



TUGAS AKHIR - TF141581

FABRIKASI NANOPARTIKEL STRUKTUR *CORE-SHELL* Au@SiO₂ DENGAN SiO₂ EKSTRAKSI LUMPUR SIDOARJO SEBAGAI FOTOANODA UNTUK APLIKASI DSSC (*DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS*)

EMHA RIYADHUL JINAN ALHADI
NRP. 2413 100 037

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

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT- TF141581

***FABRICATION OF NANOPARTICLE Au@SiO₂
CORE-SHELL STRUCTURE USING SiO₂
EXTRACTED FROM SIDOARJO MUD AS
PHOTOANODE FOR DSSC (DYE-SENSITIZED
SOLAR CELLS) APPLICATIONS***

EMHA RIYADHUL JINAN ALHADI
NRP. 2413 100 037

Supervisor
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Emha Riyadhul Jinan Alhadi
NRP : 2413100037
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **"Fabrikasi Nanopartikel Struktur *Core-shell* Au@SiO₂ dengan SiO₂ Ekstraksi Lumpur Sidoarjo sebagai Fotoanoda untuk Aplikasi DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cells*)"** adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 11 Oktober 2017
Yang membuat pernyataan,

Emha Riyadhul Jinan Alhadi
NRP.2413100037

**FABRIKASI NANOPARTIKEL STRUKTUR CORE-SHELL
Au@SiO₂ DENGAN SiO₂ EKSTRAKSI LUMPUR
SIDOARJO SEBAGAI FOTOANODA UNTUK APLIKASI
DSSC (DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS)**

TUGAS AKHIR

Oleh:

Emha Riyadhul Jinan Alhadi
NRP : 2413 100 037

Surabaya, 11 Oktober 2017
Mengetahui/Menyetujui,

Pembimbing I



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



Agus Muhamad Hatta, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

**FABRIKASI NANOPARTIKEL STRUKTUR CORE-SHELL
Au@SiO₂ DENGAN SiO₂ EKSTRAKSI LUMPUR
SIDOARJO SEBAGAI FOTOANODA UNTUK APLIKASI
DSSC (DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS)**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

**EMHA RIYADHUL JINAN ALHADI
NRP. 2413100037**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Dyah Sawitri, S.T., M.T. (Ketua Penguji)
3. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc. (Penguji I)
4. Andi Rahmadiansyah, S.T., M.T. (Penguji II)

**SURABAYA
11 Oktober 2017**

**FABRIKASI NANOPARTIKEL STRUKTUR *CORE-SHELL*
Au@SiO₂ DENGAN SiO₂ EKSTRAKSI LUMPUR
SIDOARJO SEBAGAI FOTOANODA UNTUK APLIKASI
DSSC (*DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS*)**

Nama Mahasiswa : Emha Riyadhul Jinan Alhadi
NRP : 2413100037
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

Abstrak

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa lumpur Sidoarjo memiliki kadar SiO₂ yang tinggi. Penambahan nanopartikel SiO₂ dan nanopartikel emas (Au) dalam bentuk *core-shell* dilakukan untuk meningkatkan performa DSSC. Penelitian ini melakukan modifikasi pada fotoanoda DSSC dengan menggunakan TiO₂/Au@SiO₂ *core-shell* sebagai semikonduktor. Variasi fraksi 0,5% dan 1% penambahan *core-shell* Au@SiO₂ pada TiO₂ dengan variasi volume 30 ml, 60 ml, 90 ml dan 120 ml penambahan SiO₂ ekstraksi lumpur Sidoarjo dalam *core-shell* Au@SiO₂. Penambahan struktur *core-shell* Au@SiO₂ ini diharapkan menghasilkan efek LSPR oleh nanopartikel Au, sehingga dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan nilai arus foton yang dihasilkan. Hasil karakterisasi FESEM dan EDX Au@SiO₂ menunjukkan partikel emas sebagian berada di dalam SiO₂ membentuk *core-shell* Au@SiO₂. Hasil IPCE menunjukkan sampel DSSC dengan fotoanoda TiO₂/Au@SiO₂ 30 ml 1%, memiliki IPCE tertinggi sebesar 0,0086 % serta memiliki rentang IPCE paling luas, mulai dari 415 nm hingga 650 nm. Semakin banyak *core-shell* yang ditambahkan pada TiO₂ akan menghasilkan IPCE yang lebih tinggi dan lebih lebar. Terdapat penurunan IPCE pada panjang gelombang 550 nm. Hal ini disebabkan oleh partikel emas yang tidak terlindungi silika akan berkontak langsung dengan elektrolit dan terkorosi sehingga efek LSPR dari partikel emas tersebut berkurang dan memiliki *lifetime* yang terbatas.

Kata kunci : DSSC, Au@SiO₂, *core-shell*, Lumpur Sidoarjo, IPCE

FABRICATION OF NANOPARTICLE Au@SiO₂ CORE-SHELL STRUCTURE USING SiO₂ EXTRACTED FROM SIDOARJO MUD AS PHOTOANODE FOR DSSC (DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS) APPLICATIONS

Name : Emha Riyadhul Jinan Alhadi
NRP : 2413100037
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.

Abstract

Previous research showed that Sidoarjo mud containing high amount of SiO₂. The addition of SiO₂ nanoparticles and gold nanoparticles (Au) in the form of core-shells are used to improve DSSC performance. This study modified DSSC photoanode using TiO₂/Au@SiO₂ core-shell as semiconductor. Variations of 0.5% and 1% of the Au@SiO₂ fractional fraction were given to core-shell prepared by using 30 ml, 60 ml, 90 ml and 120 ml of SiO₂. The addition of the Au@SiO₂ core-shell structure is expected to produce an LSPR effect by Au nanoparticles, thereby it would increase the light absorption and photocurrent values. The result of FESEM and EDX characterization Au@SiO₂ shows the gold particles located partly inside the SiO₂ forming Au@SiO₂ core-shell. The IPCE results show that DSSC sample with photoanode TiO₂/Au@SiO₂ 30 ml 1% has the highest percentage IPCE of 0,0086% and also has the widest IPCE in the range of 415 nm to 650 nm. Higher amount of core-shell in TiO₂ leads to higher IPCE value and wider wavelength coverage. IPCE decreased at wavelength of 550 nm. This is due to the gold particles uncovered by silica being in direct contact with the electrolyte and corroded allowing the LSPR effects of the gold particles were reduced and thus shorten the lifetime.

Keywords : DSSC, Au@SiO₂, core-shell, Sidoarjo Mud, IPCE.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Fabrikasi Nanopartikel Struktur *Core-shell* Au@SiO₂ dengan SiO₂ Ekstraksi Lumpur Sidoarjo sebagai Fotoanoda untuk Aplikasi DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cells*)”**. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, ST, MT. selaku dosen pembimbing yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Seluruh dosen Rekayasa Bahan yang telah memberikan materi dan bimbingan untuk menunjang tugas akhir.
4. Seluruh dosen Teknik Fisika – ITS yang telah menjadi media transfer ilmu sehingga kami dapat merampungkan jenjang perkuliahan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
5. Bapak Ismul Hadi dan Ibu Sri Wiryati Ratningdiah, adek hani, adek habib dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberi motivasi dan mendoakan penulis dimanapun berada.
6. Seluruh staf pegawai Jurusan Teknik Fisika atas semua bentuk kerjasamanya selama masa kuliah.
7. Laboratorium Instrumentasi dan Sains Analitik Kimia ITS, Laboratorium Nano Bioenergi UNS, Pusat Penelitian Fisika LIPI dan Laboratorium XRD Jurusan Material dan Metalurgi ITS telah membantu melakukan pengujian dalam Tugas Akhir ini.
8. Laboratorium Rekayasa Bahan dan Laboratorium Fotonik, Teknik Fisika ITS yang telah memberikan pinjaman alat dan fasilitas untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Teman seperjuangan dan pembimbing mbak Nur Fadhilah atas segala bantuan dan bimbingan dalam pengerjaan Tugas Akhir.

10. Rekan asisten Laboratorium Rekayasa Bahan (Haikal, Mas Khamim, Mbak Intan dan Ojzan) serta rekan seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir (Kevin, Devita, Emir, Thomas, Risandy dan Doncang) atas semangat dan dukungan yang telah diberikan.
11. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Dengan segala kerendahan hati penulis menerima kritik dan saran yang membangun terkait dengan laporan tugas akhir ini demi kebaikan bersama. Besar harapan agar laporan tugas akhir ini dapat lebih baik dan bermanfaat. Akhir kata penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kehidupan manusia khususnya dalam pemahaman dan aplikasi material dan energi yang ada di Indonesia.

Surabaya, 11 Oktober 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Prinsip Kerja <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC)	5
2.2 Material Penyusun Fotoanoda DSSC	6
2.3 Prinsip Kerja Modifikasi Fotoanoda DSSC	18
2.4 Efek LSPR (<i>Localized Surface Plasmon Resonance</i>) .	19
2.5 Pengaruh Modifikasi Fotoanoda terhadap Absorbansi	21
2.6 Efek <i>Scattering</i> pada Nanopartikel <i>Core-shell</i>	23
2.7 Pengaruh Ketebalan Silika pada DSSC	25
2.8 Efisiensi Konservasi Cahaya Menggunakan IPCE.....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Alat dan Bahan	30
3.2 Ekstraksi Nanopartikel SiO ₂ dari Lumpur Sidoarjo	30
3.3 Sintesis Nanopartikel TiO ₂	31
3.4 Reduksi Au	32
3.5 Sintesis Nanopartikel Au@SiO ₂	33
3.6 Karakterisasi Nanopartikel	34
3.7 Prosedur Perakitan DSSC.....	43
3.8 Pengukuran efisiensi konversi cahaya dengan IPCE...	45
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Karakterisasi Nanopartikel XRD.....	47
4.2 Karakterisasi Nanopartikel FTIR	52
4.3 Karakterisasi UV-Vis (Ultraviolet-Visual).....	53

4.4	Karakterisasi FE-SEM dan EDX.....	56
4.5	Pengujian IPCE	61
BAB V PENUTUP.....		73
5.1	Kesimpulan.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN A		
LAMPIRAN B		
LAMPIRAN C		
LAMPIRAN D		
LAMPIRAN E		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Prinsip kerja dan skema proses transfer elektron pada DSSC	5
Gambar 2.2	Struktur kristal nanopartikel TiO ₂ (a) Anatase, (b) Rutile, (c) Brookite	6
Gambar 2.3	Struktur kristal emas FCC (<i>Face Centered Cubic</i>).....	8
Gambar 2.4	Diagram pita energi (a) Logam dan semikonduktor nonequilibrium termal (b) Kontak logam semikonduktor pada keseimbangan termal.....	12
Gambar 2.5	Skematik proses elektron transfer pada Au-semikonduktor heterostruktur (a) hanya Au tereksitasi, (b) hanya semikonduktor yang tereksitasi dan (c) eksitasi serentak dari Au dan semikonduktor.....	15
Gambar 2.6	Skema energi diagram dari proses transfer hot electron.....	16
Gambar 2.7	Persentase penghamburan dan penyerapan cahaya pada emas (Au) terhadap ukuran nanopartikel.....	17
Gambar 2.8	Proses transfer elektron pada fotoanoda TiO ₂ /Au@SiO ₂	18
Gambar 2.9	Skema LSPR	19
Gambar 2.10	Skema ilustrasi peningkatan arus foto efek LSPR	20
Gambar 2.8	Karakterisasi UV-Vis fotoanoda TiO ₂ dan TiO ₂ +Au@SiO ₂ dalam (a) beberapa pewarna (b) tanpa pewarna.....	23
Gambar 2.11	Skema hamburan cahaya pada struktur core-shell	24
Gambar 2.12	(a) Spektrum absorbansi <i>core-shell</i> Au@SiO ₂ dengan variasi ketebalan SiO ₂ pada polimer plasmonik PEDOT:PSS/PTB7 (b) Karakteristik IPCE tanpa dan dengan core-shell Au@SiO ₂	25
Gambar 3.1	Metodologi penelitian	29

Gambar 3.2	Proses ekstraksi SiO ₂ lumpur Sidoarjo (a) Pencucian, (b) Penyaringan, dan (c) Hasil kalsinasi SiO ₂ lumpur Sidoarjo	31
Gambar 3.3	Proses sintesis TiO ₂ (a) Pencampuran TiCl ₃ dengan <i>ammonia</i> , (b) Pencucian endapan TiO ₂ dan (c) Hasil kalsinasi TiO ₂	32
Gambar 3.4	Proses reduksi emas (a) H ₂ AuCl ₄ .3H ₂ O bubuk, (b) Preparasi larutan emas dan <i>trisodium citrate</i> dan (c) Hasil reduksi emas	32
Gambar 3.5	Proses sintesis Au@SiO ₂ (a) Persiapan larutan APTMS, (b) Larutan SiO ₂ yang telah disaring dan (c) Hasil titrasi campuran Au dan SiO ₂	33
Gambar 3.6	Skema nanopartikel struktur <i>core-shell</i> Au@SiO ₂	34
Gambar 3.7	(a) Diagram skematik pengujian XRD (b) XRD Philips X'pert MPD.....	35
Gambar 3.8	Skema pengujian FT-IR spektrometer.....	37
Gambar 3.9	Diagram skematik pengujian UV-Vis <i>spectrophotometer</i>	38
Gambar 3.10	FE-SEM (JIB-4610F, courtesy JEOL-USA).....	40
Gambar 3.11	Pelapisan foto anoda pada kaca FTO menggunakan metode <i>doctor blade</i>	45
Gambar 3.12	Fabrikasi DSSC (a) Kaca FTO dengan fotoanoda yang telah direndam dengan pewarna (b) DSSC yang telah disusun <i>sandwich</i>	45
Gambar 3.13	Pengujian IPCE (a) Skema pengujian (b) <i>Set up</i> alat pengujian di Laboratorium Fotonika	46
Gambar 4.1	Hasil XRD SiO ₂ dari lumpur Sidoarjo	47
Gambar 4.2	Hasil XRD TiO ₂ fasa anatase	48
Gambar 4.3	Hasil XRD <i>core-shell</i> Au@SiO ₂	49
Gambar 4.4	Hasil XRD sintesis Au metode Turkevich pada (a) pH 3,1 dan (b) pH 9,8. Tanda (*) menunjukkan puncak NaCl pada kisi (220) dan (311)	51
Gambar 4.5	Hasil FTIR SiO ₂ dari lumpur Sidoarjo	53

Gambar 4.6	Hasil UV-Vis dari <i>core-shell</i> (a) Au@SiO ₂ 30 ml, (b) Au@SiO ₂ 60 ml, (c) Au@SiO ₂ 90 ml dan (d) Au@SiO ₂ 120 ml	54
Gambar 4.7	<i>Tauc plot core-shell</i> Au@SiO ₂	55
Gambar 4.8	Hasil FE-SEM dari <i>core-shell</i> Au@SiO ₂ 30 ml, (a)10.000x dan (b)100.000x	57
Gambar 4.9	Hasil EDX dari <i>core-shell</i> Au@SiO ₂ 30 ml, (a) Kuantisasi tiap unsur (b) Persebaran emas (Au) ..	58
Gambar 4.10	Distribusi ukuran partikel emas.....	60
Gambar 4.11	Hasil uji IPCE pada DSSC (a) Variasi fraksi TiO ₂ /SiO ₂ (b) Fraksi 0,5% Au@SiO ₂ pada TiO ₂ (c) Fraksi 1% Au@SiO ₂ pada TiO ₂ (d) 30 ml SiO ₂ pada Au@SiO ₂ (e) 60 ml SiO ₂ pada Au@SiO ₂ (f) 90 ml SiO ₂ pada Au@SiO ₂ (g) 120 ml SiO ₂ pada Au@SiO ₂	64
Gambar 4.12	Perubahan rapat arus terhadap daya (a) 30 ml SiO ₂ pada Au@SiO ₂ dan TiO ₂ (b) (b) fraksi 0,5% Au@SiO ₂ pada TiO ₂ (c) fraksi 1% Au@SiO ₂ pada TiO ₂	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi SiO ₂ Lumpur Sidoarjo.....	11
Tabel 3.1	Komposisi sampel DSSC yang akan diteliti	44
Tabel 4.1	Perhitungan XRD <i>core-shell</i> Au@SiO ₂	50
Tabel 4.2	Perhitungan Energi Pita Celah	56
Tabel 4.3	Persentase Unsur Hasil EDX.....	59
Tabel 4.4	Hasil Analisis Partikel Emas dengan <i>Software</i> ImageJ	59
Tabel 4.5	Hasil uji IPCE	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 1991, DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cell*) atau dikenal dengan *Grätzel Cell* pertama kali ditemukan dan dipatenkan oleh (O'Regan & Grätzel, 1991). *Grätzel Cell* menggunakan semikonduktor nanopartikel TiO_2 , lapisan semikonduktor dengan luas permukaan yang tinggi dan pewarna ruthenium kompleks berhasil menggenerasikan listrik sebesar 7,9% dari cahaya matahari dan 12% dari difusi cahaya. Permasalahan utama terletak pada ketidakstabilan dari DSSC. Peningkatan penyerapan cahaya dilakukan dengan optimisasi porositas menggunakan TiO_2 lapisan berpori dan pewarna ruthenium kompleks berhasil meningkatkan efisiensi hingga 10,53% (Gao, et al., 2008). Namun total penyerapan cahaya dari molekul pewarna dibatasi oleh luas permukaan TiO_2 .

Modifikasi dilakukan dengan cara co-sensitisasi lapisan TiO_2 dengan pewarna porphyrin (FNE57) dan pewarna organik (FNE46), namun hanya mampu meningkatkan efisiensi sebesar 7,88% (Fan, et al., 2016). Doping pada TiO_2 dengan karbon (Chu, et al., 2008), nitrogen (Eom, et al., 2014) dan logam Al/Zn (Jin, et al., 2016) juga dilakukan, namun hasil yang didapat dengan doping karbon sebesar 4,42%, doping nitrogen 3,6%, dan doping logam Al/Zn 7,12%. Penambahan nanopartikel SiO_2 dan nanopartikel emas (Au) dalam bentuk *core-shell* dilakukan untuk meningkatkan performa DSSC (Li, et al., 2012).

(Puspitasari, 2016) melakukan penelitian pada fotoanoda DSSC menggunakan komposit nanopartikel $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Hasil yang diperoleh SiO_2 hasil ekstraksi lumpur Sidoarjo menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi yaitu 0,016% dibandingkan efisiensi SiO_2 dari prekursor TEOS (*tetraethyl orthosilicate*) 0,013%. Hal ini disebabkan karena pada nanopartikel SiO_2 ekstraksi lumpur memiliki kandungan lain, yakni $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ yang berfungsi untuk mengurangi

rekombinasi antara *photoanode* dan pewarna sehingga menyebabkan naiknya nilai J_{SC} (Puspitasari, 2016).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi DSSC, antara lain penggunaan submikron partikel *core-shell* $SiO_2@TiO_2$ yang ditempelkan pada fotoanoda TiO_2 dengan pewarna N-719. Submikron *core-shell* $SiO_2@TiO_2$ yang ditanam pada fotoanoda TiO_2 dapat memperbesar efek penghamburan cahaya, menyerap pewarna tiga kali lebih besar dan meningkatkan konversi energi menjadi 5,1%, hasil ini lebih besar 46% daripada fotoanoda TiO_2 saja yakni sebesar 3,5% (Wang, et al., 2013).

Penambahan partikel nano dari logam mulia seperti perak (Ag) dan emas (Au) menjadi metode yang efektif untuk menambah performansi dari DSSC, dikarenakan adanya efek LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*). Fungsi LSPR dari nanopartikel emas (Au) pada DSSC dapat meningkatkan *light harvesting* dan penyerapan molekul pewarna yang lebih besar dikarenakan permukaan Au membentuk awan elektron yang dapat beresonansi secara koheren dengan gelombang medan elektromagnetik lokal cahaya di sekitarnya dengan baik. Adanya Au menambah elektron yang tereksitasi sebagai akibat permukaan plasmonik nanopartikel emas (Au) yang mentransfer elektron ke pita konduksi TiO_2 (Jang, et al., 2014).

Penambahan *core-shell* $Au@SiO_2$ pada fotoanoda DSSC dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan efisiensi konversi daya DSSC. Penelitian yang dilakukan oleh (Li, et al., 2012) dengan komponen SiO_2 dari TEOS, TiO_2 sebagai dasar fotoanoda dan N-719 sebagai pewarna, efek LSPR dari Au yang dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan bersinergi baik dengan pewarna N-719 dalam meningkatkan transfer energi memperlihatkan perbedaan efisiensi yang cukup signifikan sebesar 4,81%, dimana 37% lebih tinggi dibandingkan hanya menggunakan TiO_2 yakni 3,52% (Li, et al., 2012).

Penelitian lebih lanjut yang telah dilakukan oleh (Budiarti, 2016), dengan memodifikasi fotoanoda DSSC menggunakan 1,0 wt% struktur *core-shell* $TiO_2@SiO_2@Au$, dimana penambahan

SiO₂ hasil ekstraksi lumpur Sidoarjo dapat meningkatkan efisiensi menjadi dua kali lebih tinggi yakni 0,0317% dibandingkan hanya menggunakan TiO₂ 0,016%. Hal ini dikarenakan penambahan SiO₂ memiliki efek penghamburan cahaya sehingga semakin banyak cahaya yang mengenai pewarna dan mampu mengkonversi photon dari menjadi elektron lebih banyak sehingga dapat meningkatkan nilai arus dan tegangan yang dihasilkan. Hasil FESEM menunjukkan SiO₂ tidak sepenuhnya melingkupi TiO₂ dan hasil FTIR tidak menunjukkan adanya ikatan Ti – O – Si sehingga struktur *core-shell* tidak terbentuk secara sempurna mengakibatkan nilai hambatan yang dihasilkan menjadi semakin tinggi (Budiarti, 2016).

