<https://doi.org/10.1155/2014/617405>
- Shah, A. A., Umar, A. A., & Salleh, M. M. (2016). Efficient quantum capacitance enhancement in DSSC by gold nanoparticles plasmonic effect. *Electrochimica Acta*, 195, 134–142.
- Shakeel Ahmad, M., Pandey, A. K., & Abd Rahim, N. (2017). Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(January), 89–108.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.129>
- Son, S., Hwang, S. H., Kim, C., Yun, J. Y., & Jang, J. (2013). Designed synthesis of SiO₂/TiO₂ core/shell structure as light scattering material for highly efficient dye-sensitized solar cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(11), 4815–4820. <https://doi.org/10.1021/am400441v>
- Sun, J., Xu, K., Shi, C., Ma, J., Li, W., & Shen, X. (2017). Influence of core/shell TiO₂@SiO₂ nanoparticles on cement hydration. *Construction and Building Materials*, 156, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.124>
- Tanvi, Mahajan, A., Bedi, R. K., Kumar, S., Saxena, V., & Aswal, D. K. (2016). Efficiency enhancement in dye sensitized solar cells using dual function mesoporous silica as scatterer and back recombination inhibitor. *Chemical Physics Letters*, 658, 276–281. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2016.06.071>
- 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 and Solar Cells*, 92(4), 374–384.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.11.006>
- Wang, Z., Tang, Q., He, B., Chen, H., & Yu, L. (2015a). Efficient dye-sensitized solar cells from curved silicate microsheet caged TiO₂ photoanodes . An

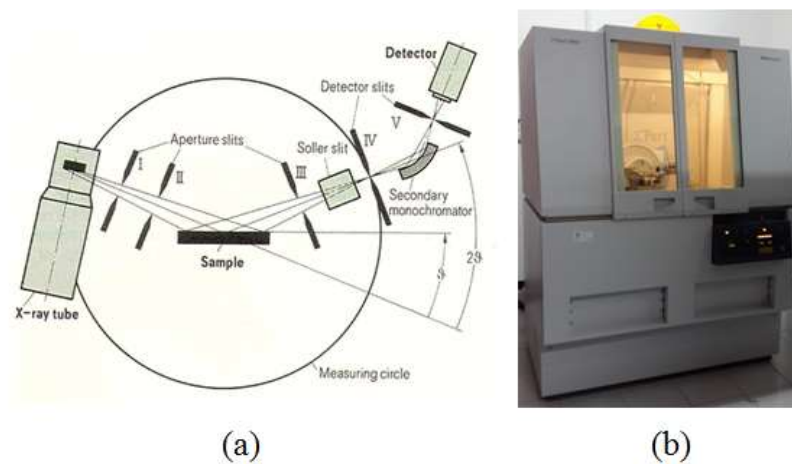
- avenue of enhancing light harvesting. *Electrochimica Acta*, 178, 18–24.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.120>
- Wang, Z., Tang, Q., He, B., Chen, H., & Yu, L. (2015b). Efficient dye-sensitized solar cells from curved silicate microsheet caged TiO₂ photoanodes. An avenue of enhancing Wang, Z., Tang, Q., He, B., Chen, H., & Yu, L. (2015). Efficient dye-sensitized solar cells from curved silicate microsheet caged TiO₂. *Electrochimica Acta*, 178, 18–24.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.120>
- Willems, K. A., & Van Duyne, R. P. (2007). Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing. *Annual Review of Physical Chemistry*, 58(1), 267–297 <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607>
- Yang, A., Li, Y., Zhuo, B., Peng, R., & Zheng, X. (2012). *Study on morphology and photoluminescence of Au / SiO₂ nanocomposite films*. 12, 119–122.
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.05.006>
- Ye, Meidan, Zheng, D., Lv, M., Chen, C., Lin, C., & Lin, Z. (2013). *Hierarchically Structured Nanotubes for Highly Efficient Dye-Sensitized Solar Cells*. 3039–3044. <https://doi.org/10.1002/adma.201205274>
- Ye, Miaomiao, Zhou, H., Zhang, T., Zhang, Y., & Shao, Y. (2013). Preparation of SiO₂@Au@TiO₂ core-shell nanostructures and their photocatalytic activities under visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 226, 209–216.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.064>
- Yukhymchuk, V. O., & Yaremko, A. M. (2010). *Theoretical and experimental Raman study of superlattices with GeSi quantum dots*. (April).
<https://doi.org/10.1140/epjb/e2010-00082-9>
- Zarick, H. F., Erwin, W. R., Boulesbaa, A., Hurd, O. K., Webb, J. A., Puretzky, A. A., Bardhan, R. (2016). Improving Light Harvesting in Dye-Sensitized Solar Cells Using Hybrid Bimetallic Nanostructures. *ACS Photonics*, 3(3), 385–394. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00552>
- Zhang, L., & Wang, Z. S. (2016). Gold nanoparticles as an ultrathin scattering layer for efficient dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(16), 3614–3620. <https://doi.org/10.1039/c6tc00592f>
- Zouhri, K., Alsadi, J., Ferreira, L., Chikhalsouk, M., Shinneeb, M., Koudsi, F.,

Nimir, Y. (2017). Numerical method of the TiO₂ porosity effect on dye sensitized solar cell exergy efficiency. *Solar Energy*, 155, 920–933.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.064>

LAMPIRAN A

X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan alat uji material yang memanfaatkan hamburan sinar-X untuk mengetahui ukuran kristal sekaligus fasa dari sebuah nanopartikel yang berbentuk serbuk. Prinsip kerja pengujian material menggunakan XRD (Gambar A-1) yaitu elektron yang dihasilkan oleh suatu filamen panas dalam keadaan vakum dan pada tegangan tinggi, ditumbukkan pada permukaan logam (Cu) dengan kecepatan tinggi akan menghasilkan sinar-X. Sinar-X tersebut ditembakkan pada sampel uji, sehingga terjadi penyerapan dan hamburan intensitas sinar-X oleh atom-atom dalam material sampel uji. Berkas sinar-X tersebut ada yang saling melemahkan karena fasenya berbeda dan ada yang saling menguatkan karena fasenya sama, sehingga terjadi difraksi ke segala arah. Detektor bergerak sepanjang lintasan 2θ dengan kecepatan sudut konstan untuk mendeteksi berkas-berkas sinar-X yang didifraksikan oleh sampel uji. Grafik karakterisasi sampel uji yang dihasilkan berupa puncak-puncak difraksi dengan intensitas relatif sepanjang nilai 2θ . Pola difraksi tiap padatan kristalin akan berbeda sehingga dapat diketahui material apa saja yang ada pada sampel uji.



Gambar A. (a) Diagram skematik pengujian XRD (b) XRD Philips X'pert MPD

Hasil pengujian XRD ini berupa grafik yang nantinya akan digunakan untuk menghitung ukuran kristal dari nanopartikel dengan menggunakan persamaan Scherrer

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta} \quad (A.1)$$

Keterangan:

- D_{hkl} = rata-rata ukuran butir suatu bahan (nm)
- k = konstanta ($k=0,89$)
- λ = panjang gelombang sinar-X (Cu : 0,154 nm)
- β_{hkl} = FWHM (*Full Width Half Maximum*) (radian)
- θ = sudut Bragg

Hasil pengujian XRD ini juga dapat digunakan untuk menghitung persentase jenis kristal dari nanopartikel dengan menggunakan persamaan RIR (*Reference Intensity Ratio*)

$$\% = \frac{(I/I_{\max})}{\sum(I/I_{\max})} \times 100\% \quad (A.2)$$

Keterangan:

- I = Intensitas dari suatu puncak (cts)
- $I_{\max}$ = Intensitas tertinggi dari seluruh puncak (cts)

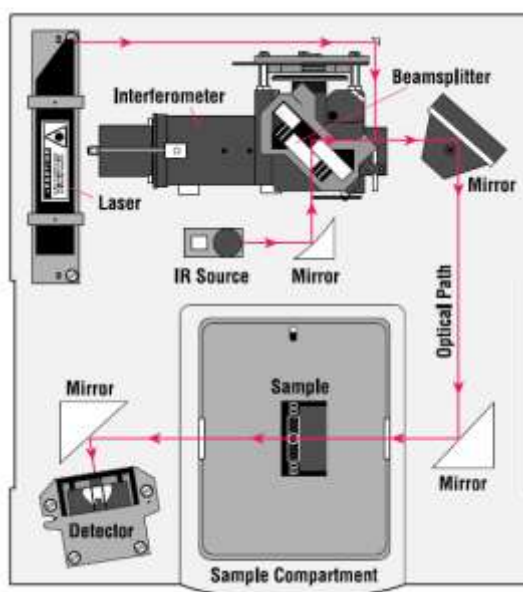
Refrensi :

Cullity, B.D. (1956), "Elements of X-Ray Diffraction". *Indiana*, University of Notre Dame.