Penelitian tugas akhir ini berfokus pada fabrikasi DSSC dengan fotoanoda TiO₂ yang ditambahkan variasi struktur *core-shell* Au@SiO₂. Partikel SiO₂ yang digunakan didapatkan dari hasil sintesis lumpur Sidoarjo dengan variasi fraksi yang ditentukan, sehingga dapat diperoleh nilai konversi arus DSSC yang optimal. Pewarna yang digunakan adalah pewarna N-719. Dengan penambahan struktur *core-shell* Au@SiO₂ ini diharapkan menghasilkan efek LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*) oleh nanopartikel Au, sehingga dapat meningkatkan penyerapan cahaya dan nilai arus foton yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dihadapi dalam tugas akhir ini adalah:

- a. Bagaimana karakteristik nanopartikel SiO₂ dari hasil ekstraksi lumpur Sidoarjo?
- b. Bagaimana karakteristik nanopartikel struktur *core-shell* Au@SiO₂ yang disintesis?
- c. Bagaimana konversi foton menjadi arus pada DSSC dengan nanopartikel struktur *core-shell* Au@SiO₂?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

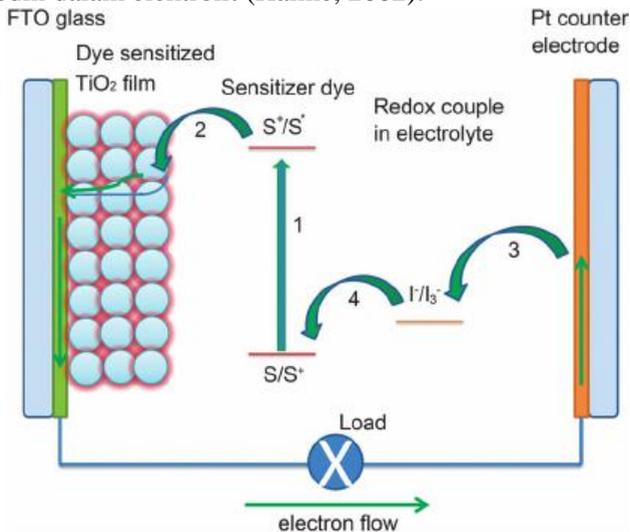
- a. Mengetahui karakteristik nanopartikel SiO₂ dari hasil ekstraksi lumpur Sidoarjo.

- b. Mengetahui karakteristik nanopartikel struktur *core-shell* Au@SiO₂ yang disintesis.
- c. Mengetahui konversi foton menjadi arus pada DSSC dengan nanopartikel struktur *core-shell* Au@SiO₂.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Prinsip Kerja *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)

Siklus kerja *dye sensitized solar cell* ditunjukkan pada Gambar 2.1. Foton akan diserap oleh molekul pewarna yang ada di permukaan semikonduktor titanium dioksida dan elektron akan tereksitasi (D^*) dari tingkat *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) ke tingkat *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO) ketika molekul pewarna menyerap sejumlah foton dengan energi yang sesuai. Setelah itu elektron akan diinjeksikan ke semikonduktor titanium dioksida dan meninggalkan pewarna (D^+). Kemudian elektron menuju kontak pada sisi bagian belakang yang terbuat dari *transparent conducting oxide* (TCO) (elektroda negatif/anoda), dari TCO elektron menuju ke sirkuit eksternal dan akhirnya menuju ke elektroda lawan (elektroda positif/katoda). Setelah dari elektroda lawan, elektron ditransfer ke elektrolit triiodida dan menghasilkan iodin, siklus ditutup dengan proses reduksi yang dialami pewarna yang teroksidasi oleh iodin dalam elektrolit (Halme, 2002).



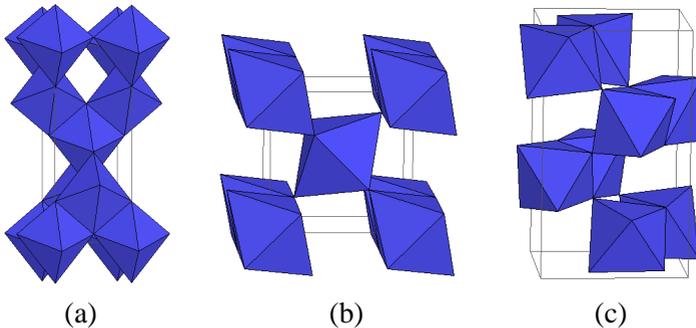
Gambar 2.1 Prinsip kerja dan skema proses transfer elektron pada DSSC (Wu & Zhu, 2013)

Selain proses kimia di atas, terdapat beberapa proses yang tidak diinginkan. Proses ini akan menurunkan efisiensi dari DSSC, yaitu rekombinasi dari elektron yang terinjeksi dengan pewarna teroksidasi atau pasangan redoks yang teroksidasi pada permukaan TiO_2 (Nazeeruddin, Baranoff, & Grätzel, 2011).

2.2 Material Penyusun Fotoanoda DSSC

2.2.1 Nanopartikel TiO_2 Anatase

TiO_2 memiliki 3 struktur kristal, yaitu rutile, anatase dan brookite. Struktur kristal nanopartikel TiO_2 ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur kristal nanopartikel TiO_2 (a) Anatase, (b) Rutile, (c) Brookite (Smyth & Bish, 1988)

Rutile adalah fase yang stabil secara termodinamika. Energi pita celah dari rutile adalah 3,0 eV setara dengan energi cahaya dengan panjang gelombang 413 nm, sedangkan energi pita celah dari anatase adalah 3,2 eV setara dengan energi cahaya dengan panjang gelombang 388 nm (Asahi, et al., 2001). Energi pita celah yang tinggi ini mengurangi spektrum cahaya yang dapat diserap, tetapi mampu meningkatkan pita valensi maksimum ke tingkat energi yang lebih tinggi relatif terhadap potensi redoks dari molekul pewarna yang terabsorpsi. Hal ini meningkatkan kemampuan oksidasi dari elektron dan mendukung transfer elektron dari pewarna yang terserap ke TiO_2 (Luttrell, et al., 2014).

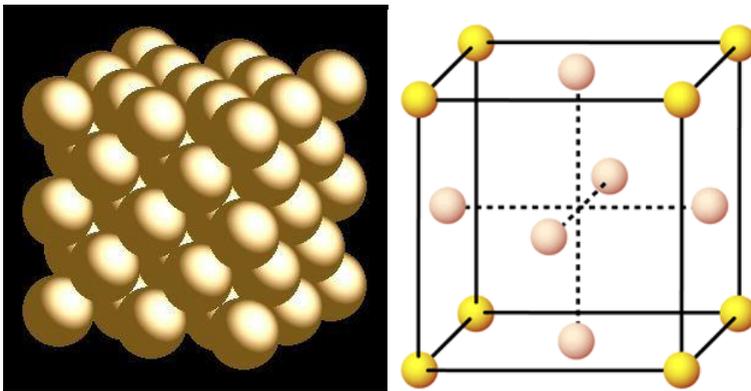
DSSC menggunakan fotoanoda TiO_2 anatase yang telah dilapisi pewarna memiliki penyerapan cahaya 35% dan IPCE 14% lebih tinggi dibandingkan dengan TiO_2 rutil dilapisi pewarna (Park, van de Lagemaat, & Frank, 2000). Hal ini dikarenakan TiO_2 anatase memiliki luas permukaan (*surface area*) yang lebih besar dibandingkan dengan TiO_2 rutil, dimana semakin besar luas permukaan maka semakin besar penyerapan pewarna dan meningkatkan generasi foto arus (*photocurrent*) (Jeng, et al., 2013). TiO_2 anatase juga memiliki konstanta dielektrik yang tinggi yaitu $\epsilon = 80$, sehingga menjadi pelindung listrik yang baik dari elektron terinjeksi molekul pewarna teroksidasi yang menempel pada permukaan TiO_2 , hal ini mencegah rekombinasi sebelum reduksi pewarna oleh elektrolit redoks. TiO_2 anatase juga memiliki indeks bias yang tinggi ($n=2,5$) sehingga menghasilkan hamburan cahaya yang efisien dalam pori fotoelektroda, yang secara signifikan meningkatkan penyerapan cahaya (Kay & Grätzel, 1996).

2.2.2 Nanopartikel Au Sebagai Material *Core*

Penambahan logam mulia ke TiO_2 dapat mempengaruhi kinerja fotovoltaiik. Fungsi kerja logam mulia lebih tinggi dari pada TiO_2 , dimana elektron yang dikeluarkan dari TiO_2 di sekitar partikel logam menyebabkan pembentukan *Schottky barrier* pada daerah semikonduktor logam. *Schottky barrier* sendiri adalah potensial energi penghalang untuk elektron terbentuk pada sambungan semikonduktor-logam (Tung, 2014). Terbentuknya *Schottky barrier* mampu mengurangi rekombinasi muatan. Selain itu juga dapat mempercepat transfer elektron ke elektroda sehingga transfer muatan menjadi efisien. Endapan nanopartikel logam mulia pada permukaan TiO_2 memfasilitasi proses transfer muatan antar muka dengan efektif, karena fungsi logam sebagai penyerap elektron dan menurunkan rekombinasi muatan (Pandikumar, et al., 2016).

Logam mulia seperti emas ($\phi_m\text{Au}$: 5,1-5,5 eV), perak ($\phi_m\text{Ag}$: 4,12 eV) dan tembaga (Cu) digunakan elektroda logam dalam DSSC karena memiliki fungsi kerja yang lebih tinggi daripada afinitas elektron dari TiO_2 (χTiO_2 : 4.0 eV) sehingga

dapat membentuk *Schottky barrier* dan memberikan elektron saat pengisian muatan di elektrolit (Dao & Choi, 2016). Fungsi kerja yang tinggi membuat elektroda logam stabil di udara bebas dan memiliki kontak yang baik dengan lapisan pewarna (Khatri, et al., 2012). Peningkatan efisiensi dipengaruhi oleh perbedaan fungsi kerja antara Au dengan TiO_2 dimana perbedaan yang cukup besar mampu meningkatkan *Schottky barrier* yang secara efisien menangkap *hot electron* dibandingkan dengan Ag dengan TiO_2 yang memiliki perbedaan fungsi kerja kecil (Dao & Choi, 2016).



Gambar 2.3 Struktur kristal emas FCC (*Face Centered Cubic*) (Maeland & Flanagan, 1964)

Struktur kristal logam emas adalah FCC (*Face Centered Cubic*) (Gambar 2.3). Emas memiliki densitas sebesar $19,32 \text{ g/cm}^3$ pada suhu mendekati suhu kamar (Brown & Lemay, 1985). Emas memiliki konduktivitas listrik sebesar $4,10 \times 10^7 \text{ S/m}$ dan konsentrasi elektron bebas sebesar $5,91 \times 10^{22} \text{ cm}^3$ yang membuat emas menjadi sangat konduktif dan digunakan pada aplikasi energi tinggi (Fulay & Lee, 2016). Logam mulia dapat meningkatkan aktifitas fotokatalik pada cahaya tampak karena menghambat rekombinasi elektron serta adanya efek plasmonik serta dapat meningkatkan pemanenan cahaya (Ye et al., 2013). Nanopartikel Au sebagai salah satu logam mulia dapat meningkatkan rentang dan kekuatan penyerapan cahaya pada fotoanoda. Dengan meningkatkan Au pada fotoanoda, jumlah

spektrum penyerapan cahaya meningkat sementara jumlah penyerapan pewarna berkurang (Bai et al., 2014).

2.2.3 SiO₂ Ekstraksi Lumpur Sidoarjo Sebagai Material *Shell*

SiO₂ merupakan material penghambur yang berfungsi untuk meningkatkan penyerapan cahaya oleh pewarna 3 kali lebih kuat dibandingkan tanpa adanya material penghambur. SiO₂ bertindak sebagai material penghambur, perbedaan indeks bias yang besar antara SiO₂ (n=1,5) dan TiO₂ (n=2,52) mampu membuat jalannya cahaya hamburan pada *core-shell* semakin panjang dan dapat kembali mengenai lapisan aktif pewarna sehingga memberikan efek hamburan cahaya yang kuat. Hal ini sesuai dengan peningkatan refraksi dan transmitansi teori Fresnel pada SiO₂ dengan TiO₂ (DeVore, 1951):

$$n = \sqrt{n_0 n_s} \quad (2.1)$$

Dimana n_0 merupakan indeks bias lapisan luar, n merupakan indeks bias lapisan tengah dan n_s merupakan indeks bias lapisan dalam. Indeks bias (n_0) dari cahaya datang di udara adalah 1, sehingga n harus sesuai dengan akar dari n_s . Diketahui indeks bias SiO₂ (n=1,5) dan TiO₂ ($n_s=2,52$) menunjukkan akar dari n_s sekitar 1,59. Namun, penurunan lebih lanjut n_s merupakan penyesuaian dari struktur nanoporous TiO₂ dan menghasilkan kesesuaian $n = \sqrt{n_0 n_s}$ (DeVore, 1951). Dispersi optik pada TiO₂ (DeVore, 1951):

$$n_s^2 = 5,913 + \frac{0,2441}{\lambda^2 - 0.803} \quad (2.2)$$

Dimana λ merupakan panjang gelombang dari sinar datang. Dispersi optik pada SiO₂ (Gosh, 1999):

$$n^2 = 1,286 + \frac{1,0704\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01} + \frac{1,102\lambda^2}{\lambda^2 - 100} \quad (2.3)$$

Dari hukum Fresnel didapatkan hubungan:

$$t_{12} = \frac{2n_1}{n_1 + n}, t_{23} = \frac{2n}{n_2 + n}, r_{21} = \frac{n_1 - n}{n_1 + n}, r_{23} = \frac{n_2 - n}{n_2 + n} \quad (2.4)$$

Dimana t_{12} merupakan amplitudo transmisi dari udara ke SiO_2 , t_{23} merupakan amplitudo transmisi dari SiO_2 ke TiO_2 , r_{12} merupakan amplitudo reflektansi dari udara ke SiO_2 , r_{23} merupakan amplitudo reflektansi dari SiO_2 ke TiO_2 . Peningkatan transmisi dari SiO_2 dengan TiO_2 fotoanoda setelah pemantulan dan transmisi berulang dapat dihitung berdasarkan:

$$T = \frac{(t_{12}t_{23})^2}{1 - 2r_{12}r_{23} \cos \varphi + (r_{12}r_{23})^2} \quad (2.5)$$

Dengan T merepresentasikan transmisi, $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos \theta$ adalah perbedaan fasa, d adalah ketebalan SiO_2 , θ adalah sudut cahaya datang.

Selain itu, SiO_2 dipilih karena tidak hanya sebagai penghambur yang baik, tetapi juga dapat menjadi penghalang antara TiO_2 dan elektrolit. SiO_2 juga dapat meningkatkan pemanenan cahaya serta dapat menghambat rekombinasi tanpa mengurangi tingkat penyerapan pewarna pada film TiO_2 . Dengan adanya peningkatan pemanenan cahaya dan pengurangan rekombinasi dapat meningkatkan efisiensi sebesar 50% (Tanvi et al., 2016).

Lumpur Sidoarjo memiliki kandungan silika sebesar 55 %, sehingga mempunyai prospek untuk disintesis dan didapatkan silika orde nano yang mempunyai kemurnian tinggi yaitu 88,4 - 95,7 wt% pada pH 7 dengan metode kopresipitasi. Penurunan pH akhir larutan dapat meningkatkan kemurnian nanosilika yang dihasilkan, namun penurunan pH akhir larutan menyebabkan turunnya massa silika yang dihasilkan (Pribadi et al., 2013).

SiO_2 hasil ekstraksi dari lumpur Sidoarjo memiliki puncak pada $2\theta = 24,968^\circ$, memiliki puncak yang tidak tajam dan cenderung melebar, sehingga mengindikasikan nanopartikel SiO_2 dari lumpur Sidoarjo merupakan SiO_2 amorf. Nanopartikel SiO_2 ekstraksi lumpur memiliki butiran-butiran nanopartikel yang

berbentuk bulatan tidak sempurna, kecil, dan polidispers, dengan ukuran partikel antara lain 51,97 nm, 56,61 nm 59,78 nm, 60,30 nm, 64,59 nm, dan 64,84 nm.

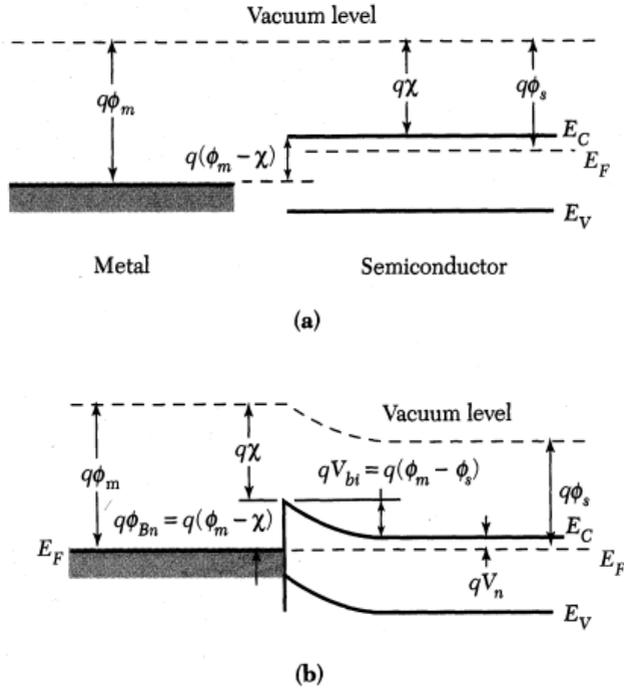
Selain puncak utama milik SiO_2 , pada ekstraksi lumpur ditemui 2 puncak lain pada $2\theta = 45,556^\circ$ yang merupakan milik $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dan pada $2\theta = 31,786^\circ$ yang merupakan milik albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). yang berfungsi untuk menghambat laju rekombinasi dan sebagai partikel penghambur sehingga kemampuan absorpsi *dye* lebih besar (Puspitasari, 2016).

Tabel 2.1 Komposisi SiO_2 hasil ekstraksi lumpur Sidoarjo (Puspitasari, 2016)

Elemen	Weight %	Atomic %
O	53,74	59,24
Na	3,82	2,70
Al	5,21	3,14
Si	15,17	8,78

2.2.4 Struktur *Core-Shell* Au@ SiO_2 Sebagai DSSC

Penambahan logam mulia diharapkan dapat memberikan peningkatan efisiensi pada DSSC. Logam mulia dapat meningkatkan aktifitas fotokatalik pada cahaya tampak karena menghambat rekombinasi elektron serta adanya efek plasmonik serta dapat meningkatkan pemanenan cahaya (Ye et al., 2013).



Gambar 2.4 Diagram pita energi (a) Logam dan semikonduktor nonequilibrium termal (b) Kontak logam semikonduktor pada keseimbangan termal (Sze, 1985)

Gambar 2.4 merupakan diagram pita energi logam pada semikonduktor tipe n di saat belum kontak dan setelah kontak. Di saat tidak ada tegangan bias, diagram pita berada pada kondisi kesetimbangan termal dari kedua material. Fungsi kerja logam ($q\phi_m$) berbeda dengan fungsi kerja semikonduktor ($q\phi_s$). Fungsi kerja didefinisikan sebagai perbedaan energi antara tingkat Fermi dan tingkat vakum. Terdapat afinitas elektron ($q\chi$) yang merupakan perbedaan energi antara pita konduksi dan tingkat vakum pada semikonduktor. Ketika logam membuat kontak dengan semikonduktor, tingkat Fermi pada kedua material sama pada kesetimbangan termal. Pada kondisi ideal, tinggi penghalang

(*barrier*) pada semikonduktor tipe n (ϕ_{Bn}) merupakan perbedaan antara fungsi kerja logam ($q\phi_m$) dan afinitas elektron semikonduktor ($q\chi$) (Sze, 1985).

$$q\phi_{Bn} = q\phi_m - q\chi \quad (2.6)$$

Schottky barrier mengacu pada kontak antara logam dan semikonduktor yang memiliki ketinggian *barrier* yang besar ($\phi_{Bn} \gg kT$). Pada sisi semikonduktor, V_{bi} merupakan harga tegangan difusi (*build-in potential*) yang dibutuhkan oleh elektron pada pita konduksi untuk berpindah menuju logam dan qV_n merupakan jarak antara batas bawah dari pita konduksi dengan tingkat Fermi (Sze, 1985).

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - V_n \quad (2.7)$$

Pada saat kesetimbangan termal, kerapatan arus seimbang dari kedua sisi, sehingga tidak menghasilkan arus keluaran. Elektron pada semikonduktor yang akan mengalir menuju logam dilawan oleh aliran elektron dari logam menuju semikonduktor dengan seimbang. Komponen arus ini proporsional dengan kerapatan dari elektron pada batasan. Pada permukaan semikonduktor, elektron dapat keluar secara termal menuju logam jika energinya diatas dari tinggi *barrier*. Pada kesetimbangan termal didapatkan (Sze, 1985):

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| = C_1 N_C \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.8)$$

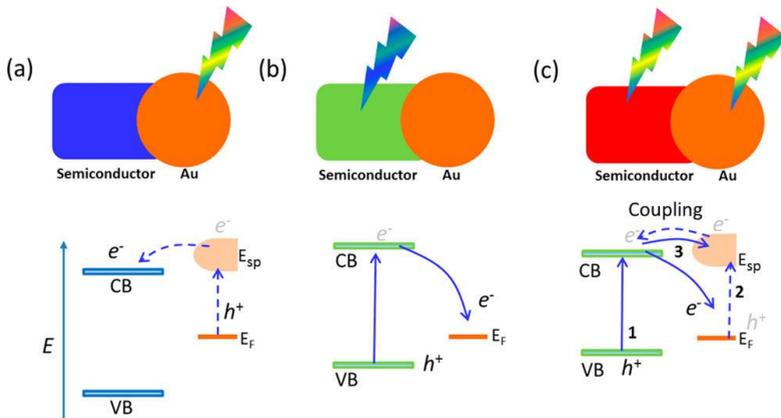
Dimana fungsi kerja semikonduktor ($q\phi_s$) digantikan dengan tinggi *barrier* semikonduktor tipe n ($q\phi_{Bn}$), N_C adalah densitas keadaan di pita konduksi, $J_{m \rightarrow s}$ adalah arus dari logam ke semikonduktor, $J_{s \rightarrow m}$ adalah arus dari semikonduktor ke logam, kT adalah energi termal dan C_1 adalah konstanta.