LAMPIRAN B

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

Fourier Transform Infra Red (FTIR) adalah suatu pengujian material untuk mengetahui permukaan antarmuka dari sampel dengan menggunakan spektroskopi inframerah. Pengujian ini menggunakan alat Thermo Nicolet i510 yang terdapat di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pada spektroskopi *infrared*, gelombang IR diradiasikan melalui sampel. Sebagian dari radiasi inframerah ini diserap oleh sampel dan sebagian akan ditransmisikan. Hasil spektra yang didapatkan merepresentasikan absorpsi molekular dari sampel. Hasil absorpsi molekular ini bersifat unik dan akan berbeda untuk berbagai sampel. Skema pengujian menggunakan FT-IR dapat dilihat pada Gambar B-1 berikut.



Gambar B. Skema pengujian FT-IR spectrometer

Pada Gambar B merupakan prinsip kerja FT-IR secara umum yakni energi inframerah diemisikan dari *black-body source*. Sinar ini akan melewati sebuah alat yang berguna untuk mengontrol jumlah energi yang dipancarkan ke sampel. Sinar akan masuk ke interferometer dimana *spectral encoding* akan dilakukan. Setelah itu sinar akan masuk dalam tempat sampel dimana berkas sinar ini akan ditransmisikan atau dipantulkan oleh sampel tergantung pada tipe analisis yang digunakan. Pada langkah ini, frekuensi energi yang unik untuk sampel akan

terserap. Selanjutnya berkas sinar akan melewati detektor pada pengukuran akhir. Detektor digunakan untuk mengukur sinyal interferogram khusus. Selanjutnya sinyal pengukuran akan dikirim ke komputer dimana transformasi Fourier akan digunakan untuk mengolah data hasil pengukuran.

Refrensi :

Vallikkodi Mahalingam . (2018). Synthesis, Growth And Characterization Of Piperazinium P- Aminobenzoate And Piperazinium P Chlorobenzoate Nonlinear Optical Single Crystals. Thesis. Alagappa University.

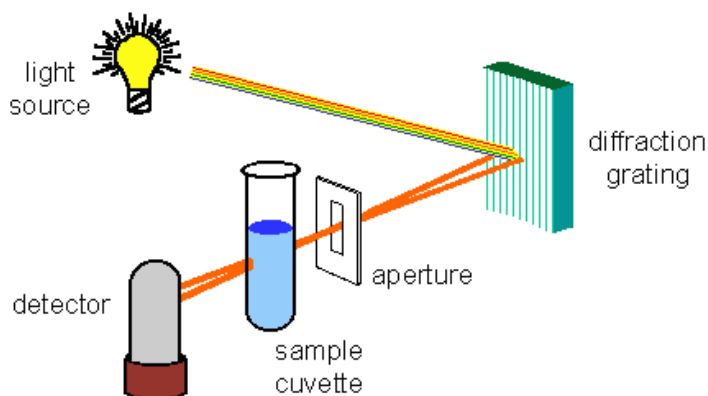
LAMPIRAN C

UV-Vis Spectroscopy

Prinsip kerja UV-Vis *spectrophotometer* ditunjukkan pada gambar E yaitu, cahaya tampak atau UV-Vis ditembakkan ke sampel, yang dilewatkan monokromator. Cahaya monokromatis tersebut akan ditransmisikan dan diserap. Cahaya yang diserap akan menghasilkan signal elektrik pada detektor. Nilai dari adsorbansi berbanding terbalik dengan nilai transmisi. Nilai adsorpsi bergantung pada jumlah molekul dari larutan, sesuai dengan hukum Lambert Beer.

$$A = \epsilon \cdot a \cdot b \quad (E.1)$$

A adalah absorbansi, ϵ adalah absorptivitas (absorban larutan 1 M dalam sel cuvet dengan lebar 1 cm), a adalah ketebalan larutan (cm), dan b adalah konsentrasi larutan (M). Hasil dari pembacaan spektrum adsorbansi dari pengujian UV-Vis *spectrophotometer* berupa panjang gelombang yang diadsorpsi.



Gambar C. Diagram skematik pengujian UV-Vis spectrophotometer.

Refrensi :

Vallikkodi Mahalingam . (2018). Synthesis, Growth And Characterization Of Piperazinium P- Aminobenzoate And Piperazinium P Chlorobenzoate Nonlinear Optical Single Crystals. Thesis. Alagappa University.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN D

Particle Size Analyzer (PSA)

Pengujian PSA dilakukan untuk mengetahui ukuran partikel pada *core-shell*. Prinsip kerja dari alat ini yaitu menggunakan prinsip *dynamic light scattering* dengan memanfaatkan hamburan sinar akibat partikel yang mengalami pergerakan secara acak. Alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah alat dari Malvern yaitu Zetasizer (Gambar D). Alat ini digunakan untuk mengukur partikel dengan range ukuran dari 1 nm sampai dengan 1 μm . Pengujian ini hanya bisa dilakukan pada sampel yang terdispersi dan tidak sesuai pada sampel kering (*dry sample*).