Sifat penyearah oleh *Schottky barrier* ini berguna pada DSSC sebagai penghalang terjadinya rekombinasi elektron. Elektron yang telah diinjeksikan dari logam mulia ke semikonduktor, terhalang untuk kembali lagi ke logam oleh *Schottky barrier*. Menurut (Chang, et al., 2011) kontak logam dan

semikonduktor yang memiliki perbedaan tingkat Fermi TiO_2 (3.2 eV) dan Au (5.1 eV), dimana tingkat Fermi Au lebih rendah dari TiO_2 (semikonduktor tipe n), mampu membentuk *Schottky barrier* di antaranya. Elektron yang telah melewati pita energi LUMO dari pewarna dan dipenetrasi ke pita konduksi TiO_2 tidak dapat kembali ke molekul pewarna ataupun elektrolit dikarenakan adanya *Schottky barrier* ini, sehingga efisiensi dalam injeksi *hot electron* menuju fotoanoda dapat meningkat secara efektif (Chang, et al., 2011).

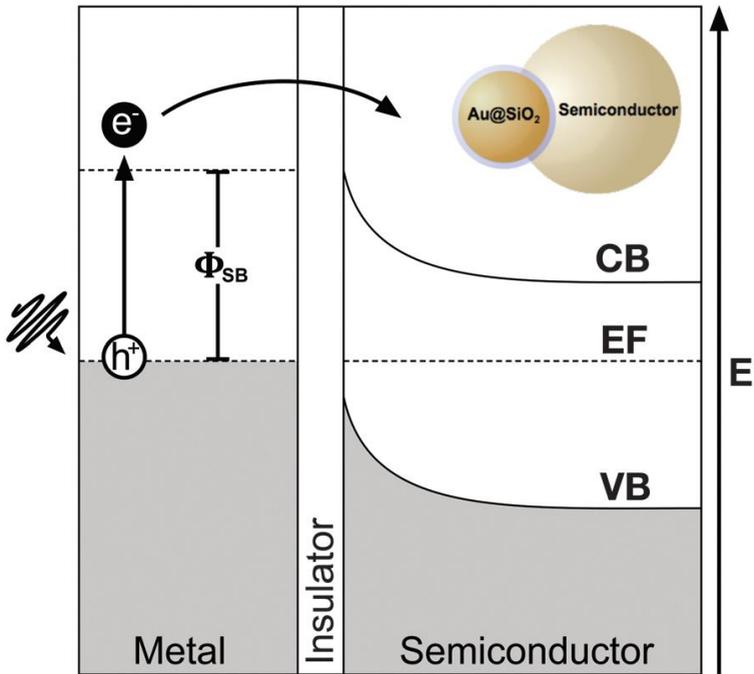
Kontak logam langsung dengan semikonduktor membentuk *Schottky barrier*, namun dapat terjadi *loss* pada depan permukaan logam *Schottky* dikarenakan elektron terdifusi kembali melawan arah medan listrik pada kontak tersebut dan berekombinasi dengan *hole* yang terkumpul di permukaan logam. Sehingga dibutuhkan lapisan pelindung tipis untuk mengurangi kecepatan rekombinasi ini. Elektron yang telah terselamatkan dari rekombinasi akan dipengaruhi oleh medan listrik sekitarnya untuk bergerak pada arah yang tepat. Hal ini menyebabkan elektron sebagian berkontribusi menjadi arus keluaran dan sebagian lagi hilang oleh rekombinasi.

Kecepatan rekombinasi permukaan yang rendah juga menghambat terkumpulnya *hole* pada permukaan logam yang menumpuk di kontak logam-insulator-semikonduktor. Perlu diperhatikan bahwa lapisan pelindung harus tipis agar tidak mengurangi keluaran arus akibat terbentuknya hambatan seri. Lapisan pelindung tipis pada kontak logam-semikonduktor mampu mengurangi kecepatan rekombinasi permukaan sebesar 10^4 cm/s dibandingkan dengan logam-semikonduktor saja sebesar 10^7 cm/s. Panel surya dengan MIS (*metal-insulator-semiconductor*) memiliki kecepatan rekombinasi permukaan sebesar 10^4 cm/s juga menghasilkan medan negatif dan *fill factor* yang lebih besar daripada MS (*metal-semiconductor*) yang memiliki kecepatan rekombinasi permukaan sebesar 10^7 cm/s (Debnath & Chatterjee, 1995).



Gambar 2.5 Skematik proses elektron transfer pada Au-semikonduktor heterostruktur (a) hanya Au tereksitasi, (b) hanya semikonduktor yang tereksitasi dan (c) eksitasi serentak dari Au dan semikonduktor (Dutta, Mehetor, & Pradhan, 2015)

Transfer elektron pada Gambar 2.5 jalur 1 menunjukkan eksitasi semikonduktor dari pita valensi ke pita konduksi diikuti oleh transfer elektron menuju level Fermi Au. Jalur 2 menunjukkan eksitasi elektron dari level Fermi ke *state* plasmonik permukaan Au menuju pita konduksi semikonduktor. Jalur 3 menunjukkan pasangan eksitasi dari semikonduktor dan plasmonik Au. Terdapat kemungkinan terjadinya *photosensitized* dan penyerapan cahaya matahari baik dari logam maupun semikonduktor, dimana material merupakan pasangan plasmonik emas dengan semikonduktor yang memiliki pita celah rendah. Kontak logam dengan semikonduktor tak hanya menghasilkan perlambatan rekombinasi elektron tapi juga kemungkinan eksitasi dari kedua sisi secara serentak. Kondisi dimana logam dan semikonduktor adalah *photosensitive* merupakan hal yang sangat menjanjikan dari keduanya untuk menyerap cahaya dan menghasilkan lebih banyak pembawa muatan eksitasi foton (Dutta, Mehetor, & Pradhan, 2015).

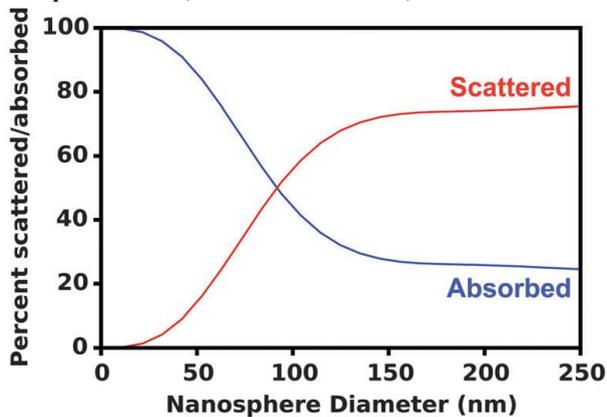


Gambar 2.6 Skema energi diagram dari proses transfer *hot electron* (Erwin, et al., 2016)

Gambar 2.6 menunjukkan proses transfer *hot electron*. Diawali dengan eksitasi yang berkelanjutan oleh permukaan plasmon dari logam mulia menghasilkan pasangan *hot electron* dan *hole* diikuti dengan difusi dari *hot electron* menuju antar muka logam-semikonduktor. *Hot electron* dengan energi yang cukup melintasi *Schottky barrier* dan menembus lapisan tipis insulator untuk masuk ke pita konduksi dari semikonduktor terdekat. *Hot electron* dapat terjadi jika tingkat Fermi dari logam dan semikonduktor seimbang dan memiliki jalur bagi elektron untuk berpindah diantaranya. Agar dapat terjadi *hot electron* lapisan pelindung logam (SiO₂) harus lebih tipis dari elektron *tunneling barrier*, yaitu 3-5 nm untuk SiO₂. Karena logam merupakan pengumpul elektron, lapisan silika berfungsi sebagai isolasi elektrik dari logam, meminimalisir rekombinasi dari

pasangan elektron-*hole*, dan pelindung logam dari terjadinya korosi oleh elektrolit (Erwin, et al., 2016).

Lapisan silika dengan ketebalan $\sim 3\text{-}5$ nm cukup untuk menyediakan kestabilan kimiawi dan termal pada logam tanpa mengurangi medan elektromagnetik yang mengelilingi permukaan logam. Lapisan silika yang lebih tebal (>10 nm) tidak hanya menghasilkan pergeseran ke spektral merah (*red-shift*) dari resonansi plasmon karena indeks bias yang besar dari silika, tapi juga melindungi osilasi elektron pada logam yang menyebabkan peredaman plasmonik (Erwin, et al., 2016).



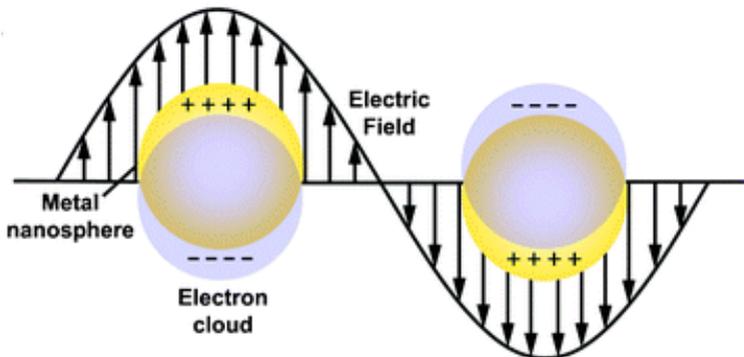
Gambar 2.7 Persentase penghamburan dan penyerapan cahaya pada emas (Au) terhadap ukuran nanopartikel (Erwin, et al., 2016)

Distribusi ukuran partikel emas (Au) juga mempengaruhi sifat penyerapan dan penghamburan cahaya yang dihasilkan (Gambar 2.7). Emas dengan ukuran partikel yang besar dapat secara baik menghamburkan cahaya agar meningkatkan cahaya yang diserap oleh pewarna walaupun berjarak ratusan nanometer dari emas, inilah yang disebut dengan *far-field scattering* (penghambur medan jauh). Ukuran emas yang kecil menyebabkan interaksi plasmonik dari permukaan emas dan cahaya yang diserap dengan meningkatkan medan lokal elektromagnetik, disebut *electromagnetic near-field enhancement* (peningkatan medan lokal elektromagnetik) (Erwin, et al., 2016).

membuat elektroda logam stabil di udara bebas dan memiliki kontak yang baik dengan lapisan pewarna (Khatiri, et al., 2012). Molekul pewarna yang teroksidasi meregenerasi elektron dari elektrolit melalui reaksi redoks dan teregenerasi. Elektrolit sendiri diregenerasi melalui elektroda lawan platinum oleh elektron yang melewati rangkaian eksternal (Erwin, et al., 2016).

2.4 Efek LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*)

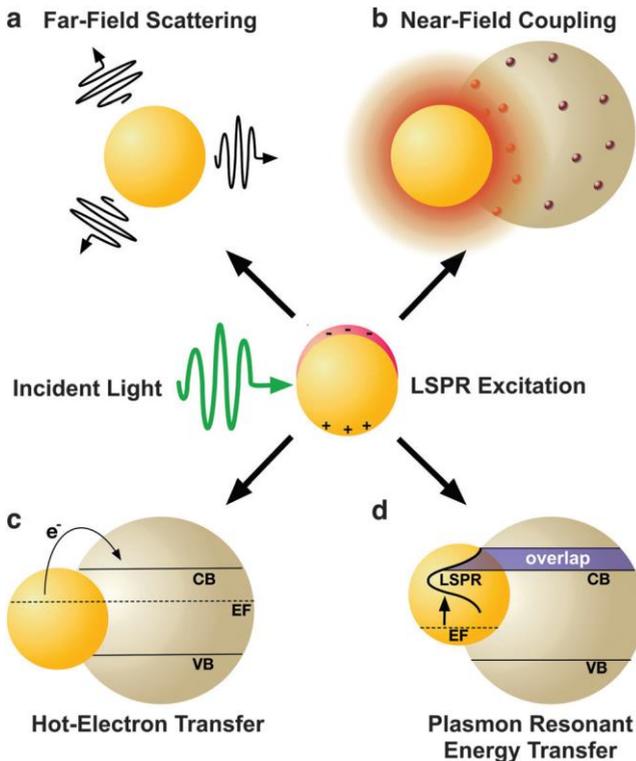
Localized Surface Plasmon Resonance merupakan suatu fenomena optik yang disebabkan oleh gelombang cahaya yang terperangkap dalam nanopartikel konduktif yang memiliki ukuran lebih kecil daripada panjang gelombang cahaya tersebut. Fenomena ini merupakan hasil dari interaksi antara cahaya masuk dengan awan 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 pemisahan partikel-partikel dari nanopartikel (Gambar 2.9).



Gambar 2.9 Skema LSPR (Willets & Van Duyne, 2006)

Medan elektromagnetik yang sangat intens dan lokal, yang disebabkan oleh LSPR membuat nanopartikel menjadi transduser yang sangat sensitif terhadap sedikit perubahan indeks bias lokal. Untuk beberapa molekul organik dengan indeks bias yang relatif tinggi, menyebabkan nanopartikel pada pergeseran merah (Willets & Van Duyne, 2006). DSSC dengan material plasmonik

memiliki skema transfer elektron yang agak berbeda. *Hot electron* dan *hole* yang dihasilkan dari eksitasi permukaan plasmon dapat diinjeksikan secara bersamaan ke dalam pita konduksi TiO_2 dan dari elektrolit berlangsung dalam selang waktu *femtosecond*. Pembawa *hot charge* yang tereksitasi dan akumulasi dari muatan elektroda lawan akan mendorong pasangan *electron-hole* bergeser ke tingkat Fermi yang memungkinkan terjadi transfer secara termal, baik menuju ke pita konduksi TiO_2 maupun ke elektrolit (Jang et al., 2014).



Gambar 2.10 Skema ilustrasi peningkatan arus foto efek LSPR (Erwin, et al., 2016)

Gambar 2.10 menunjukkan skema peningkatan kerapatan arus tidak hanya disebabkan oleh eksitasi pewarna karena efek

LSPR yang berkaitan dengan peningkatan *near-field* saja, tetapi juga dipengaruhi oleh pembangkitan arus foton tambahan yang diberikan oleh transfer *hot electron* dari struktur *core-shell plasmonic* ke pita konduksi TiO₂, penghamburan foton pada *far-field* dan resonansi plasmonik terhadap transfer energi (Erwin, et al., 2016).

2.5 Pengaruh Modifikasi Fotoanoda terhadap Absorbansi

Modifikasi fotoanoda pada DSSC dapat meningkatkan absorbansi atau penyerapan terhadap panjang gelombang tampak, baik dengan penambahan partikel penghambur maupun material *plasmonic*. Besarnya intensitas absorbansi pada struktur *core-shell* disebabkan karena efek penghambur yang lebih kuat. Teori hamburan Mie menyatakan bahwa, efek penghambur dipengaruhi oleh besarnya perbedaan indeks bias antara partikel penghambur dengan media di sekitarnya (Wang, et al., 2013). Teori hamburan Mie digunakan untuk hamburan elektromagnetik oleh sebuah benda sferis dalam radius R, persamaan hamburan Mie dapat dilihat pada persamaan berikut (Hahn, 2009).

$$\sigma_{scat} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \left(|a_n|^2 + |b_n|^2 \right) \quad (2.9)$$

Teori hamburan Mie mencakup penyelesaian hamburan dari gelombang elektromagnetik pada partikel sferis homogen (penyerapan atau non penyerapan) tanpa terikat pada ukuran partikel tertentu. Saat gelombang elektromagnetik yang berinteraksi dengan partikel diskrit, orbit elektron dalam molekul penyusun beresilasi secara periodik dengan frekuensi yang sama dari gelombang elektromagnetik. Osilasi ini menghasilkan pemisahan muatan dalam molekul secara periodik yang disebut induksi momen dipol. Osilasi induksi momen dipol ini berfungsi sebagai sumber radiasi elektromagnetik yang menghasilkan hamburan cahaya. Momen dipol yang dipancarkan gelombang elektro magnetik memiliki koefisien amplitudo a dan b dari momen magnetik ke n. Dimana parameter a_n dan b_n didefinisikan sebagai berikut (Hahn, 2009):

$$a_n = \frac{\Psi_n(\alpha)\Psi_n'(\alpha) - m\Psi_n(m\alpha)\Psi_n'(\alpha)}{\xi(\alpha)\Psi_n(m\alpha) - m\Psi_n(m\alpha)\xi_n(\alpha)} \quad (2.10)$$

$$b_n = \frac{m\Psi_n(\alpha)\Psi_n'(m\alpha) - \Psi_n(m\alpha)\Psi_n'(\alpha)}{m\xi(\alpha)\Psi_n(m\alpha) - \Psi_n(m\alpha)\xi_n(\alpha)} \quad (2.11)$$

Dengan:

$$\alpha = \frac{2\pi am_0}{\lambda_0} \quad (2.12)$$

Dimana a adalah jari-jari speris partikel, m adalah indeks bias partikel penghambur, m_0 adalah indeks bias sekitar medium dan λ_0 panjang gelombang radiasi pada kondisi vakum. Parameter Ψ_n dan ξ_n didefinisikan sebagai berikut (Hahn, 2009):

$$\Psi_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} J_{n+1/2}(z) \quad (2.13)$$

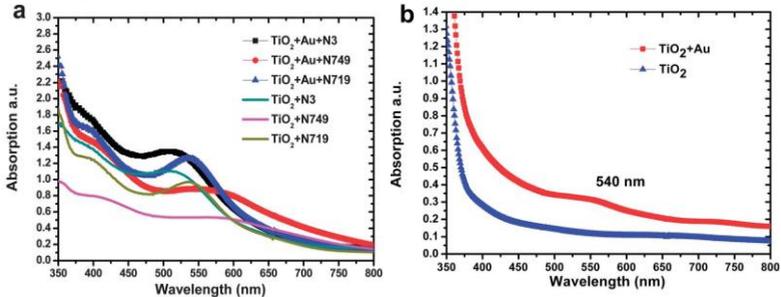
$$\xi_n(z) = \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} H_{n+1/2}(z) \quad (2.14)$$

Parameter Ψ_n dan ξ_n merupakan persamaan Ricatti-Bessel didefinisikan Ψ_n sebagai bentuk dari tipe pertama fungsi speris Bessel orde setengah ($J_{n+1/2}(z)$) dan ξ_n sebagai bentuk dari tipe pertama fungsi speris Hankel orde setengah ($H_{n+1/2}(z)$). Fungsi Ricatti-Bessel dalam orde setengah ini digunakan untuk menyelesaikan kasus gelombang elektromagnetik pada objek speris.

Hamburan Mei merupakan solusi analisis paling sederhana dari persamaan Maxwell dalam mendeskripsikan perilaku dari nanopartikel logam speris disaat tereksitasi dengan medan elektrik. Pada nanopartikel logam speris dengan jari-jari a dalam medium dielektrik, dimana permitivitas logam ϵ_{metal} dan permitivitas medium ϵ_{medium} , hamburan Mie dapat dinyatakan sebagai berikut (Erwin, et al., 2016):

$$\sigma_{\text{scat}} = \frac{8\pi}{3} k^4 a^6 \left| \frac{\epsilon_{\text{metal}} - \epsilon_{\text{medium}}}{\epsilon_{\text{metal}} - 2\epsilon_{\text{medium}}} \right|^2 \quad (2.15)$$

Dimana $k = 2\pi/\lambda$, λ merupakan panjang gelombang cahaya datang. Berikut ini merupakan absorbansi fotoanoda TiO₂ dan TiO₂ yang telah ditambahkan *core-shell* Au@SiO₂ dengan beberapa pewarna dan tanpa pewarna (Gambar 2.11).



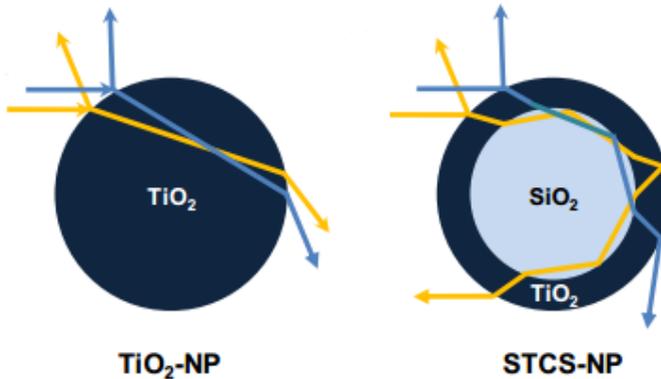
Gambar 2.11 Karakterisasi UV-Vis fotoanoda TiO₂ dan TiO₂+Au@SiO₂ dalam (a) beberapa pewarna (b) tanpa pewarna (Li, et al., 2012)

Gambar 2.11 menunjukkan fotoanoda dengan struktur *core-shell* mengalami peningkatan absorbansi jika dibandingkan dengan fotoanoda yang tidak memiliki struktur *core-shell* dan Peningkatan absorbansi juga ditunjukkan pada fotoanoda dengan pewarna dibandingkan dengan tanpa pewarna. Hal ini dikarenakan penambahan nanopartikel Au dapat memunculkan puncak pada daerah cahaya tampak oleh adanya efek LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*). Penambahan pewarna juga meningkatkan sinergi penyerapan cahaya pada daerah cahaya tampak (Li, et al., 2012).

2.6 Efek Scattering pada Nanopartikel *Core-shell*

Nanokristal TiO₂ yang umumnya digunakan sebagai lapisan fotoanoda DSSC pada dasarnya transparan untuk cahaya tampak, sehingga sebagian besar cahaya yang masuk ke DSSC ditransmisikan melalui lapisan TiO₂ tanpa berinteraksi dengan pewarna. Oleh karena itu, diperlukan lapisan penghambur yang memiliki struktur yang berbeda dengan TiO₂. Hal ini bertujuan

agar cahaya akan terhambur balik ke lapisan aktif dan mengenai pewarna (Son, et al., 2013).



Gambar 2.12 Skema hamburan cahaya pada struktur *core-shell* (Son, et al., 2013)

Gambar 2.12 mengilustrasikan jalur penghamburan cahaya dari TiO_2 dan $\text{SiO}_2@ \text{TiO}_2$ (STCS-NP) berdasarkan optika geometrinya. Cahaya datang dipantulkan dengan cara yang sama pada permukaan TiO_2 dan STCS karena permukaannya terdiri dari TiO_2 . Pada STCS, cahaya yang terpantul ke dalam STCS melewati jalur pantulan internal yang telah termodifikasi dengan perbedaan indeks bias di dalam struktur *core/shell* dan menghasilkan *backscatter* yang kuat. Hal ini menunjukkan struktur dari STCS berkontribusi dalam peningkatan efek penyerapan cahaya dengan meningkatkan probabilitas interaksi antara foton dan molekul pewarna. (Son, et al., 2013).

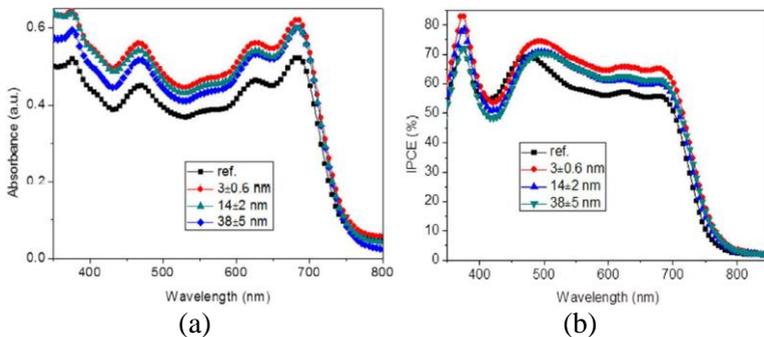
Efek hamburan cahaya yang kuat sebagian besar tergantung pada ukuran partikel dan perbedaan indeks bias antara lapisan aktif dan penghambur. Efisiensi dari hamburan balik dapat merepresentasikan peningkatan penyerapan cahaya karena lebih banyak cahaya yang terperangkap ke dalam DSSC seiring dengan perbedaan indeks bias yang lebih besar (Son, et al., 2013).

Perbedaan indeks bias yang besar antara SiO_2 dan TiO_2 menunjukkan fungsi dari SiO_2 sebagai partikel penghambur. SiO_2 memiliki indeks bias 1,5 sedangkan TiO_2 memiliki indeks bias

2.52. Mekanisme potensial dari peningkatan transmisi pada *photoanode* TiO₂ dengan SiO₂ menurut teori Fresnel ditunjukkan oleh persamaan (2.5).

2.7 Pengaruh Ketebalan Silika pada DSSC

Penggunaan nanopartikel *core-shell* ke dalam DSSC mampu menyediakan penghamburan pada *far-field* dan meningkatkan efisiensi dari jalan cahaya yang lebih panjang. Pada penelitian sebelumnya, dilakukan penggabungan nanopartikel logam *core-shell* ke DSSC, dimana inti logamnya adalah Au atau Ag dan lapisan luarnya adalah SiO₂. Pelapisan nanopartikel logam ini bertujuan untuk: (1) Jika *shell* bersifat isolator, maka dapat mengisolasi nanopartikel Au dari sekitarnya. Hal ini penting karena nanopartikel Au sendiri dapat menjebak elektron dan mempercepat reduksi I₃⁻ ke I⁻ yang merupakan kerugian mekanisme transfer elektron (2) Menumbuhkan lapisan *shell* yang sangat tipis sehingga memungkinkan zat molekul pewarna berada cukup dekat dengan nanopartikel logam untuk meningkatkan efek plasmonik. (3) *Shell* menjadi pelindung nanopartikel Au terhadap I₃⁻ dimana kontak langsung akan menyebabkan korosi terhadap Au. Dari ketiga faktor tersebut diketahui bahwa ketebalan dari *shell* SiO₂ akan mempengaruhi peformansi DSSC (Sheehan, et al., 2012)



Gambar 2.13 (a) Spektrum absorbansi *core-shell* Au@SiO₂ dengan variasi ketebalan SiO₂ pada polimer plasmonik PEDOT:PSS/PTB7 (b) Karakteristik

IPCE tanpa dan dengan *core-shell* Au@SiO₂
(Zhang, et al., 2016)

Penambahan *core-shell* Au@SiO₂ pada lapisan fotoaktif dapat berfungsi memaksimalkan permukaan energi plasmon dan meningkatkan efisiensi konversi daya (PCE) pada sel surya. Gambar 2.13a menunjukkan bahwa dengan lapisan silika yang lebih tipis akan menyebabkan kenaikan daya serap (nilai absorbansi) yang lebih tinggi. *Core-shell* dengan tebal lapisan silika 2-3 nm, dapat menghasilkan kerapatan arus tertinggi 21,2 mA.cm⁻² dan PCE 9,55%. Sebaliknya, dengan kenaikan ketebalan lapisan SiO₂ sebesar 38 nm secara signifikan menurunkan PCE dan Jsc menjadi 8,25% dan 18,5 mA.cm⁻². Hal ini disebabkan karena *core-shell* Au@SiO₂ dengan tebal lapisan silika 3 nm memiliki medan dekat yang kuat yang dihasilkan oleh NR-Au yang mampu mendukung penyerapan cahaya pada lapisan fotoaktif. Selain itu, redaman LSPR yang lebih lambat di sekitar NR-Au membuat intensitas medan dekat tetap bernilai tinggi pada lapisan fotoaktif, sehingga mampu meningkatkan penyerapan cahaya, yang disertai dengan peningkatan Jsc dan PCE yang signifikan pada Gambar 2.13b. Induksi medan dekat NR-Au tidak mencukupi untuk digunakan dalam peningkatan performansi jika lapisan *core-shell* silika sangat tebal. Sebaliknya, medan dekat berada pada tingkat yang tinggi ketika dilapisi silika yang sangat tipis (Zhang, et al., 2016).

2.8 Efisiensi Konservasi Cahaya Menggunakan IPCE

Nilai IPCE menunjukkan proses transfer elektron dari pewarna ke semikonduktor dan dari I yang teroksidasi ke pewarna (Hara, et al., 2000). *Incident Photon to Current Conversion Efficiency* (IPCE) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur seberapa efektifitas DSSC dalam mengkonversi foton menjadi arus. Nilai IPCE akan 100 % ketika semua foton menghasilkan pasangan elektron-hole. Akan tetapi pada kenyataannya nilai IPCE selalu kurang dari 100 %, hal ini disebabkan karena adanya refleksi foton, 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).

$$IPCE [\%] = \frac{1240[eV.nm] \times J_{sc} [\mu A cm^{-2}]}{\lambda[nm] \times P_{cahaya} [\mu W cm^{-2}]} \quad (2.16)$$

Dengan:

1240 = Faktor konversi cahaya ke arus

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

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

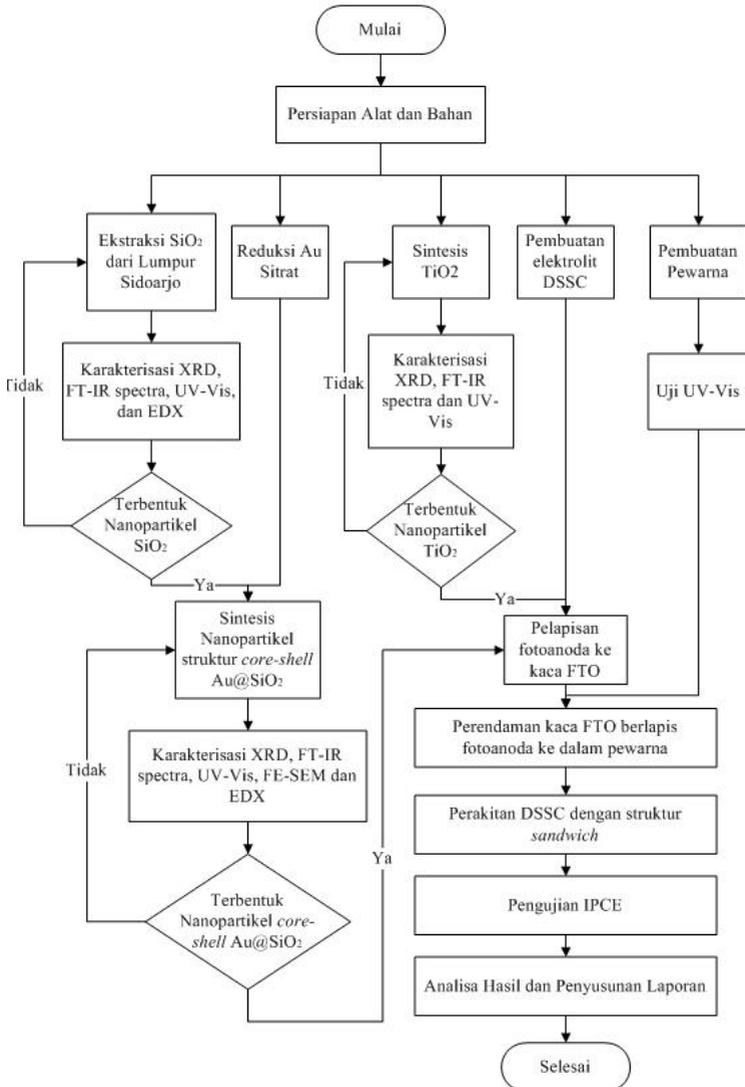
P_{cahaya} = Kerapatan daya yang diukur pada setiap panjang gelombang ($\mu W cm^{-2}$).

IPCE atau dikenal dengan efisiensi kuantum eksternal dapat memberikan estimasi dari total arus photon dari DSSC pada semua jenis iluminasi yang mengenai luasan aktif dari fotoanoda, baik dari sumber cahaya matahari, halogen dan sumber cahaya lainnya. IPCE memberikan rasio antara hasil generasi arus yang dikonversikan elektron pada DSSC dengan banyaknya foton yang mengenai luasan aktif pada panjang gelombang tertentu. IPCE dihitung dengan mengukur arus dari DSSC pada variasi panjang gelombang dengan kerapatan daya yang diketahui pada masing-masing panjang gelombang (Varghese & Grimes, 2008).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berikut merupakan diagram alir proses dari tugas akhir ini:



Gambar 3.1 Metodologi penelitian

Tahapan penelitian tugas akhir pada Gambar 3.1 dapat dijelaskan sebagai berikut:

3.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini antara lain *magnetic stirrer*, *hot plate*, *oven*, *furnace*, timbangan digital, pH meter, labu erlenmeyer, gelas beker, gelas ukur, pipet tetes, spatula logam, spatula keramik dan kertas saring.

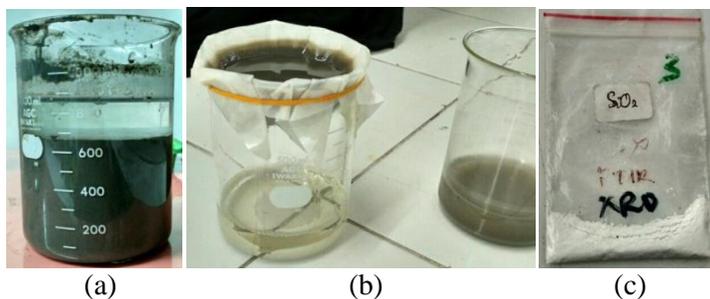
Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini antara lain, lumpur Sidoarjo, HCl 37%, NaOH, NH₄OH 28%, *ethanol* (EtOH), aquades, TiCl₃, (*3-Aminoprophyl*) *trimethoxysilane* (APTMS, 97%), *ammonium* (25% NH₃), HAuCl₄.3H₂O (49%), *trisodium citrate* (C₆H₅Na₃O₇*2H₂O), *deionized water*, kalium iodida (KI), iodida (I), PEG 4000, chloroform, *acetonitrile*, *ruthenium N-719*, *acetic acid* (98% CH₃COOH) dan Triton X-100.

Bahan yang dibutuhkan untuk perakitan DSSC antara lain kaca *Fluorine doped tin oxide* (FTO) (tipe *soda-lime*, resistasi 8Ω/sq, 20 mm x 20 mm, tebal 3,2 mm, TEC 8, Dyesol), pasta fotoanoda titania (TiO₂) dengan penambahan *Core-shell* Au@SiO₂, *dye ruthenium* (N-719, Dyesol), elektrolit iodide/triiodide, dan kaca FTO *Pt-Coated* (luas lapisan 20 mm x 20 mm, tebal 3,2 mm, TEC 15, Dyesol).

3.2 Ekstraksi Nanopartikel SiO₂ dari Lumpur Sidoarjo

Nanopartikel SiO₂ dari lumpur Sidoarjo diekstrak dengan menggunakan metode kopresipitasi. Lumpur Sidoarjo direndam dalam larutan HCl selama 24 jam untuk menghilangkan partikel-partikel pengotor (Gambar 3.2a). Kemudian lumpur tersebut dicuci dengan menggunakan aquades dan dikeringkan di bawah sinar matahari dan dihaluskan hingga 250 mesh. 10 gram lumpur Sidoarjo dan 60 ml NaOH (7 M) dicampur dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama satu jam dengan suhu 70°C. Ditambahkan aquades sebanyak 250 ml ditambahkan ke dalam larutan lumpur sebelum disaring menggunakan kertas saring (Gambar 3.2b). Selanjutnya HCl 37% ditambahkan ke dalam larutan hasil penyaringan hingga didapatkan larutan dengan pH 7. Setelah didapatkan pH 7 dan terbentuk endapan

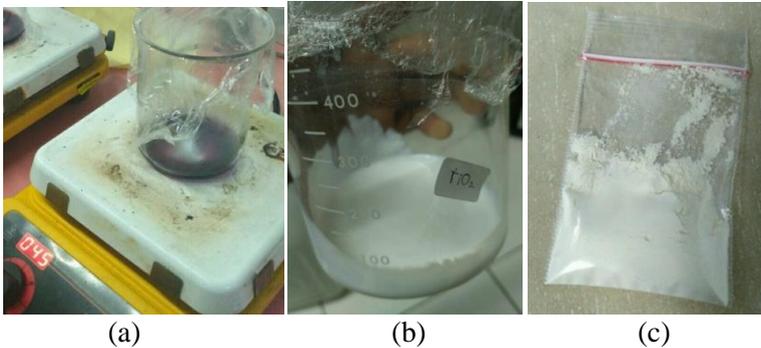
putih SiO_2 , selanjutnya dicuci dengan menggunakan aquades untuk menghilangkan kandungan asam, basa, maupun garam yang terkandung di dalamnya. Endapan SiO_2 ini disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 80°C selama 24 jam (Gambar 3.2c) (Pribadi & Munasir, 2013).



Gambar 3.2 Proses ekstraksi SiO_2 lumpur Sidoarjo (a) Pencucian, (b) Penyaringan, dan (c) Hasil kalsinasi SiO_2 lumpur Sidoarjo

3.3 Sintesis Nanopartikel TiO_2

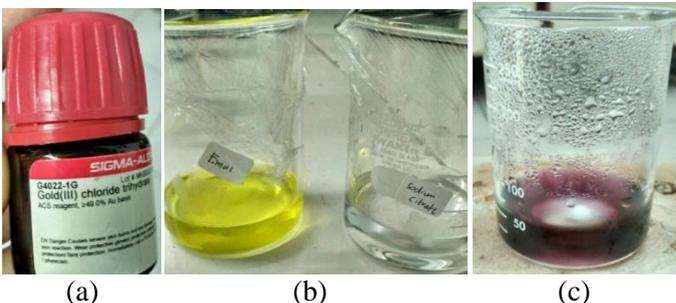
Nanopartikel TiO_2 disintesis dari prekursor TiCl_3 dengan metode kopesipitasi. 10 ml TiCl_3 , 4,7 ml aquades, dan 0,3 ml HCl diaduk selama 3 menit dengan suhu 45°C . Setelah itu, 20 ml HCl 37% ditambahkan ke dalam larutan tersebut. Setelah beberapa saat, larutan akan berubah warna menjadi ungu tua kemudian 50 ml NH_4OH 25% ditambahkan ke dalam larutan sambil diaduk hingga larutan berwarna ungu kehitaman (Gambar 3.3a). Selanjutnya 50 ml larutan amonia ditambahkan hingga larutan berwarna putih terbentuk. Suspensi yang mengandung endapan putih dicuci dengan menggunakan aquades hingga suspensi tidak berbau amonia (Gambar 3.3b). Selanjutnya untuk mendapatkan TiO_2 fasa anatase maka endapan putih dikalsinasi pada suhu 400°C selama 5 jam (Gambar 3.3c) (Budiarti, 2016).



(a) (b) (c)
Gambar 3.3 Proses sintesis TiO_2 (a) Pencampuran TiCl_3 dengan *ammonia*, (b) Pencucian endapan TiO_2 dan (c) Hasil kalsinasi TiO_2

3.4 Reduksi Au

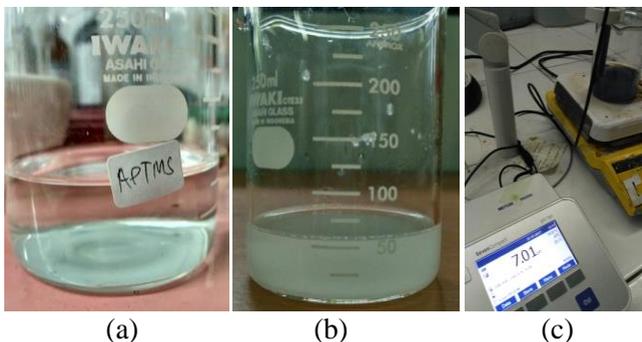
Nanopartikel Au direduksi menggunakan metode Turkevich, 2,5 ml larutan $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (0,2% w/v) (Gambar 3.4a) dalam 50 ml DI-water dipanaskan pada temperatur 150°C hingga mendidih. Kemudian ditambahkan 2 ml *trisodium citrate* (1% w/v) (Gambar 3.4b) sambil diaduk dengan kecepatan tinggi. Larutan tersebut tetap dipanaskan selama 10 menit, sambil terus diaduk hingga warnanya berubah menjadi merah keunguan (*red wine*) dan mencapai temperatur ruang (Gambar 3.4c) (Ziegler & Eychmüller, 2011).



(a) (b) (c)
Gambar 3.4 Proses reduksi emas (a) $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ bubuk, (b) Preparasi larutan emas dan *trisodium citrate* dan (c) Hasil reduksi emas

3.5 Sintesis Nanopartikel Au@SiO₂

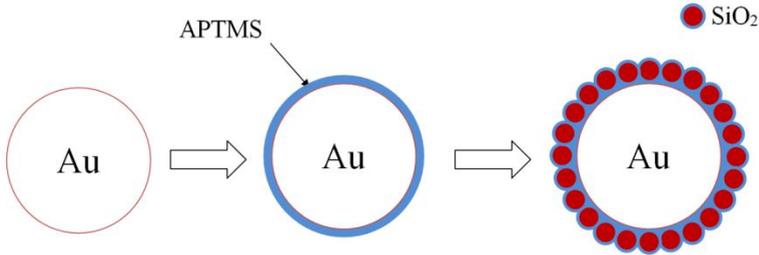
Nanopartikel Au@SiO₂ disintesis dengan metode kopresipitasi. Sebelum sintesis, larutan APTMS (1mM) dipersiapkan, dimana 18,3 μ l APTMS ditambahkan pada 100 ml gelas ukur dan tambahkan DI-water hingga penuh, dan dapat langsung digunakan (Gambar 3.5a). Sintesis Au@SiO₂, masukkan 30 ml larutan reduksi Au ke dalam gelas beker, tambahkan 0,4 ml larutan APTMS (1mM) dan diaduk selama 15 menit (Li, et al., 2012). Kemudian ditambahkan 30 ml, 60 ml, 90 ml, dan 120 ml larutan hasil ekstraksi SiO₂ dari lumpur Sidoarjo (Gambar 3.5b) dan dititrasi dengan HCl hingga pH larutan mencapai 7 (Gambar 3.5c). Kemudian terus diaduk sampai terbentuk endapan. 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 (Budiarti, 2016).



Gambar 3.5 Proses sintesis Au@SiO₂ (a) Persiapan larutan APTMS, (b) Larutan SiO₂ yang telah disaring dan (c) Hasil titrasi campuran Au dan SiO₂

Pembuatan *core-shell* Au@SiO₂ secara garis besar dimulai dari reduksi HAuCl₄.3H₂O menjadi nanopartikel emas (Au) sebagai *core*, lalu dilapisi APTMS sebagai perekat, kemudian ditambahkan larutan basa SiO₂ lumpur Sidoarjo sebagai *shell* dan dititrasi hingga mencapai pH 7 agar mendapat endapan *core-shell*

Au@SiO₂. Skema struktur *core-shell* nanopartikel Au@SiO₂ dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Skema nanopartikel struktur *core-shell* Au@SiO₂

3.6 Karakterisasi Nanopartikel

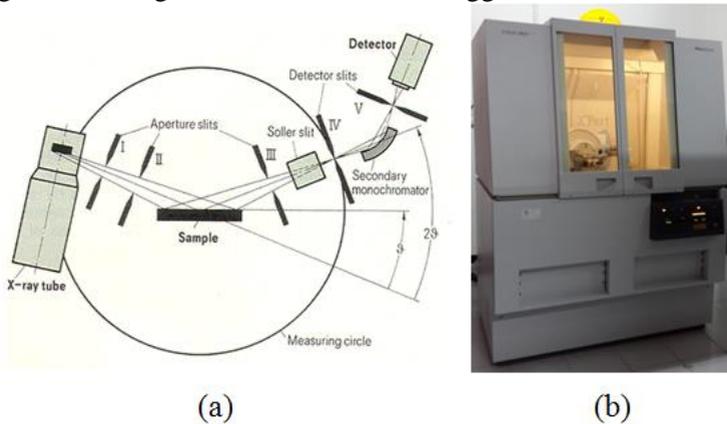
Hasil sintesis nanopartikel SiO₂, TiO₂, dan *core-shell* Au@SiO₂ dilakukan karakterisasi nanopartikel seperti *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)*, *Brunauer Emmet Teller (BET)*, *UV-Vis Spectroscopy*, *Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)* dan *Energy Dispersion X-ray spectroscopy (EDX)*.