Gambar D. Malvern Zetasizer.

Secara singkat, tahapan dalam pengujian untuk mendapatkan ukuran partikel melalui proses pengukuran pada hamburan sinar dinamik, antara lain: (i) Sampel yang telah terdispersi dalam pelarut diletakkan di dalam cuvet dan dimasukkan ke dalam alat. (ii) Sumber cahaya monokromatik ditembakkan pada sampel yang diuji. (iii) Partikel yang mengalami gerak *Brownian* akan menyebabkan hamburan pada sinar yang ditembakkan. Hamburan ini yang akan ditangkap oleh detektor dan akan diolah hingga mendapatkan nilai diameter dari partikel sampel yang diuji.

Referensi:

R, Alan. (2005). Basic Principles Of Particle Size Analysis. Malvern Instruments Limited, Enigma Business Park, Grovewood Road, Malvern, Worcestershire.

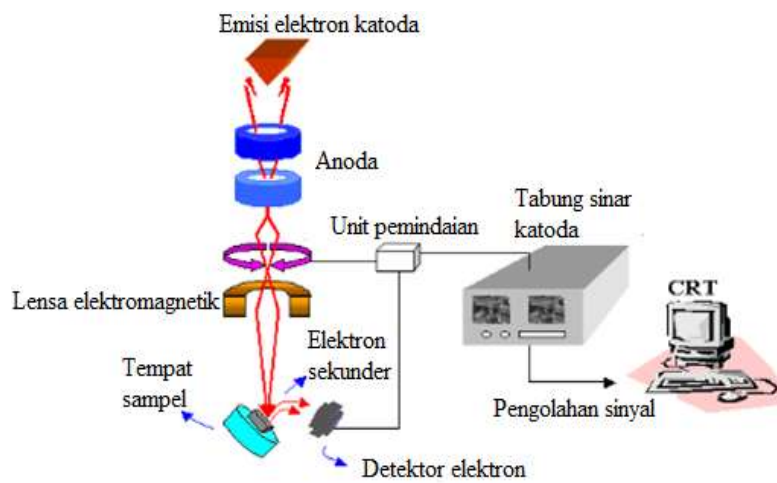
(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN E

Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengkaji morfologi permukaan sampel. Teknik ini digunakan elektron dan bukan cahaya untuk melihat mikrostruktur permukaan sampel. Elektron yang dilepaskan biasanya pada tegangan 5-20 kV, dan keberadaan magnet membentuk elektron dalam skala nanometer. Apabila elektron bertenaga tinggi menumbuk permukaan sampel, elektron sekunder akan dipancarkan dan sebagian elektron yang akan dituju akan diserap kembali. Selain itu, sinar-X juga dipancarkan hasil daripada peralihan elektron yang ada dalam sampel. Elektron akan berinteraksi dengan bagian tertentu yang mengenai sampel sehingga menghasilkan ciri-ciri permukaan, luas dan bentuk struktur sampel, komposisi dan struktur kristal.

Prinsip kerja dari SEM yaitu elektron dibebaskan dari sumber emisi (*electron gun*) dan dipercepat pada gradien listrik yang tinggi. Elektron dalam kolom vakum (elektron primer) difokuskan dan dibelokkan oleh lensa elektronik untuk menghasilkan berkas yang tajam pada objek. Akibat induksi ini elektron sekunder terpancar dari objek. Sudut dan kecepatan dari elektron sekunder tersebut berkaitan dengan struktur permukaan objek. Setelah itu, elektron sekunder ditangkap oleh detektor dan menghasilkan sinyal elektronik. Sinyal ini diperkuat dan diubah ke video scan-gambar yang dapat dilihat pada monitor, dapat disimpan dalam bentuk gambar digital.



Gambar E. Prinsip kerja SEM (Abdullah, 2012).

Referensi:

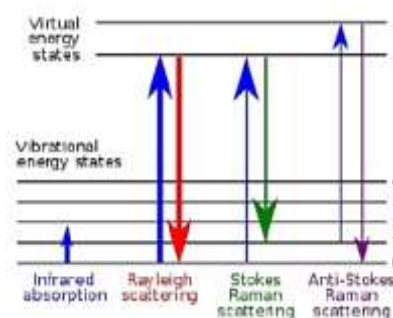
Abdullah, M. 2012. Pengantar Nanoteknologi. Institut Teknologi Bandung: Bandung

LAMPIRAN F

Spektroskopi Raman

Raman Spektroskopi adalah metode penentuan senyawa berdasarkan gerakan molekul, yang dinamakan vibrasi molekul. Senyawa yang terukur pada Raman Spektrometer adalah senyawa yang mengalami perubahan polarisasi karena vibrasi. Spektroskopi ini berhubungan dengan hamburan foton sampel bila disinari dengan laser. Spektroskopi Raman dapat digunakan untuk tujuan analisis kualitatif dan kuantitatif serta sampel dapat berupa fasa padatan, cairan, dan gas.