3.6.1. *X-Ray Diffraction (XRD)*

X-Ray Diffraction (XRD) adalah suatu metode yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristal material. Selain itu karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)* dapat mengetahui pola difraksi, ukuran dan Miller dari kristal nanopartikel yang diperoleh dari hasil ekstraksi dan sintesis. Berikut pada Gambar 3.7 menunjukkan diagram skematik pengujian material menggunakan XRD dan alat XRD yang digunakan untuk pengujian.

Prinsip kerja pengujian material menggunakan XRD 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 dengan memenuhi hukum Bragg.



Gambar 3.7 (a) Diagram skematik pengujian XRD (b) XRD Philips X'pert MPD

Hukum Bragg menyatakan bahwa perbedaan lintasan berkas difraksi sinar-X harus merupakan kelipatan panjang gelombang, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$n\lambda = d \sin \theta \quad (3.1)$$

Keterangan:

- n = bilangan bulat (1, 2, 3, ...)
- λ = panjang gelombang sinar-X (m)
- d = jarak antar bidang (m)
- θ = sudut difraksi

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 setiap padatan kristalin tertentu, sehingga dapat diketahui material apa saja yang ada pada sampel uji. Semakin tinggi intensitas puncak difraksi yang dihasilkan menunjukkan bahwa material yang terkandung dalam sampel uji semakin kristalin. Begitu juga sebaliknya, semakin

rendah intensitas dan semakin lebar puncak difraksi yang ada menunjukkan bahwa material yang terkandung berbentuk amorf.

Pada penelitian ini, pengujian XRD dilakukan pada sudut bragg 5° hingga 90° serta digunakan untuk melihat jenis kristalinitas, ukuran butir, dan persentase jenis kristal. Hasil pengujian XRD ini berupa grafik yang nantinya akan digunakan untuk menghitung ukuran kristal dari nanopartikel dengan menggunakan persamaan Scherrer (Cullity, 1956).

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta} \quad (3.2)$$

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*) (Verrall, 2013).

$$\% = \frac{(I/I_{\max})}{\Sigma(I/I_{\max})} \times 100\% \quad (3.3)$$

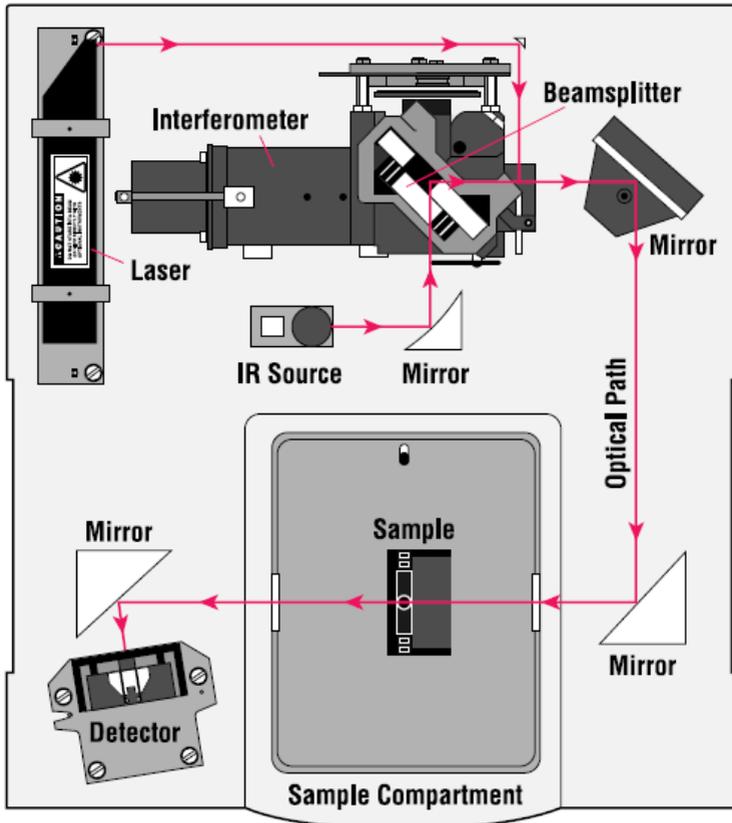
Keterangan:

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

3.6.2. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)*

FT-IR adalah singkatan dari *Fourier Transform InfraRed Spectroscopy* yang merupakan metode dari spektroskopi infra merah. 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 3.8 berikut.



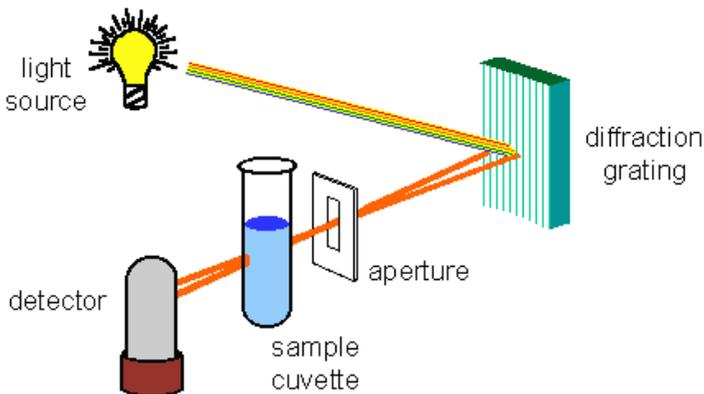
Gambar 3.8 Skema pengujian FT-IR spektrometer (Thermo Nicolet Corp., 2001)

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.

3.6.3. Pengujian UV-Vis *Spectroscopy*

Pengujian UV-Vis *Spectroscopy* merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengetahui penyerapan energi cahaya dari pewarna sebagai fungsi panjang gelombang. Komponen dari UV-Vis *spectrophotometer* antara lain sumber cahaya, monokromator, kompartemen sampel, detektor dan pengukur intensitas cahaya (Gambar 3.9).



Gambar 3.9 Diagram skematik pengujian UV-Vis *spectrophotometer* (Brian, 2000)

Prinsip kerja UV-Vis *spectrophotometer* yaitu, cahaya tampak atau UV-Vis ditembakkan ke sampel, yang dilewatkan monokromator. Cahaya monokromatis tersebut akan ditransmisikan dan diserap. Cahaya yang diserap akan menghasilkan sinyal elektrik pada detektor. Nilai dari adsorbansi berbanding terbalik dengan nilai transmisi. Nilai adsorbansi

bergantung pada jumlah molekul dari larutan, sesuai dengan hukum Lambert Beer.

$$A = \varepsilon \cdot a \cdot b \quad (3.4)$$

A adalah absorptansi, 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.

3.6.4. *Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)*

Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) merupakan salah satu mikroskop elektron yang menghasilkan gambar dari sampel dengan cara *scanning* di atas sampel dalam keadaan vakum dengan berkas elektron energi tinggi yang difokuskan (diameter <10 nm) yang ditembakkan oleh *Field Emission Gun*. *Field Emission* merupakan pelepasan elektron dari ujung tungsten *emitter* yang terkena medan listrik (*electric field*) yang kuat pada suhu tertentu. *Field Emission Gun* sendiri memiliki beberapa tipe menurut suhu pemanasan ujung permukaan tungsten yaitu, *Cold Cathode Type* dan *Schottky-type*. FE-SEM JIB-4610F menggunakan *Schottky-type Electron Gun* dengan memanfaatkan efek Schottky dimana penghalang potensial (*barrier potential*) suatu material berkurang di medan listrik yang kuat, sehingga memudahkan emisi termoelektron. *Schottky-type Electron Gun* memanaskan ujung tungsten *emitter* dengan suhu ~1800 K dan dilapisi dengan zirkonium oksida (ZrO) yang mampu memudahkan emisi elektron dengan mengurangi fungsi kerja dari ujung tungsten (~2,7 eV). Gambar hasil FE-SEM dapat digunakan untuk analisa morfologi mikrostruktur dari sampel dan karakteristik komposisi kimianya.

Cara kerja FE-SEM adalah menggunakan sinar elektron dari *Field Emission Gun* yang dipercepat dengan anoda dan difokuskan menuju sampel. Sinar elektron yang terfokus memindai keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Kumparan pemindai akan melakukan pembelokan pada

elektron sehingga menjadi sekumpulan susunan berkas yang lebih kecil yang disebut berkas pemindaian (*scanning beam*) dan lensa obyektif (magnetik) yang akan memfokuskannya pada permukaan sampel. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor. Intensitas elektron baru ini tergantung pada nomer atom unsur yang ada pada permukaan spesimen. Mikroskop elektron mampu mencapai resolusi sekitar 0,1 - 0,2 nm dan juga bisa mendapatkan beberapa jenis pantulan yang berguna untuk keperluan karakterisasi. Pantulan elektron sekunder menghasilkan topografi dari benda yang dianalisa, sedangkan pantulan *backscattered* elektron memberikan perbedaan berat molekul dari atom-atom yang menyusun permukaan material (Russel, 1995).



Gambar 3.10 FE-SEM (JIB-4610F, *courtesy* JEOL-USA)

3.6.5. *Energy Dispersion X-ray spectroscopy (EDX)*

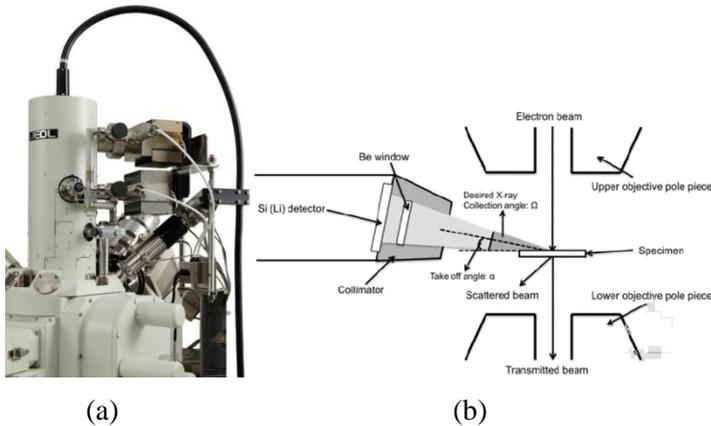
Energy Dispersion X-ray spectroscopy (EDX) merupakan karakterisasi material menggunakan sinar-X yang diemisikan ketika material mengalami tumbukan dengan elektron. Ada empat

komponen utama dari susunan EDX: sumber berkas cahaya, detektor sinar-X, pengolah pulsa, dan penganalisis (Gambar 3.11(b)). Ketika tegangan tinggi elektron mengenai spesimen, elektron meninggalkan lapisan K atom dalam kondisi tekeksitasi. Elektron dari lapisan luar akan mengisi *hole* dari eksitasi elektron tersebut dan pada saat yang sama melepaskan energi dalam bentuk sinar X. Besar energi yang dilepaskan bergantung pada lapisan elektron mana yang tereksitasi dan memiliki informasi spesifik mengenai karakteristik perbedaan level energi elektron dari atom. Silika-litium semikonduktor digunakan sebagai detektor. Untuk mendapatkan informasi dari unsur yang ada dalam sampel, besar energi dari sumber harus melebihi dari batas ambang energi dari unsur tersebut agar dapat mengeksitasi elektron di dalamnya. Hampir keseluruhan unsur pada tabel periodik, namun unsur H, Li dan He yang memiliki energi transisi yang tidak dapat dideteksi, serta unsur logam mulia tidak dapat dideteksi oleh EDX (Ii, 2012).

Sebelum mencapai detektor, masukan energi sinar X melewati *collimator* untuk memastikan hanya energi yang tereksitasi dari sampel saja yang masuk, jendela polimer beryllium berfungsi untuk mempertahankan kondisi vakum di dalam detektor disaat sinar X masuk. Akhirnya sinar X yang mencapai kristal silikon menghasilkan muatan sinyal yang dikuatkan oleh FET. Besar muatan yang masuk proposional dengan karakteristik energi dari sinar X mengindikasikan informasi dari sampel telah masuk dan dianalisis sesuai dengan unturnya. Tabung *cryostat* berfungsi untuk mendinginkan detektor dan mengurangi sinyal gangguan (Ii, 2012).

Sistem EDX yang paling umum ditemukan pada SEM. SEM dilengkapi dengan sebuah katoda dan lensa magnet untuk menciptakan dan memusatkan suatu berkas cahaya elektron, dan sejak 1960-an SEM telah dilengkapi kemampuan untuk menganalisa unsur. EDX detektor sendiri sudah termasuk dalam FESEM JIB-4610F dalam nama R-BEI detektor (Gambar 3.11(a)). Suatu detektor digunakan untuk mengkonversikan energi sinar-X ke dalam sinyal tersebut dan melewatkan sinyal

tersebut ke suatu penganalisis untuk menampilkan data dan analisa luas dari pengembangan cacat permukaan (Chardin, et al., 1998).



Gambar 3.11 (a) EDX *detector* pada JIB-4610F (*courtesy* JEOL-USA), (b) Skematis dari EDX (Ii, 2012)

3.6.6. ImageJ

Image J merupakan aplikasi gratis *image processing* yang dikembangkan oleh *US National Institute of Health* sebagai alat untuk menganalisis ukuran partikel, luasan area, manipulasi intensitas, kontras, konvolusi, analisis Fourier, penajaman dan penghalusan gambar, deteksi sudut, menghilangkan *noise* hingga menghitung jumlah piksel dalam gambar. Dapat melakukan transformasi geometris seperti pengaturan skala, perputaran dan seleksi gambar. Hasil analisis dapat ditampilkan dalam bentuk data tabel, diagram garis dan histogram. Dalam perhitungan partikel dari gambar EDX, menentukan skala dilakukan dengan menarik garis lurus sesuai dengan skala yang tertera pada gambar EDX. Titik-titik piksel dari material yang memiliki warna tersendiri diseleksi dengan mengatur *Threshold*. Untuk mengetahui distribusi ukuran partikel, digunakan analisis partikel dari tab *Analyze* dan didapatkan banyak urutan partikel dengan

ukuran pada tiap masing-masing partikel berdasarkan ukuran pikselnya (Ruzicka, 2013).

3.7 Prosedur Perakitan DSSC

3.7.1 Pembuatan Elektrolit

Elektrolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasangan iodide/triiodide. Langkah pertama dalam pembuatan elektrolit adalah 0,8 gram kalium iodida (KI) dilarutkan dalam 10 ml *acetonitrile* hingga larut sepenuhnya. Setelah itu, 0,127 gram iodide (I_2) ditambahkan ke dalam larutan elektrolit sambil terus diaduk hingga I_2 larut sepenuhnya. PEG 4000 sebanyak 7 gram dilarutkan dalam 25 ml *chloroform* hingga larut sempurna dan membentuk gel. Kemudian larutan elektrolit dicampur dengan gel tersebut dan diaduk di atas *magnetic stirrer* selama 1 jam pada suhu 80°C (Wahyuono, 2013).

3.7.2 Pembuatan Pewarna

Pewarna yang digunakan dalam penelitian ini adalah ruthenium kompleks N-719 yang merupakan pewarna industri standar. Pewarna ini memiliki warna merah bata. Pewarna yang digunakan adalah 0,3 mM larutan $C_{58}H_{86}N_8O_8RuS_2$ (N-719), dari penjumlahan massa atom relatif formula kimianya didapatkan massa molekul relatif (M_r) sebesar 1187. Sehingga untuk membuat 0,3 mM larutan N-719, dicampurkan 0,07122 gram N-719 kedalam 200 ml etanol 98% (Puspitasari, 2016).

3.7.3 Fabrikasi DSSC

Dalam penelitian ini TiO_2 yang digunakan memiliki fasa anatase dan perbandingan nanopartikel TiO_2 dan *core-shell* $Au@SiO_2$ yang menjadi tambahan antara lain 0,5% dan 1%, sehingga perbandingan antara TiO_2 dengan $Au@SiO_2$ menjadi 99,5:0,5; dan 99,0:1,0. Selain itu, setiap perbandingan ditambahkan variasi volume SiO_2 dalam nanopartikel *core-shell* $Au@SiO_2$ antara lain 30 ml, 60 ml, 90 ml dan 120 ml. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Langkah pertama yang dilakukan dalam fabrikasi DSSC adalah pembuatan pasta dengan dasar nanopartikel TiO_2 . Serbuk

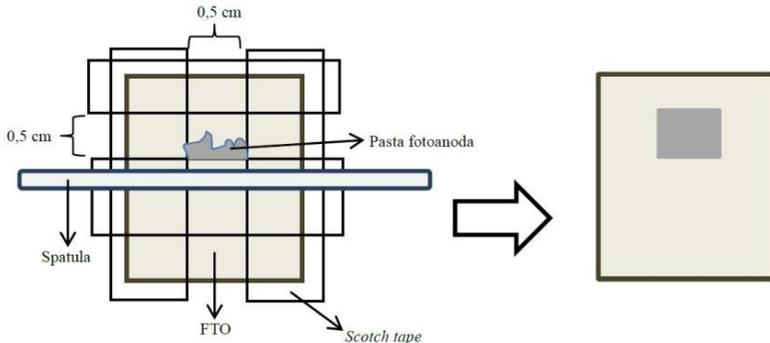
nanopartikel sebanyak 0,25 gram yang telah dihaluskan kemudian dilarutkan dengan 87,5 μL aquades, 125 μL CH_3COOH , and 12,5 μL Triton X-100 (sekitar 1 tetes pipet) (Puspitasari, 2016).

Tabel 3.1 Komposisi sampel DSSC yang akan diteliti

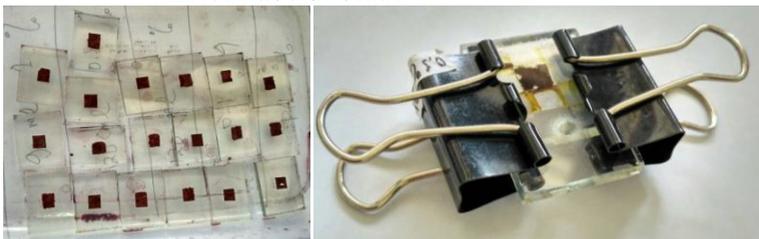
Tipe	Perbandingan TiO_2 dan <i>core-shell</i>	Volume SiO_2 dalam <i>core-shell</i> Au@SiO_2
TiO_2 anatase	100 : 0	-
TiO_2 (Anatase) / SiO_2 ekstraksi lumpur	99,5:0,5	-
	99,0:1,0	-
TiO_2 (Anatase) / Au@SiO_2 ekstraksi lumpur	99,5:0,5	30 ml
		60 ml
		90 ml
		120 ml
	99,0:1,0	30 ml
		60 ml
		90 ml
		120 ml

Pelapisan pasta fotoanoda ke kaca FTO menggunakan metode *doctor blade* (Gambar 3.12). Pada metode ini pasta ditetaskan ke kaca FTO dan dilapiskan dengan menggunakan spatula kaca. Luasan aktif fonoanoda adalah 0,5 cm x 0,5 cm. Setelah pasta dilapiskan dan mengering, kaca FTO yang telah dilapiskan dipanaskan pada suhu 225°C selama 2 menit menggunakan *hot plate*. Kaca FTO yang telah dipanaskan kemudian direndam dalam larutan pewarna selama 12 jam. Selanjutnya yakni proses penyusunan komponen-komponen DSSC dengan struktur *sandwich*. Susunan ini terdiri dari kaca FTO yang telah terlapis fotoanoda yang direndam dalam larutan pewarna, larutan elektrolit, dan kaca FTO berlapis platina yang bertindak sebagai elektroda lawan. Pemberian larutan elektrolit dilakukan dengan menuangkan elektrolit secukupnya menutupi luasan aktif fotoanoda dan tidak melebihi luasan tersebut.

Selanjutnya susunan DSSC ini direkatkan menggunakan penjepit (Puspitasari, 2016).



Gambar 3.12 Pelapisan foto anoda pada kaca FTO menggunakan metode *doctor blade*



(a)

(b)

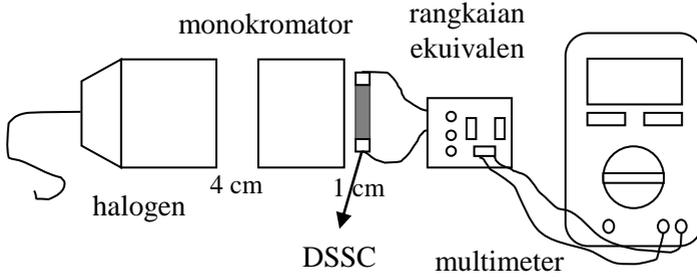
Gambar 3.13 Fabrikasi DSSC (a) Kaca FTO dengan fotoanoda yang telah direndam dengan pewarna (b) DSSC yang telah disusun *sandwich*

3.8 Pengukuran efisiensi konversi cahaya dengan IPCE

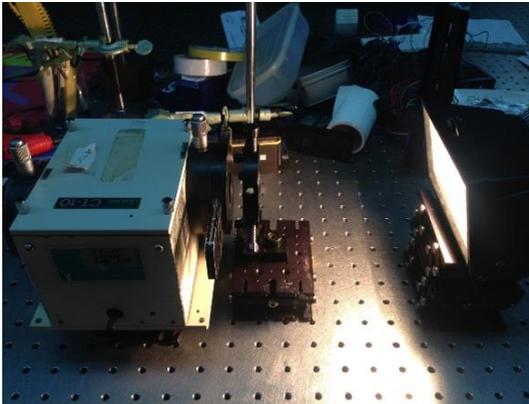
DSSC yang telah difabrikasi kemudian diuji sensitivitasnya terhadap panjang gelombang cahaya tampak dengan menggunakan uji IPCE. Pengujian IPCE dilakukan di laboratorium Fotonika Teknik Fisika ITS.

Gambar 3.14a merupakan skema dari alat yang digunakan untuk mengukur IPCE. Untuk melakukan pengukuran IPCE diperlukan monokromator (CT-10T, JASCO) dan lampu halogen (GR-150). Jarak antara lampu halogen ke monokromator adalah 4 cm, sedangkan jarak antara DSSC ke monokromator adalah 1 cm.

Daya pada setiap panjang gelombang cahaya lampu halogen diukur menggunakan *Optical Power Meter* (Thorlab S-120C).



(a)



(b)

Gambar 3.14 Pengujian IPCE (a) Skema pengujian (b) *Set up* alat pengujian di Laboratorium Fotonika

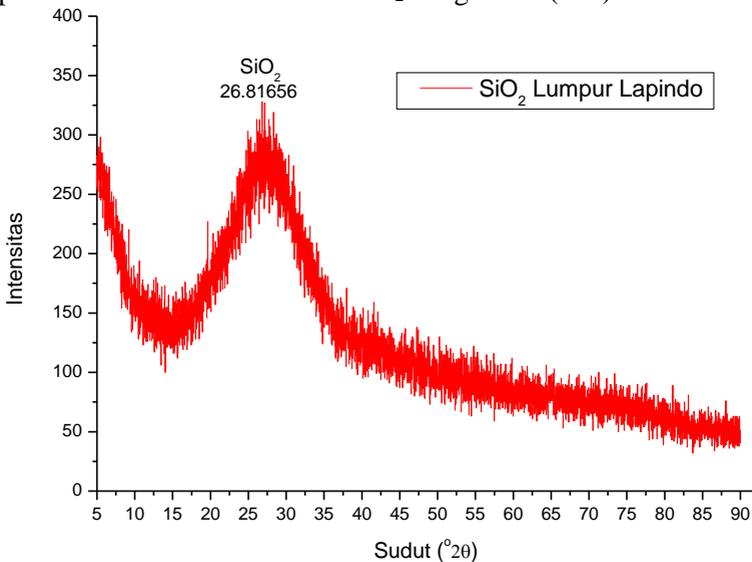
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Nanopartikel XRD

Pengujian XRD bertujuan untuk mengetahui tingkat kristalinitas dari masing-masing sampel, baik dari jenis kristal yang terbentuk, persentase jenis kristal dalam sampel serta ukuran kristal tiap masing-masing puncak yang terbentuk.

4.1.1 Karakterisasi XRD SiO₂ Lumpur Sidoarjo

Nanopartikel SiO₂ didapatkan dari ekstraksi lumpur Sidoarjo 80°C selama 24 jam hingga akhirnya didapatkan serbuk nanopartikel berwarna putih (Pribadi & Munasir, 2013). Gambar 4.1 menunjukkan hasil pola XRD untuk nanopartikel SiO₂ dari ekstraksi lumpur Sidoarjo. Hasil XRD untuk SiO₂ ekstraksi dari lumpur Sidoarjo menunjukkan hanya satu puncak pada $2\theta = 26,81656^\circ$, dimana berdasarkan ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) No.00-005-0490 menunjukkan bahwa pada puncak tersebut dimiliki oleh SiO₂ dengan hkl (101).

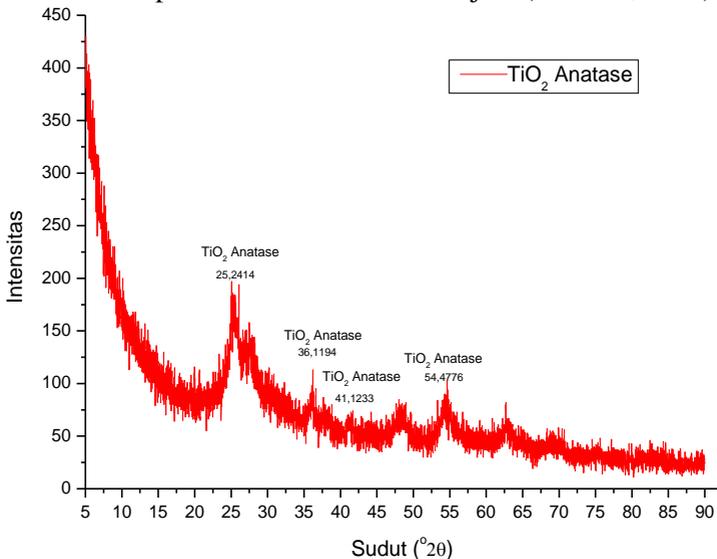


Gambar 4.1 Hasil XRD SiO₂ dari lumpur Sidoarjo

Ukuran dan persentase kristal dari keseluruhan sampel nanopartikel SiO_2 dari ekstraksi lumpur Sidoarjo dihitung dari hasil XRD pada Gambar 4.1. Persamaan (3.2) dan persamaan (3.3) didapatkan persentase dan ukuran kristal berdasarkan sudut puncak, tinggi puncak dan FWHM (*Full Width Half Maximum*) SiO_2 dengan hkl (101) dan diperoleh persentase SiO_2 dari sampel sebesar 100%. Puncak tunggal ini menunjukkan bahwa hampir tidak terdeteksi pengotor pada sampel dan menunjukkan kemurnian yang cukup tinggi. Semakin tajam puncak difraksi maka mengindikasikan semakin kristalin suatu nanopartikel (Yu dkk., 2011). Puncak difraksi SiO_2 ekstraksi lumpur menurut Gambar 4.1 memiliki puncak yang tidak tajam dan cenderung melebar, sehingga mengindikasikan jenis nanopartikel SiO_2 ini merupakan SiO_2 amorf.

4.1.2 Karakterisasi XRD TiO_2 Anatase

Nanopartikel TiO_2 fasa anatase didapatkan dari sintesis TiCl_3 dengan ammonia dan HCl hingga mendapat endapan putih dan dikalsinasi pada suhu 400°C selama 5 jam (Budiarti, 2016).

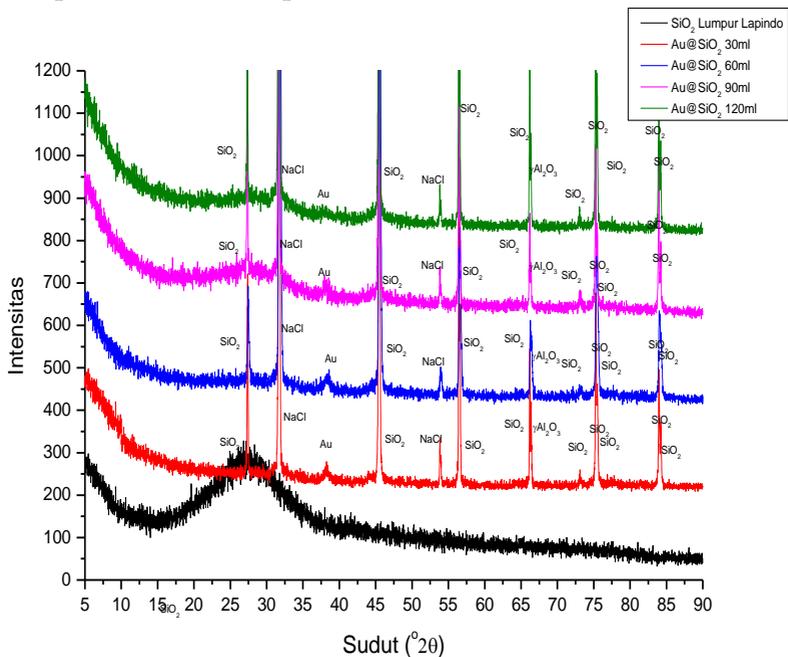


Gambar 4.2 Hasil XRD TiO_2 fasa anatase

Hasil pola XRD nanopartikel TiO_2 pada Gambar 4.2 menurut ICDD No.00-015-0875 memiliki fasa anatase dengan puncak utama pada $2\theta = 25,2414^\circ$ dan hkl (120). Puncak-puncak minor juga dimiliki oleh TiO_2 anatase, sehingga persentase TiO_2 anatase dari sampel sebesar 100% dan ukuran kristal sebesar 8,59 nm, cukup kecil dan sesuai dengan dengan ukuran kristal TiO_2 anatase menurut (Puspitasari, 2016), yaitu sebesar 12,72 nm. Keseluruhan puncak dengan mayoritas dimiliki oleh TiO_2 anatase ini menunjukkan bahwa hampir tidak terdeteksi pengotor pada sampel dan menunjukkan kemurnian yang cukup tinggi.

4.1.3 Karakterisasi XRD *core-shell* Au@SiO₂

Nanopartikel *core-shell* Au@SiO₂ didapatkan dari sintesis reduksi Au, dengan perekat APTMS dan dengan SiO₂ dari ekstraksi lumpur 80°C selama 24 jam hingga akhirnya didapatkan serbuk nanopartikel (Li, et al., 2012) (Budiarti, 2016).



Gambar 4.3 Hasil XRD *core-shell* Au@SiO₂

Analisis XRD nanopartikel *core-shell* Au@SiO₂ pada Gambar 4.3 dilakukan dengan membandingkan pada standar ICDD No.00-005-0490 untuk SiO₂, No.00-004-0784 untuk Au, No.00-029-1486 untuk γ -Al₂O₃, JCPDS 5-0628 mengenai NaCl. Persentase jenis kristal dan ukuran diameter kristal dari hasil XRD *core-shell* Au@SiO₂ dihitung menggunakan persamaan (3.2) dan (3.3). Hasil perhitungan tersebut ditabulasikan pada Tabel 4.1.

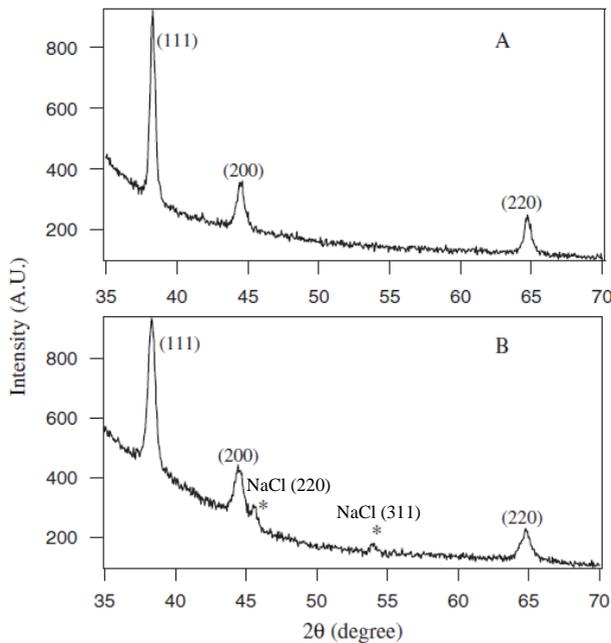
Tabel 4.1 Perhitungan XRD *core-shell* Au@SiO₂

<i>Core-shell</i>	Jenis	Persentase (%)	Ukuran kristal (nm)
Au@SiO ₂ 30ml	Au	0,428	24,842
	NaCl	33,825	48,793
	SiO ₂	64,062	(amorf)
	γ -Al ₂ O ₃	1,685	115,011
Au@SiO ₂ 60ml	Au	0,371	12,426
	NaCl	38,489	81,320
	SiO ₂	59,270	(amorf)
	γ -Al ₂ O ₃	1,870	76,699
Au@SiO ₂ 90ml	Au	0,235	11,896
	NaCl	38,023	100,038
	SiO ₂	60,827	(amorf)
	γ -Al ₂ O ₃	0,915	115,013
Au@SiO ₂ 120ml	Au	0,050	8,484
	NaCl	39,320	133,380
	SiO ₂	42,880	(amorf)
	γ -Al ₂ O ₃	17,750	153,337

Persentase kristal pada Tabel 4.1 menunjukkan SiO₂ memiliki persentase terbesar pada tiap variasi sampel, berkisar

43%-64%. Emas (Au) memiliki persentase kristal terkecil pada tiap variasi sampel, berkisar 0,05%-0,43%. Trend persentase kristal emas (Au) pada Tabel 4.1 menunjukkan semakin kecil persentase seiring penambahan volume SiO_2 dengan ukuran kristal yang variatif.

Beberapa impuritas ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.1 seperti NaCl, dengan persentase dari 33,8248% hingga 39,32%, dimana kadar NaCl bertambah seiring penambahan SiO_2 , dan juga $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ dengan persentase dari 1,6848% hingga 17,75%.



Gambar 4.4 Hasil XRD sintesis Au metode Turkevich pada (a) pH 3,1 dan (b) pH 9,8. Tanda (*) menunjukkan puncak NaCl pada kisi (220) dan (311) (Panda & Chattopadhyay, 2007)

Sintesis partikel emas dengan metode Turkevich telah dilakukan oleh (Panda & Chattopadhyay, 2007) dengan variasi pH menggunakan penambahan HCl untuk pH rendah dan

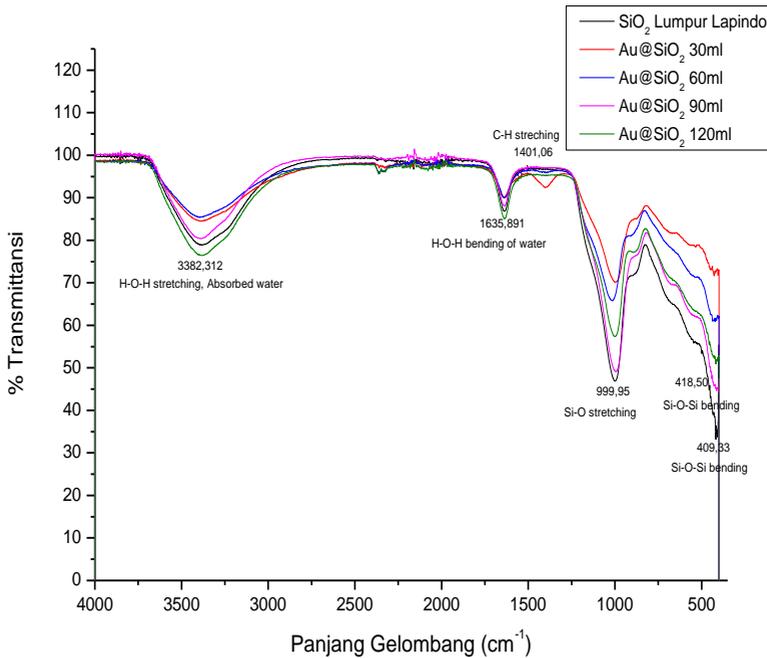
penambahan NaOH untuk pH tinggi dengan hasil XRD pada Gambar 4.4. Hasil XRD tersebut menunjukkan puncak emas dengan kisi masing-masing dan puncak dengan tanda (*) menunjukkan puncak NaCl dengan kisi (220) dan (311). Hal ini mengindikasikan bahwa NaCl terbentuk sebagai hasil sampingan dari sintesis emas dari prekursor HAuCl₄ dengan penambahan NaOH. Sesuai dengan metode yang digunakan pada penelitian ini dalam proses pengendapan koloid Au@SiO₂ pada pH 7 juga menggunakan NaOH, sehingga terdapat NaCl pada sampel yang dihasilkan.

Penambahan 50 ml NaCl dalam 0,4 gram pasta TiO₂ tipe P300 (*Transparent type*, 20% TiO₂, 100-120 kg/ms viskositas, 20-50 nm ukuran partikel) ternyata mampu meningkatkan efisiensi jika konsentrasi NaCl tidak melebihi 1% wt (Liao, et al., 2015). Hal ini disebabkan penambahan NaCl dapat meninggalkan rongga pori pada TiO₂ setelah dicuci dengan *deionized water* dan banyaknya rongga pori dari TiO₂ dapat mengoptimalkan penyerapan pewarna pada TiO₂ sehingga mampu meningkatkan hamburan cahaya dan perangkap cahaya yang mampu meningkatkan *photocurrent* (arus listrik yang disebabkan oleh cahaya) pada DSSC. Penelitian ini memiliki fraksi penambahan *core-shell* hanya sebesar 0,5% dan 1% dimana kadar NaCl pada *core-shell* tidak melebihi 40% sehingga diharapkan mampu meningkatkan efisiensi dari DSSC. Keberadaan γ Al₂O₃ pada DSSC dapat menghambat laju rekombinasi, namun keberadaan Al₂O₃ ini harus sesedikit mungkin dikarenakan dapat menghambat transfer muatan (Tien, et al., 2011).

4.2 Karakterisasi Nanopartikel FTIR

Pengujian FTIR bertujuan untuk mengetahui jenis-jenis gugus ikatan yang terbentuk dari sampel nanopartikel. Hasil spektra FTIR pada Gambar 4.5 menunjukkan SiO₂ lumpur Sidoarjo memiliki puncak lebar pada panjang gelombang 999,95 cm⁻¹ menandakan ikatan *stretching* Si-O, dimana ikatan Si-O mulai meregang di dalam nanopartikel. Kemudian ikatan Si-O-Si berada pada puncak 418,50 cm⁻¹ dan 409,33 cm⁻¹. Khusus pada *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml terdapat ikatan *stretching* C-H pada

$1401,06 \text{ cm}^{-1}$ namun tidak ada sama sekali ikatan yang ditunjukkan oleh emas (Au) (Saikia & Parthasarathy, 2010).



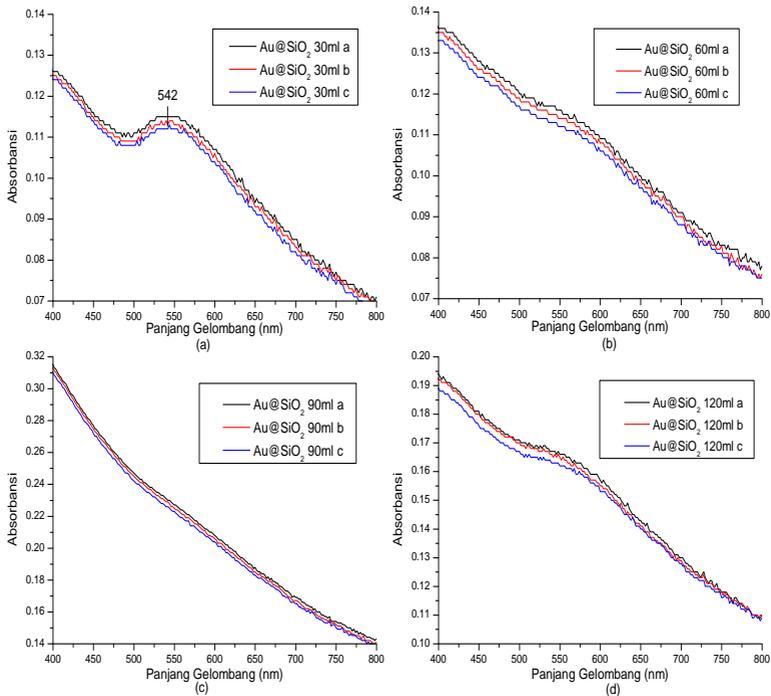
Gambar 4.5 Hasil FTIR SiO₂ dari lumpur Sidoarjo

4.3 Karakterisasi UV-Vis (Ultraviolet-Visual)

Pengujian UV-Vis bertujuan untuk mengetahui besar penyerapan terhadap panjang gelombang cahaya yang diberikan pada sampel nanopartikel yang telah didispersi. Pengambilan data UV-Vis dilakukan sebanyak tiga kali dengan simbol a, b dan c pada tiap sampel.

Hasil UV-Vis *core-shell* Au@SiO₂ ditunjukkan pada Gambar 4.6. Puncak yang cukup lebar terlihat pada Gambar 4.6 (a) Au@SiO₂ 30 ml di panjang gelombang UV 394 nm dan pada daerah cahaya tampak 542 nm, kemudian di (b) Au@SiO₂ 60 ml, (c) Au@SiO₂ 90 ml dan (d) Au@SiO₂ 120 ml tidak terlihat puncak pada rentang sinar tampak, namun terlihat pada rentang ultraviolet 386 - 392 nm. Penyerapan panjang gelombang ini

dimiliki oleh SiO₂ lumpur Sidoarjo dengan energi pita sebesar 3,15 eV menunjukkan puncak panjang gelombang 394 nm (Puspitasari, 2016). Penyerapan cahaya pada rentang UV sangat dihindari dalam pembuatan panel surya karena paparan sinar UV mampu mendegradasi elektrolit pada DSSC dan dapat meningkatkan konsumsi I₃⁻ pada elektrolit di saat DSSC disambungkan dengan beban listrik (Carnie, Watson, & Worsley, 2012).

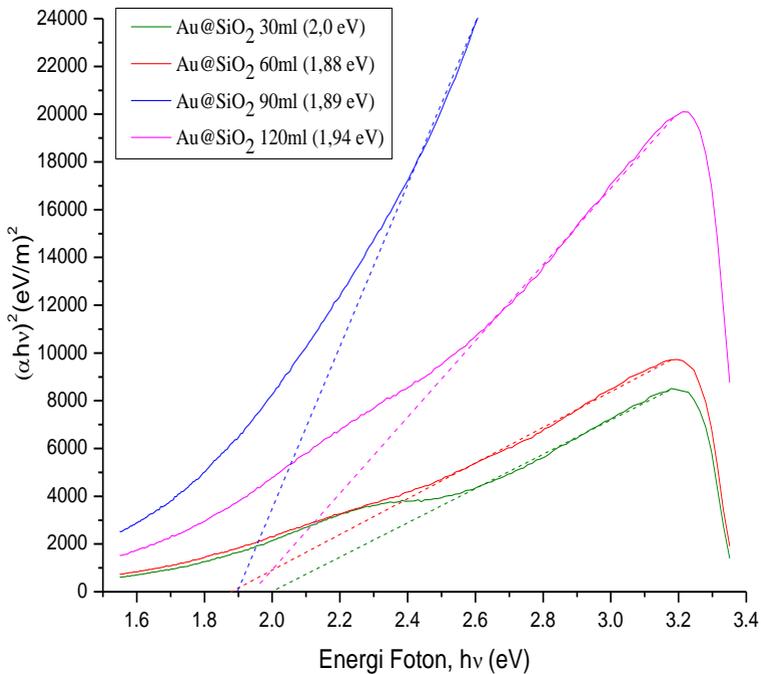


Gambar 4.6 Hasil UV-Vis dari *core-shell* (a) Au@SiO₂ 30 ml, (b) Au@SiO₂ 60 ml, (c) Au@SiO₂ 90 ml dan (d) Au@SiO₂ 120 ml

Hasil UV-Vis *core-shell* Au@SiO₂ juga menunjukkan bahwa semakin sedikit penambahan volume silika sebagai *shell* pada *core* emas, akan semakin terlihat puncak penyerapan pada

panjang gelombang 542 nm, dimana puncak penyerapan emas (Au) terlihat dari rentang 520 nm hingga 590 nm, berurutan berdasarkan besar partikel emas 16 nm hingga 125 nm (López-Muñoz, et al., 2012). Dengan demikian semakin sedikit penambahan silika akan semakin besar efek LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*).