Efek Raman didasarkan dari molekular deformasi pada medan elektrik E oleh polarisasi molekular α . Berkas sinar dapat dikategorikan sebagai gelombang osilasi elektromagnetik dengan vektor elektrik E . Dimana interaksi dengan sampel dapat menginduksi dipol elektrik $P = \alpha E$. Dikarenakan deformasi secara periodik, molekul akan bergetar dengan karakteristik frekuensi ν_m

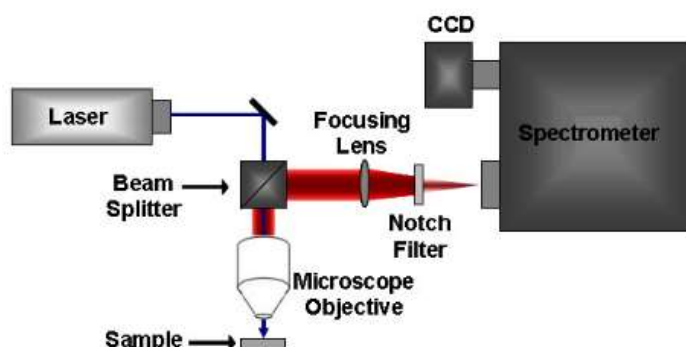


Gambar F-1. Rayleigh, Stokes, dan Anti-Stokes pada Raman.

Amplitudo dari vibrasi dinamakan *nuclear displacement*. Dengan kata lain, cahaya laser monokromatik dengan frekuensi ν_0 mengeksitasi molekul dan merubah mereka menjadi dipole osilasi. Diploe osilasi ini terbagi menjadi tiga frekuensi yang berbeda antara lain (gambar F-1) : (i) Sebuah molekul dengan tidak memiliki mode Raman aktif menyerap foton dengan frekuensi ν_0 . Molekul yang tereksitasi kembali pada keadaan vibrasional yang sama dan memancarkan cahaya dengan frekuensi yang sama ν_0 sengan sumber eksitasi. Tipe ini dinamakan *Rayleigh Scattering*. (ii) Sebuah foton dengan frekuensi ν_0 diserab oleh molekul Raman aktif dimana waktu interaksinya pada keadaan vibrasional

dasar. Sebagian dari energi foton ditransfer ke moda Raman –aktif dengan frekuensi ν_m dan menghasilkan frekuensi cahaya hamburan yang tereduksi menjadi $\nu_o - \nu_m$. Keadaan ini dinamakan *Stokes frequency*. (iii) Sebuah foton dengan frekuensi ν_o diserap oleh sebuah molekul Raman-aktif, dimana pada keadaan tersebut telah terjadi pada keadaan vibrasional yang tereksitasi. Energi sisa dari mode Raman-aktif yang tereksitasi kemudian dilepaskan, molekul kembali pada keadaan vibrasional dasar dan frekuensi yang dihasilkan dari hamburan cahaya akan naik ke $\nu_o + \nu_m$. Keadaan ini dinamakan *Anti-Stokes frequency*.

Sistem Raman (gambar F.2) secara umum terdiri dari 4 komponen utama yakni sumber eksitasi (laser), sistem iluminasi sampel dan kolektor cahaya optis, selektor panjang gelombang (filter atau spektrometer), dan detektor (*photodiode array*, CCD, atau PMT).



Gambar F-2. Skema Raman Spektroskopi.

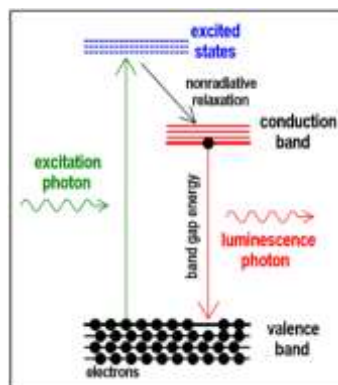
Referensi :

Vallikkodi Mahalingam . (2018). Synthesis, Growth And Characterization Of Piperazinium P-Aminobenzoate And Piperazinium P- Chlorobenzoate Nonlinear Optical Single Crystals. Thesis. Alagappa University.