Hasil uji UV-Vis spektra ini dapat digunakan untuk mengetahui *energy gap* dari nanopartikel dengan menggunakan *Tauc plot* pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 *Tauc plot core-shell Au@SiO₂*

Perhitungan energi pita celah didapatkan dari hubungan *Tauc plot* dengan absorbansi dari pengujian UV-Vis menggunakan persamaan Beer-Lambert (Hassanien & Akl, 2015):

$$(\alpha h\nu)^{1/n} = \beta(h\nu - E_g) \quad (4.1)$$

Koefisien absorpsi (α) didapatkan dari:

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (4.2)$$

$$T = 10^{-A} \quad (4.3)$$

Ketebalan wadah sampel (t) adalah 1 cm, T adalah transmisi dan A adalah absorpsi. Grafik *Tauc plot* menggunakan sumbu y $(\alpha hv)^{1/n}$ dan sumbu x (hv), sehingga didapatkan garis lurus pada beberapa bagian. Ekstrapolasi garis lurus ini akan memotong sumbu x (hv) untuk mendapatkan nilai energi pita celah (Hassanien & Akl, 2015). Tabel perhitungan $(\alpha hv)^{1/n}$ dan hv terdapat pada Lampiran D. Tabel 4.2 menunjukkan perhitungan puncak panjang gelombang tunggal dari hasil ekstrapolasi energi pita celah dari persamaan:

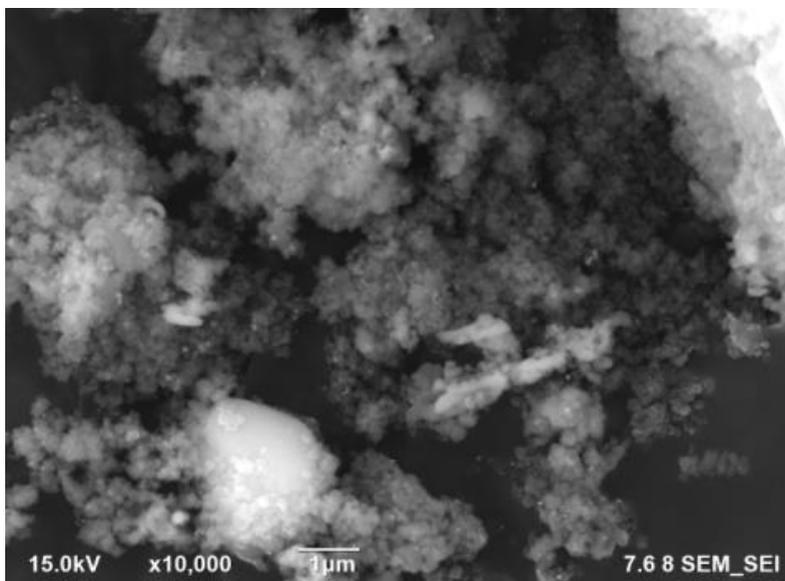
$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.4)$$

Tabel 4.2 Perhitungan energi pita celah

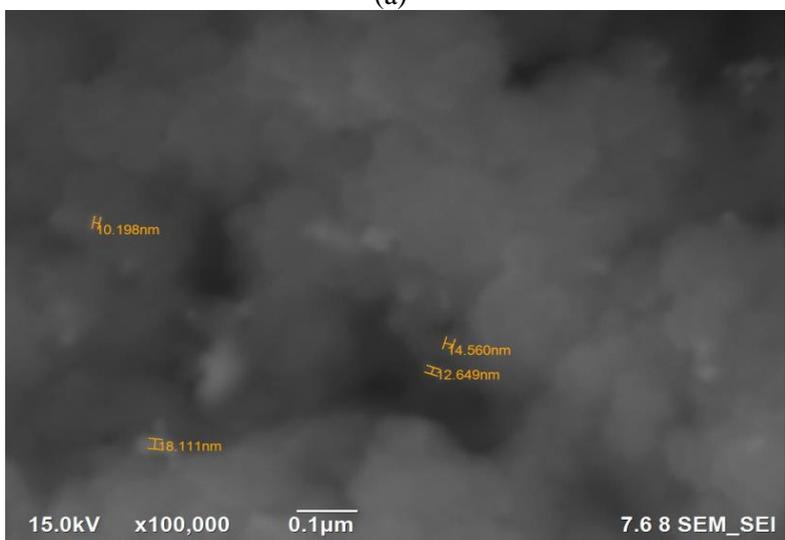
<i>Core-shell</i>	E_g (eV)	λ (nm)
Au@SiO ₂ 30 ml	2,00	619,90
Au@SiO ₂ 60 ml	1,88	659,47
Au@SiO ₂ 90 ml	1,89	655,98
Au@SiO ₂ 120 ml	1,94	639,07

4.4 Karakterisasi FE-SEM dan EDX

Pengujian FE-SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi secara visual dari sampel nanopartikel *core-shell* Au@SiO₂, dan EDX bertujuan untuk mengetahui unsur yang ada pada *core-shell* Au@SiO₂ beserta persebarannya.

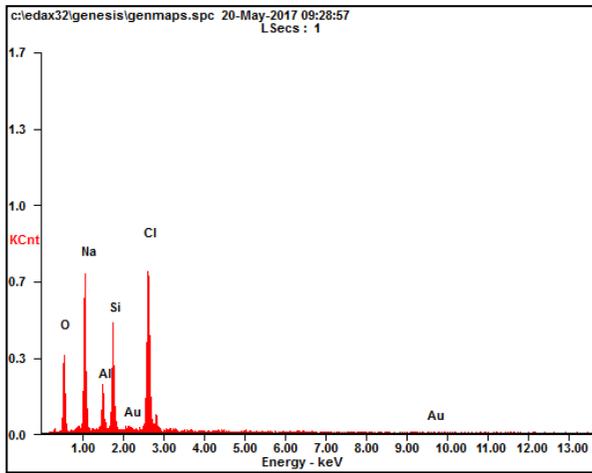


(a)

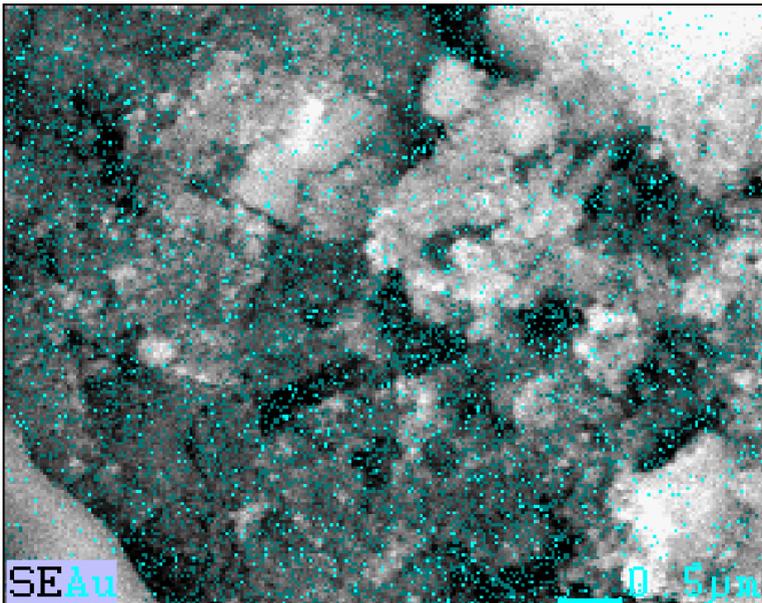


(b)

Gambar 4.8 Hasil FE-SEM dari *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml, (a)10.000x dan (b)100.000x



(a)



(b)

Gambar 4.9 Hasil EDX dari *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml, (a) Kuantisasi tiap unsur (b) Persebaran emas (Au)

Hasil FE-SEM pada Gambar 4.8 dari *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml (a) 10.000x menunjukkan bintang putih diidentifikasi sebagai emas (Au) dan saat diperbesar (b) 100.000x terlihat partikel emas dengan rata-rata ukuran 13,88 nm. Hasil ini diperkuat dari Gambar 4.9 hasil EDX (a) grafik tiap unsur dalam sampel, terdapat puncak emas (Au) dan terdapat persebaran emas sesuai dengan Tabel 4.3, terlihat pada (b) distribusi emas (Au) pada sampel. Hasil EDX pada Tabel 4.3 menunjukkan persentase unsur tiap penambahan volume SiO₂ dalam *core-shell* Au@SiO₂.

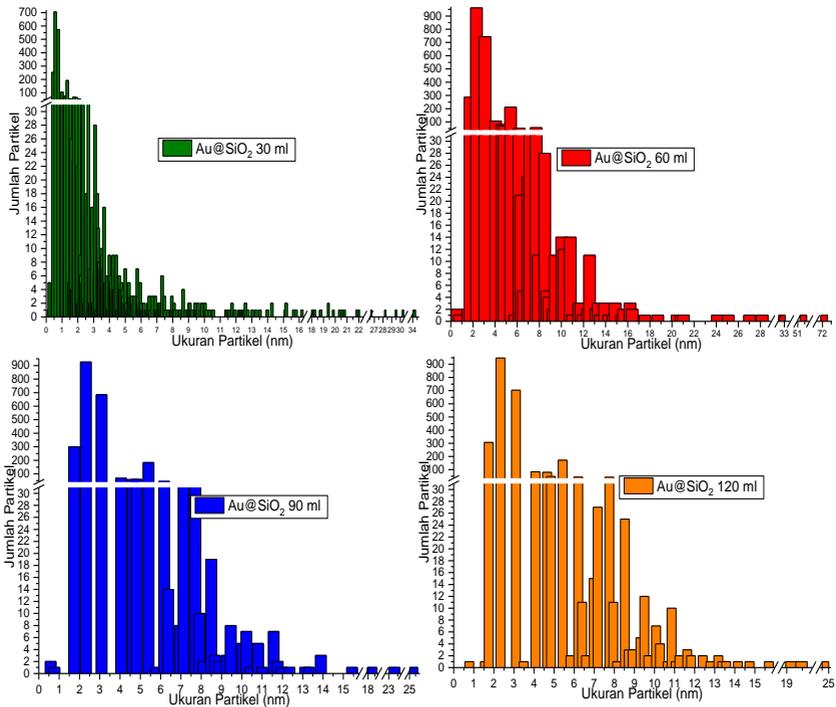
Tabel 4.3 Persentase unsur hasil EDX

<i>Core-shell</i>	Unsur wt %					
	O	Na	Al	Si	Cl	Au
Au@SiO ₂ 30ml	27,49	23,14	5,6	13,13	27,59	3,05
Au@SiO ₂ 60ml	22,26	22,76	3,14	16,01	33,79	2,04
Au@SiO ₂ 90ml	40,16	14,26	10,6	27,86	5,12	1,98
Au@SiO ₂ 120ml	35,74	14,87	8,41	23,47	15,98	1,53

Gambar hasil EDX (Lampiran C) dapat digunakan untuk menghitung banyak partikel emas di dalam satu sampel Au@SiO₂, ukuran rata-rata partikel emas dan persentase luas partikel emas dalam gambar dengan menggunakan *software* ImageJ. Hasil perhitungan dari *software* ImageJ ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Lampiran E. Hasil perhitungan dari *software* ImageJ juga dapat digunakan untuk melihat distribusi ukuran partikel emas berdasarkan jumlahnya.

Tabel 4.4 Hasil analisis partikel emas dengan *software* ImageJ

<i>Core-shell</i>	Jumlah partikel	Ukuran rata-rata (nm)	Area %
Au@SiO ₂ 30ml	2849	1,76	15,878
Au@SiO ₂ 60ml	2818	3,75	8,505
Au@SiO ₂ 90ml	2495	3,35	6,49
Au@SiO ₂ 120ml	2593	3,42	6,856



Gambar 4.10 Distribusi ukuran partikel emas

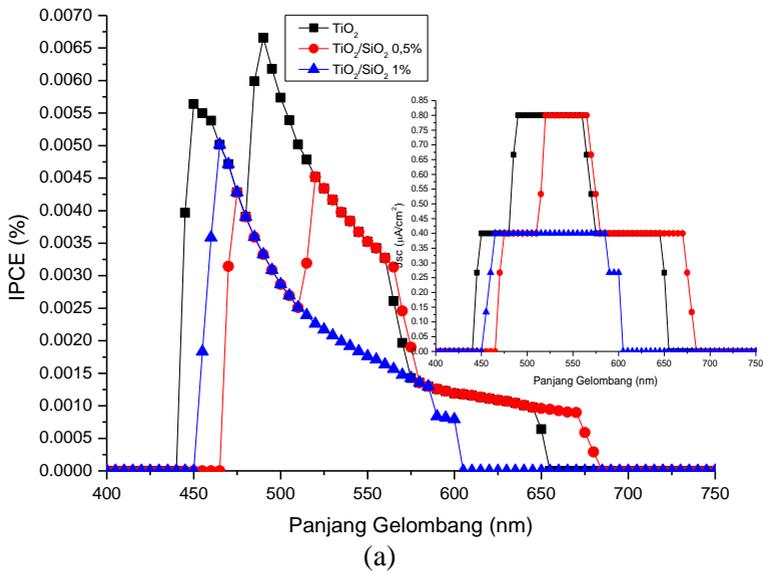
Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 menunjukkan penurunan persentase unsur dan jumlah partikel emas seiring dengan penambahan SiO₂. Gambar 4.10, Tabel 4.4 dan Lampiran E memperlihatkan mayoritas ukuran emas sebesar 0,57 nm sebanyak 706 partikel dengan rata-rata ukuran total partikel sebesar 1,76 nm pada sampel Au@SiO₂ 30 ml, diikuti dengan penambahan 60 ml, 90 ml, 120 ml dengan mayoritas ukuran sebesar 2,3 nm dan ukuran rata-rata partikel 3,75 nm, 3,35 nm dan 3,42 nm secara berturut. Hasil ini menunjukkan ukuran partikel bertambah sedangkan jumlah partikelnya berkurang seiring penambahan SiO₂.

Tabel 4.3 dan 4.4 menunjukkan persentase emas terbanyak terdapat pada sampel Au@SiO₂ 30ml sebesar 3,05% wt dan jumlah partikel sebesar 2849 dengan 15,8% distribusi area

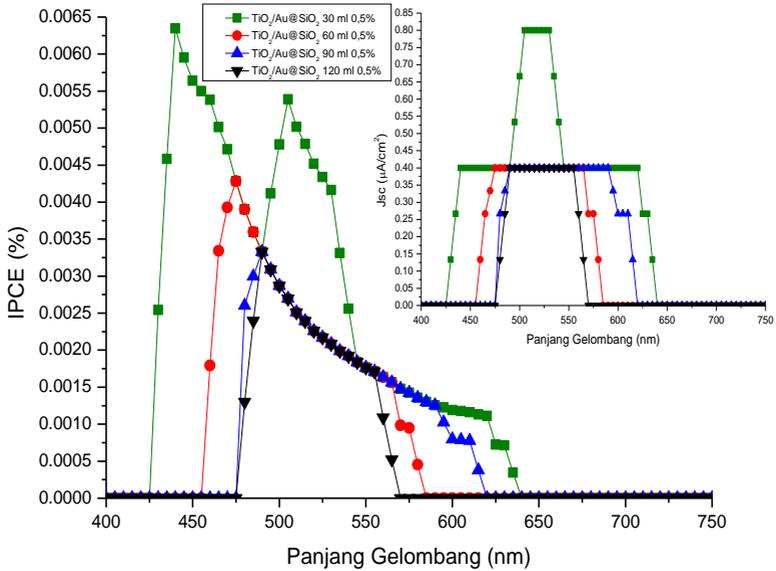
gambar distribusi emas (Au) pada FE-SEM dan EDX sebesar 3,05% hingga 1,53%, menunjukkan partikel emas sebagian berada di dalam SiO_2 membentuk *core-shell* Au@ SiO_2 .

4.5 Pengujian IPCE

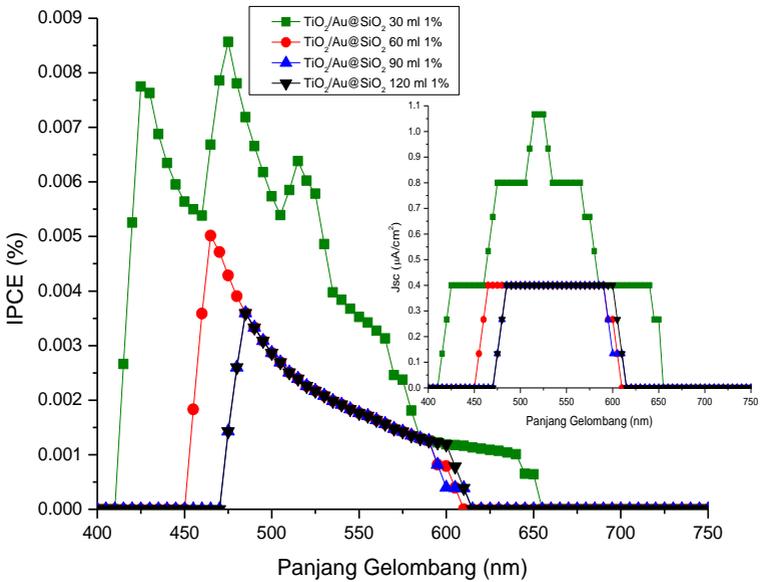
Pengujian IPCE bertujuan untuk mengetahui persentase perubahan foton dari cahaya tampak menjadi arus pada DSSC berdasarkan tiap panjang gelombang menggunakan persamaan (2.11). Hasil IPCE dari sampel DSSC ditunjukkan pada Gambar 4.11.



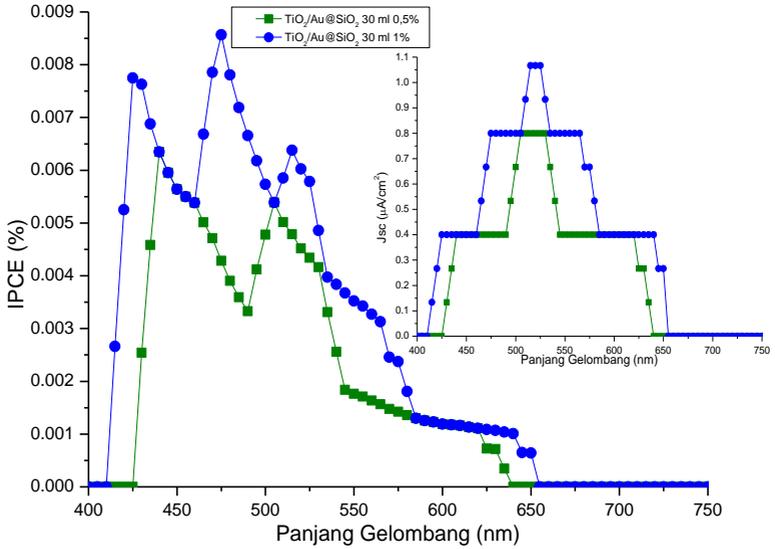
(a)



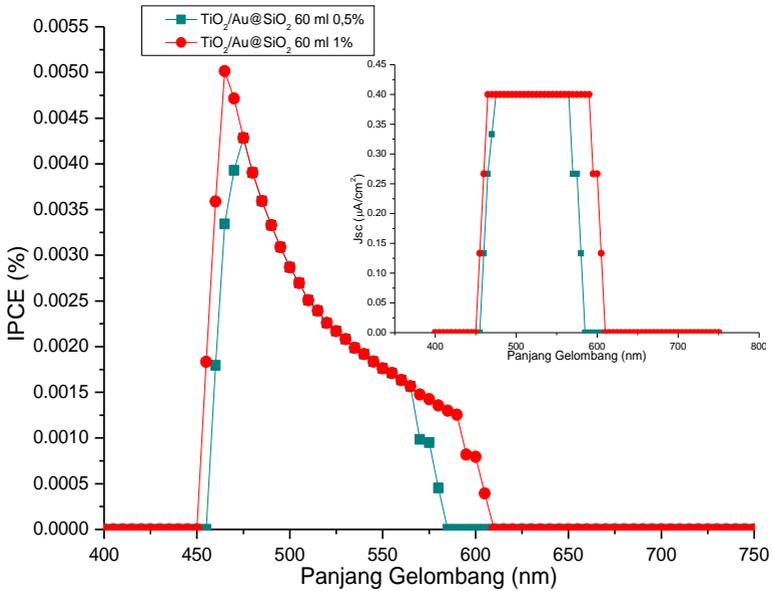
(b)



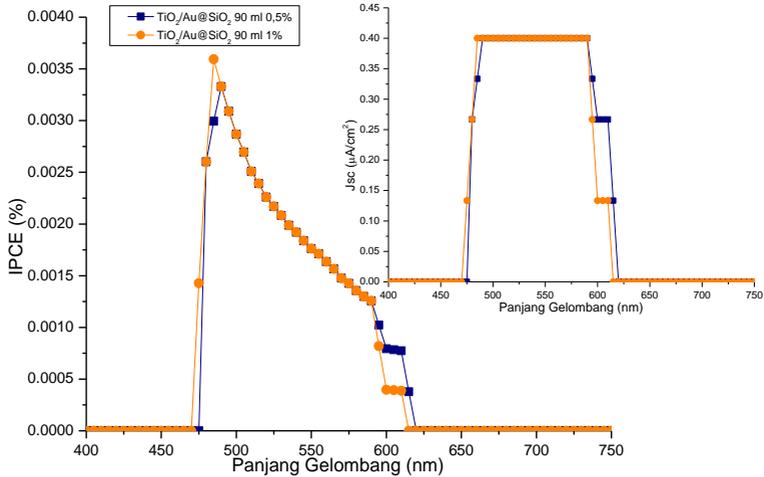
(c)



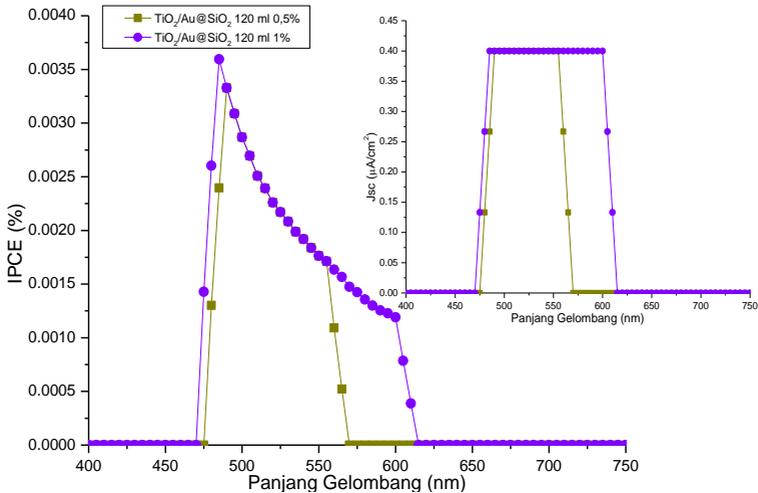
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.11 Hasil uji IPCE pada DSSC (a) Variasi fraksi $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (b) Fraksi 0,5% $\text{Au}@\text{SiO}_2$ pada TiO_2 (c) Fraksi 1% $\text{Au}@\text{SiO}_2$ pada TiO_2 (d) 30 ml SiO_2 pada $\text{Au}@\text{SiO}_2$ (e) 60 ml SiO_2 pada $\text{Au}@\text{SiO}_2$ (f)

90 ml SiO₂ pada Au@SiO₂ (g) 120 ml SiO₂ pada Au@SiO₂

Hasil IPCE pada Gambar 4.11 untuk semua variasi sampel DSSC menunjukkan bahwa persentase perubahan foton dari cahaya tampak menjadi arus pada keseluruhan variasi DSSC berada mulai pada panjang gelombang 415 nm hingga 680 nm. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan foton menjadi arus (*incident photocurrent*) pada sinar tampak pada seluruh variasi DSSC namun dengan tingkat persentase penyerapan yang berbeda.