LAMPIRAN G

Photoluminescence Spectrometer

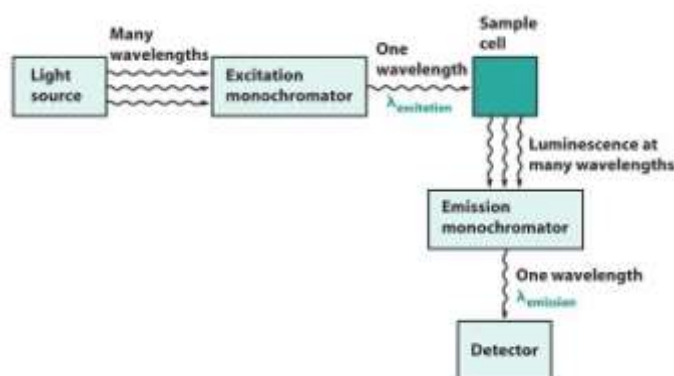
Photoluminescence merupakan proses eksitasi diikuti oleh emisi foton untuk melihat cacat local atau tingkat ketidakmurnian suatu kristal. PL spektra digunakan untuk mengkonfirmasi kemampuan pemisahan muatan oleh material gabungan. PL spektra juga biasa digunakan untuk mempelajari proses yang terjadi pada permukaan yang melibatkan rekombinasi elektron-hole pada semikonduktor. Fotoluminansi adalah terpendarnya (radiasi elektromagnetik yang menghasilkan cahaya) benda oleh suatu energi cahaya. Cahaya diarahkan ke sampel, ketika partikel cahaya (foton) memiliki energi yang lebih besar dari energi celah pita, maka dapat diserap dan dengan demikian menaikkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Dalam proses foto eksitasi ini, elektron umumnya memiliki kelebihan energi yang hilang sebelum menuju ke energi terendah dalam pita konduksi. Pada titik ini elektron akhirnya jatuh kembali ke pita valensi. Ketika jatuh, energi yang hilang diubah kembali menjadi fotonluminescent yang dipancarkan dari material. Jadi energi dari foton yang dipancarkan adalah ukuran langsung dari energi celah pita, Eg. Proses eksitasi foton diikuti oleh emisi foton disebut *photoluminescence* (Gambar G-1).



Gambar G-1. Prinsip kerja Photoluminescence Spektroscopy.

Blok diagram PL diberikan pada Gambar G.2. Panjang gelombang eksitasi dipancarkan oleh monokromator pertama, dan luminescence diamati melalui monokromator kedua, biasanya diposisikan pada 90° dari datangnya cahaya untuk meminimalkan intensitas cahaya yang tersebar mencapai dector. Setelah eksitasi

panjang gelombang dan radiasi yang dipancarkan diamati, selanjutnya dihasilkan sebuah spektrum emisi.



Gambar G-2. Blok Diagram *Photoluminescence Spektroscopy*.

Sebagai hasil dari penyerapan foton energi yang sama atau lebih besar dari energi celah pita semikonduktor, dihasilkan excitons (elektron dan hole) di masing – masing pita konduksi dan valensi. Exciton sendiri merupakan keadaan terikat elektron dan hole elektron yang tertarik satu sama lain oleh kekuatan *Coulomb elektrostatik*. Exciton dapat terbentuk di semikonduktor, bergerak dan tidak dapat bertahan lama pada suhu kamar karena energi ikatnya sangat kecil. Sehingga terurai ("terionisasi") menjadi elektron bebas dan lubang bebas. Dan terjebak pada cacat kisi-kisi tertentu dan kemudian bergabung kembali memancarkan cahaya. Mekanisme tersebut merupakan rekombinasi exciton. Peristiwa rekombinasi dalam kesetimbangan menghasilkan cahaya - tetapi sebagian besar foton akan diserap kembali dan, secara umum, tidak akan meninggalkan materi

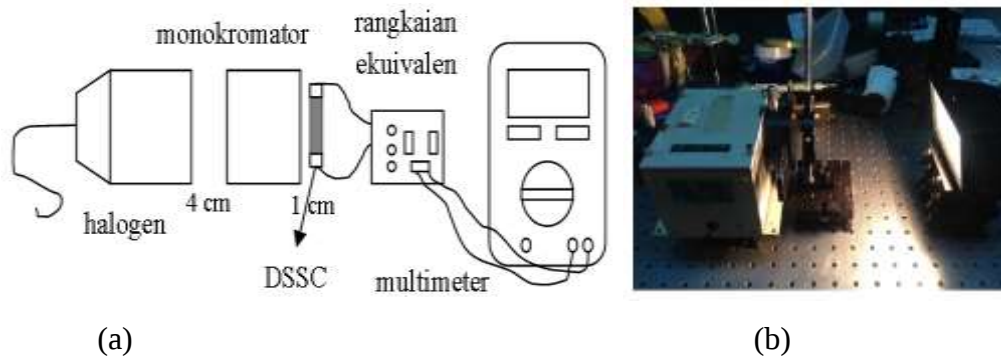
Refrensi :

Vallikkodi Mahalingam . (2018). Synthesis, Growth And Characterization Of Piperazinium P-Aminobenzoate And Piperazinium Chlorobenzoate Nonlinear Optical Single Crystals. Thesis. Alagappa University.

LAMPIRAN H

Pengukuran IPCE

Skema dari alat yang digunakan untuk mengukur IPCE terdapat pada gambar H. Pengukuran IPCE diperlukan monokromator (CT-10T, JASCO) dan lampu halogen (GR-150). Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Fotonika Teknik Fisika ITS. Jarak antara lampu halogen ke monokromator adalah 4cm, sedangkan jarak antara DSSC ke monokromator adalah 1 cm. Daya pada setiap panjang gelombang cahaya lampu halogen diukur menggunakan *Optical Power Meter* (Thorlab S-120C).



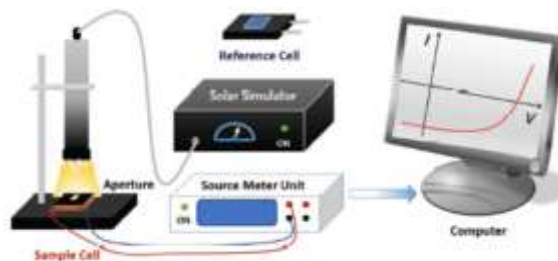
Gambar H. Pengujian IPCE (a) Skema pengujian (b) Set up alat pengujian di Laboratorium Fotonika

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN I

Solar Simulator

Solar simulator adalah alat yang menghasilkan berbagai besaran iluminasi sebagai pengganti sinar matahari yang sebenarnya pada proses pengujian. Tujuan solar simulator adalah untuk mengetahui atau menguji peralatan surya dalam kondisi terkontrol di laboratorium. Secara umum set up kerja pada solar simulator terdiri dari beberapa komponen (Gambar I.1) antara lain sel referensi, celah lensa, dan komputer sebagai interface yang terhubung dengan source meter. Sesuai standar ASTM (American Society for Testing and Materials) sampel DSSC diukur di bawah suhu referensi 25°C yang dimonitor oleh termal detector. Simulasi radiasi yang digunakan sebesar $100\text{mW}/\text{cm}^2$ yang berasal dari lampu Xenon. Pengukuran I-V pada penelitian ini dilakukan di ITB laboratorium fotonika yang ditunjukkan pada Gambar I-2.



Gambar I-1. Perancangan komponen solar simulator.



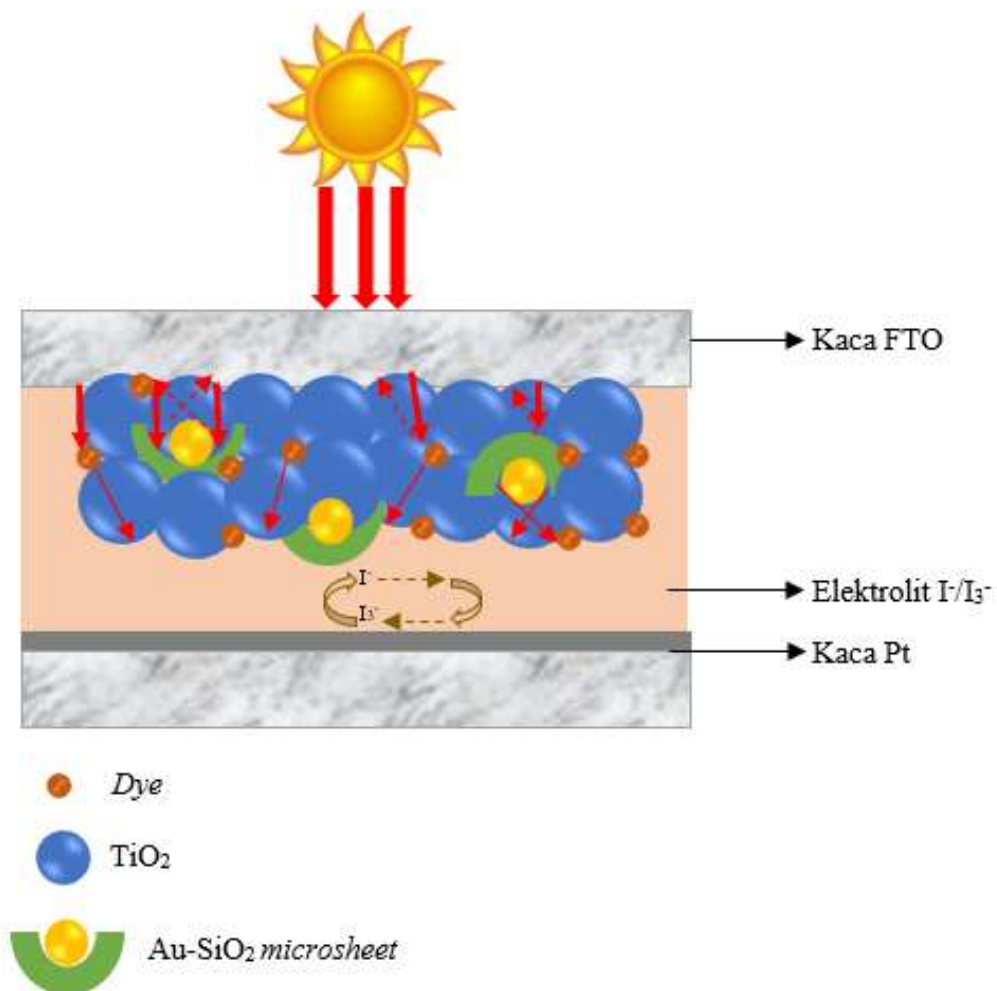
Gambar I-2. Perancangan komponen solar simulator di ITB.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

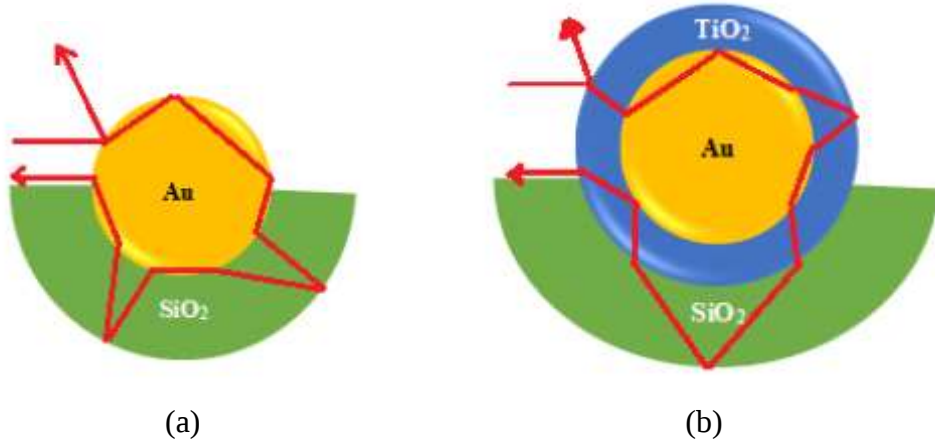
LAMPIRAN J

Skema Hamburan Cahaya Pada DSSC

Pada sub bab 4.4 telah dijelaskan bahwa penambahan struktur lapisan modifikasi fotoanoda akan berpengaruh terhadap jalur pemanenan cahaya. Hal tersebut menghasilkan peningkatan performansi DSSC. Skema hamburan cahaya pada DSSC untuk penelitian ini diilustrasikan dalam Gambar J-1. Sedangkan untuk ilustrasi skema hamburan untuk modifikasi struktur fotoanoda terdapat pada gambar J-2.



Gambar J-1. Skema hamburan cahaya pada DSSC dengan modifikasi struktur fotoanoda.



Gambar J-2. Skema hamburan cahaya pada modifikasi struktur fotoanoda (a) Au-SiO₂ *microsheet* dan (b) Au@TiO₂-SiO₂ *microsheet*.

BIOGRAFI PENULIS



Ra'idah Syarifah— lahir di Surabaya, 21 Juli 1994. Penulis merupakan anak kedua dari Muhidin dan Endang. Penulis memulai pendidikan di SDN Wonorejo VIII pada tahun 1999-2005. Penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 29 Surabaya dan lulus pada tahun 2008. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan di SMA Trimurti sampai pada tahun 2011. Selepas lulus dari sekolah menengah atas, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Fisika ITS Surabaya. Saat berstatus sebagai mahasiswa sarjana, penulis aktif sebagai asisten di Lab. Fisika Dasar dan asisten lab. Optofotonika Fisika FMIPA ITS. Penulis menyelesaikan program sarjana pada Agustus 2015. Bagi pembaca yang memiliki saran, kritik, atau ingin berdiskusi lebih lanjut tentang Tesis ini, maka bisa menghubungi penulis melalui email : raidasyarifah@gmail.com.