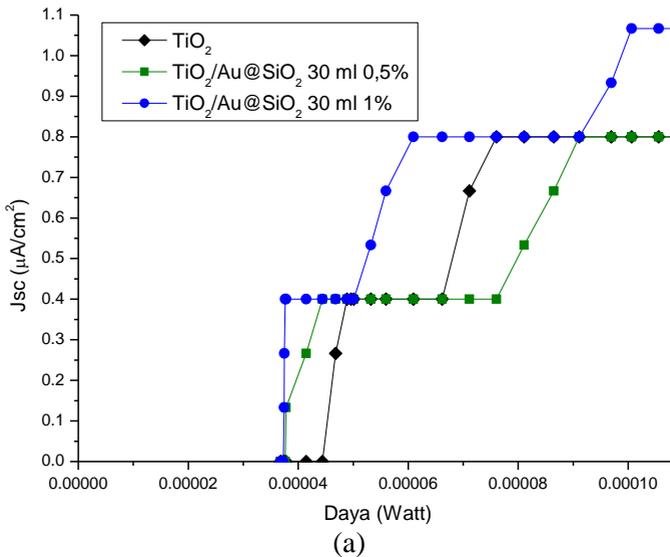
Puncak IPCE yang tertinggi terdapat pada sampel DSSC dengan fotoanoda TiO₂/Au@SiO₂ 30 ml 1%, sebesar 0,0086% IPCE pada panjang gelombang 475 nm, selain itu terdapat dua puncak lain yaitu sebesar 0,0077% pada 425 nm dan 0,0064% pada 515 nm. Puncak pada 425 nm, 475 nm dan 515 ini dimiliki oleh TiO₂, pewarna N-719 dan emas (Au) secara berturut (Niu, et al., 2012; Li, et al., 2012). Puncak emas pada 515 nm dengan diameter partikel 13,88 nm sesuai dengan penelitian (López-Muñoz, et al., 2012) yang memiliki puncak emas pada panjang gelombang 520 nm dengan diameter partikel 16 nm. Sampel DSSC ini juga menunjukkan rentang IPCE paling luas, mulai dari 415 nm hingga 650 nm, dibandingkan dengan fotoanoda TiO₂ saja, hanya memiliki rentang 445 nm hingga 650 nm. Hal ini sesuai dengan hasil UV-Vis pada Gambar 4.5 dimana nilai absorbansi cahaya tertinggi terdapat pada *core-shell* Au@SiO₂ 30ml sehingga mampu meningkatkan konversi foton menjadi elektron atau IPCE.

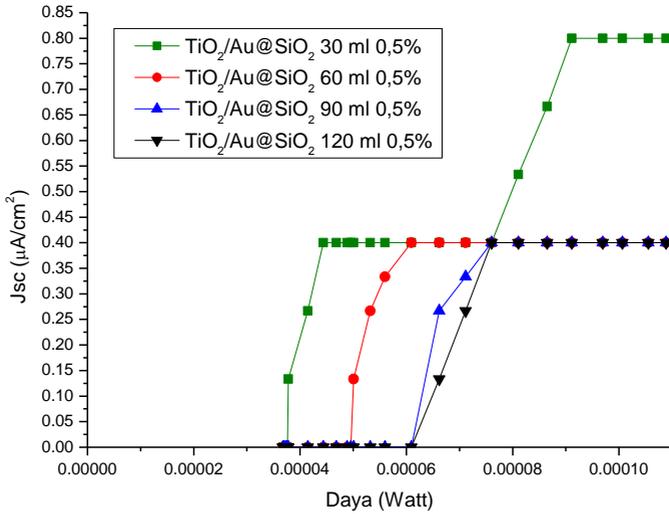
Penambahan 1% *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml pada TiO₂ sebagai fotoanoda mampu meningkatkan konversi foton menjadi elektron sebesar 29,13% lebih tinggi dibandingkan dengan TiO₂ saja dengan nilai IPCE sebesar 0,00666%. Puncak IPCE dihasilkan fotoanoda TiO₂/Au@SiO₂ 30 ml 1% sebesar 0,0086% dibandingkan dengan fotoanoda TiO₂/Au@SiO₂ 30 ml 0,5% sebesar 0,00635%. Penambahan 1% *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml pada TiO₂ sebagai fotoanoda meningkatkan IPCE 35,4% lebih besar daripada penambahan 0,5% *core-shell* Au@SiO₂ 30 ml

pada TiO_2 . Hal ini menunjukkan semakin banyak penambahan *core-shell* Au@SiO_2 dalam TiO_2 mampu meningkatkan konversi foton menjadi elektron atau IPCE. Sampel *core-shell* Au@SiO_2 60 ml, 90 ml, 120ml juga menunjukkan penambahan 1% *core-shell* pada TiO_2 meningkatkan 17,05%, 7,81%, 7,81% secara berturut daripada 0,5% *core-shell* pada TiO_2 .

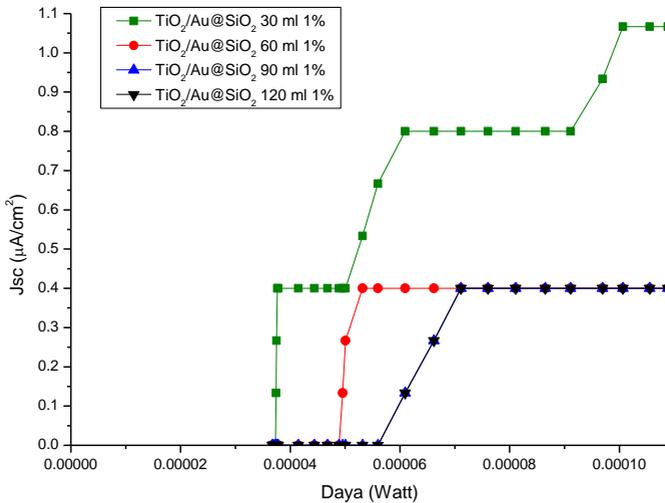
Penambahan volume SiO_2 mulai 30 ml, 60 ml, 90 ml dan 120 ml pada *core-shell* Au@SiO_2 menunjukkan penurunan IPCE yang dihasilkan seiring dengan penambahan volume. Fraksi penambahan 1% dengan penambahan SiO_2 30ml memiliki IPCE sebesar 0,0086%, 60 ml sebesar 0,00501%, 90 ml dan 120 ml sebesar 0,00359%. Hasil tersebut menunjukkan penurunan IPCE seiring penambahan volume SiO_2 .

Perubahan kerapatan arus terhadap panjang gelombang juga dapat dilihat pada Gambar 4.11, sesuai dengan hasil IPCE, semua sampel menghasilkan arus mulai pada panjang gelombang 415 nm hingga 680 nm. Sampel $\text{TiO}_2/\text{Au@SiO}_2$ 30 ml 1%, memiliki rentang perubahan kerapatan arus yang paling luas, mulai dari 415 nm hingga 650 nm.





(b)



(c)

Gambar 4.12 Perubahan rapat arus terhadap daya (a) 30 ml SiO₂ pada Au@SiO₂ dan TiO₂ (b) (b) fraksi 0,5% Au@SiO₂ pada TiO₂ (c) fraksi 1% Au@SiO₂ pada TiO₂

Perubahan kerapatan arus terhadap daya yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 4.12, dimana semakin banyak penambahan SiO₂ pada *core-shell* Au@SiO₂ semakin lambat kenaikan rapat arus yang terjadi. Tabel 4.5 menunjukkan daya minimum yang dibutuhkan DSSC dalam menghasilkan arus, kemudian kerapatan arus maksimum yang dapat dicapai DSSC, rentang panjang gelombang aktif dan gradien kemiringan pada masing-masing DSSC dari Gambar 4.11 dan 4.12.

Tabel 4.5 Hasil uji IPCE

Sampel	Daya min (μW)	J _{sc} maks (μA/cm ²)	λ pada J _{sc} maks (nm)	Rentang λ aktif (nm)	Gradien
TiO ₂	46,8124	0,80	490	445-650	0,0204
TiO ₂ /SiO ₂ 0,5%	55,9650	0,80	520	470-680	0,0116
TiO ₂ /SiO ₂ 1%	49,5660	0,40	465	455-600	0,0243
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 30ml 0,5%	37,8020	0,80	505	430-635	0,0147
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 30ml 1%	37,4250	1,07	515	415-650	0,0167
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 60ml 0,5%	50,0842	0,40	475	460-580	0,0165
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 60ml 1%	49,5660	0,40	465	455-605	0,0243
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 90ml 0,5%	66,1816	0,40	490	480-615	0,0102
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 90ml 1%	60,9422	0,40	485	475-610	0,0116
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 120ml 0,5%	66,1816	0,40	490	480-565	0,0102
TiO ₂ /Au@SiO ₂ 120ml 1%	60,9422	0,40	485	475-610	0,0116

Generasi arus tercepat dan tertinggi terdapat pada sampel TiO₂/Au@SiO₂ 30ml 1% dimana dengan daya minimum 37,4 μW arus sudah mulai tergenerasi hingga mencapai kerapatan arus tertinggi sebesar 1,07 μA/cm². Tabel 4.5 juga menunjukkan pada

sampel $\text{TiO}_2/\text{Au}@\text{SiO}_2$ 30ml 1% tidak hanya memiliki rentang panjang gelombang terpanjang, namun juga memiliki gradien kemiringan sebesar 0,0167 hingga mencapai puncak tertingginya.

Generasi arus membutuhkan daya semakin besar seiring penambahan SiO_2 disebabkan oleh SiO_2 sebagai insulator menjadi hambatan seri dalam kontak logam semikonduktor serta menghambat kinerja transfer elektron antara emas dan TiO_2 (Debnath & Chatterjee, 1995). Penambahan lapisan silika sebagai pelindung permukaan emas dengan ketebalan $\sim 3\text{-}5$ nm dapat mengurangi kecepatan rekombinasi dan memiliki medan dekat yang kuat yang dihasilkan oleh Au yang mampu mendukung penyerapan cahaya pada lapisan fotoaktif. Namun jika tebal SiO_2 melebihi 10 nm mampu membuat puncak penyerapan cahaya bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red-shift*) karena kenaikan indeks bias lokal di sekitar nanopartikel oleh kulit silika (Chen, et al., 2012) dan juga melindungi osilasi elektron pada logam sehingga mengurangi induksi medan dekat dan menyebabkan peredaman plasmonik (Chen, et al., 2012; Erwin, et al., 2016).

Hasil SEM dan EDX menunjukkan tidak seluruh emas dilapisi silika, sehingga terdapat partikel emas yang berkontak langsung dengan elektrolit dan mengumpulkan elektron langsung serta mempercepat reduksi I_3^- ke I^- yang merupakan kerugian mekanisme transfer elektron. Partikel emas yang telah berkontak langsung dengan elektrolit akan terkorosi sehingga efek LSPR dari partikel emas tersebut memiliki *lifetime* yang terbatas dan mengurangi penyerapan cahaya dan pembentukan pasangan elektron-*hole*, mengurangi medan elektromagnetik pada medan dekat (*near-field*) serta mengurangi penghamburan cahaya pada medan jauh (*far-field*). Hal ini yang menyebabkan penurunan IPCE setelah panjang gelombang 550 nm seperti pada Gambar 4.11 (Erwin, et al., 2016).

Distribusi ukuran emas juga mempengaruhi performansi IPCE. Partikel emas dengan distribusi ukuran yang besar memiliki puncak penyerapan pada panjang gelombang lebih besar dibandingkan dengan yang kecil. Efek penyerapan cahaya dan

penghambur berkebalikan seiring besarnya ukuran partikel. Semakin besar ukuran partikel maka semakin berkurang tingkat penyerapan cahaya dan semakin besar efek penghamburnya, begitupun sebaliknya (Erwin, et al., 2016).

Puncak panjang gelombang UV-Vis yang tidak sama dengan IPCE karena elektrolit iodida/triiodida memiliki penyerapan yang kuat pada cahaya biru yang menyebabkan rendahnya IPCE pada daerah panjang gelombang pendek dan menghasilkan pergeseran puncak (Ito, 2011). Partikel emas pada sampel Au@SiO₂ dengan distribusi rata-rata hingga 2 nm, menurut Gambar 2.7 menunjukkan hampir 100% terjadinya absorbansi. Hal ini menunjukkan terjadinya interaksi plasmonik dari permukaan emas dan cahaya yang diserap dengan meningkatkan medan lokal elektromagnetik, disebut *electromagnetic near-field enhancement* (peningkatan medan lokal elektromagnetik). Variabel yang mempengaruhi *near-field* sendiri adalah volume dari logam dalam mode kecil (nanometer), dimana pada ukuran ini memiliki intensitas medan lebih besar dari pada cahaya datang dan morfologi dari logam (Erwin, et al., 2016). Terlihat pada Gambar 4.10 Au@SiO₂ 30 ml memiliki distribusi partikel emas dengan ukuran <10 nm paling banyak dibandingkan dengan sampel lainnya. Sehingga TiO₂/Au@SiO₂ 30ml 1% memiliki arus tertinggi, daya minimum terkecil dan panjang gelombang aktif terluas. Serta penambahan fraksi 1% menghasilkan arus 1,5 kali lebih besar dibandingkan dengan 0,5%.

SiO₂ lumpur Sidoarjo memiliki energi pita celah sebesar 3,15 eV, lebih besar dibandingkan dengan SiO₂ dari TEOS sebesar 2,725eV. Energi pita celah yang besar disebabkan adanya kandungan γ -Al₂O₃ dan α -Fe₃O₃ dalam SiO₂ lumpur Sidoarjo (Puspitasari, 2016). Sehingga semakin banyak penambahan SiO₂ menyebabkan semakin besar energi pita celah dari *core-shell*. Hal ini sesuai dengan Gambar 4.7 dan Tabel 4.2 hasil dari *tauc plot*, bahwa trend kenaikan energi pita celah seiring dengan penambahan SiO₂ lumpur Sidoarjo. Namun pada Au@SiO₂ 30 ml tidak mengikuti trend tersebut dan memiliki energi pita celah terbesar, yaitu 2,0 eV. Menurut Gambar 4.9 dari hasil FE-SEM

dan EDX, tidak terbentuknya tren dikarenakan SiO_2 *shell* tidak sepenuhnya melingkupi *core* Au seluruhnya. Pada Tabel 4.2 menunjukkan semua sampel masih dalam rentang panjang gelombang tampak (620 nm-660 nm).

Penambahan plasmonik Au dan Ag dalam permukaan TiO_2 dapat mengurangi energi pita celah dari fotoanoda modifikasi (Lim, et al., 2017). Hasil perhitungan XRD pada Tabel 4.2 dan hasil persentase unsur EDX pada Tabel 4.3 menunjukkan semakin banyak penambahan SiO_2 semakin sedikit persentase Au dalam *core-shell*. Sehingga hal ini sesuai bahwa semakin banyak penambahan SiO_2 semakin besar energi pita celah pada fotoanoda. Au@ SiO_2 60 ml-120 ml seharusnya memiliki energi pita celah lebih besar daripada 30 ml, salah satu penyebabnya adalah Au tidak terlindungi secara baik yang menyebabkan rendahnya energi pita celah, terdapat pada Tabel 4.4.

Ukuran emas juga mempengaruhi pergeseran penyerapan cahaya dalam DSSC. (López-Muñoz, et al., 2012) meneliti puncak penyerapan pada emas dengan diameter 16 nm hingga 120 nm. Puncak penyerapan emas emas (Au) dari diameter terkecil hingga terbesar secara berturut bergeser dari panjang gelombang 520 nm hingga 590 nm. Hasil distribusi ukuran emas pada Gambar 4.10 menunjukkan semakin besar penambahan SiO_2 pada *core-shell* semakin besar distribusi ukuran emas. Hal ini sesuai dengan pergeseran puncak IPCE pada gambar 4.11(b) dan (c) yang semakin *red-shift* seiring penambahan SiO_2 . Selain itu kerapatan arus yang dihasilkan juga menurun. Hal ini juga disebabkan oleh peran SiO_2 dalam melindungi Au, jika terlalu banyak SiO_2 dapat menjadi hambatan seri dalam kontak logam semikonduktor serta menghambat kinerja transfer elektron antara emas dan TiO_2 (Debnath & Chatterjee, 1995).

Semikonduktor TiO_2 yang digunakan sebagai fotoanoda dasar pada penelitian ini merupakan 100% TiO_2 fasa anatase, dimana campuran fasa rutil yang merupakan nanopartikel yang baik dalam penghamburan cahaya digunakan pada penelitian sebelumnya. Sehingga penambahan *core-shell* Au@ SiO_2 memiliki peran penting dalam meningkatkan konversi foton ke

arus IPCE sebesar 28,4% dibandingkan dengan TiO₂ saja. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya *Schottky Barrier* pada permukaan Au/TiO₂ dengan SiO₂ sebagai insulasi mampu mengurangi rekombinasi elektron, dan mempercepat proses transfer muatan (Debnath & Chatterjee, 1995; Pandikumar, et al., 2016)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut,

1. Hasil XRD menunjukkan komposisi hasil ekstraksi SiO_2 dari lumpur Sidoarjo memiliki puncak tunggal yang lebar sehingga merupakan 100% SiO_2 amorf.
2. *Core-shell* Au@SiO_2 memiliki persentase kristal mayoritas SiO_2 dengan persentase sebesar 43%-64%, persentase *core* Au sebesar 0,05%-0,428% dengan tren menurun seiring penambahan volume SiO_2 . *Core-shell* Au@SiO_2 30 ml memiliki puncak penyerapan cahaya tampak pada 542 nm dan persentase partikel emas tertinggi sebesar 3,05%. FESEM dan EDX Au@SiO_2 menunjukkan partikel emas sebagian berada di dalam SiO_2 membentuk *core-shell* Au@SiO_2 .
3. Hasil IPCE menunjukkan sampel DSSC dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Au@SiO}_2$ 30 ml 1%, memiliki IPCE tertinggi sebesar 0,0086 % serta memiliki rentang IPCE paling luas, mulai dari 415 nm hingga 650 nm. Semakin banyak *core-shell* yang ditambahkan pada TiO_2 akan menghasilkan IPCE yang lebih tinggi dan lebih lebar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, K., Taga, Y., & Oharashi, W. (2001). Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science, New Series*, 293, 269-271. doi:10.1126/science.1061051
- Brown, T. L., & Lemay, H. E. (1985). *Chemistry: The Central Science*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Budiarti, H. A. (2016). *Fabrikasi DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells) berbasis Struktur Core-Shell TiO₂@SiO₂@Au sebagai Partikel Penghambur dan Material Plasmonic*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Carnie, M., Watson, T., & Worsley, D. (2012). UV Filtering of Dye-Sensitized Solar Cells: The Effects of Varying the UV Cut-Off upon Cell Performance and Incident Photon-to-Electron Conversion Efficiency. *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2012(2012), 1-9. doi:10.1155/2012/506132
- Chang, H., Cho, K. C., Kuo, C. G., Kao, M. J., Huang, D. K., Chu, K. H., & Lin, X. P. (2011). Application of a Schottky barrier to dye-sensitized solar cells (DSSCs) with multilayer thin films of photoelectrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509(S1), S486–S489. doi:10.1016/j.jallcom.2011.01.162
- Chardin, H., Acevedo, A. C., Risnes, S., Goldbreg, M., Jegat, N., & Six, N. (1998). Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray analysis of defects in mature rat incisor enamel after thyroparathyroidectomy. *Archives of Oral Biology*, Vol. 43(4), 317-327. doi:10.1016/S0003-9969(97)00106-4
- Chen, J. J., Wu, J. C., Wu, P. C., Tsai, D. P., Sheng, C., Xiao, Y., & Zu, L. (2012). Improved Photocatalytic Activity of Shell-Isolated Plasmonic Photocatalyst Au@SiO₂/TiO₂ by Promoted LSPR. *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 116(50), 26535–26542. doi:10.1021/jp309901y
- Chu, D., Yuan, X., Qin, G., Xu, M., Zheng, P., Lu, J., & Zha, L. (2008). Efficient carbon doped nanostructured TiO₂

- (anatase) film for photoelectrochemical solar cells. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(2), 357-363. doi:10.1007/s11051-007-9241-7
- Dao, V.-D., & Choi, H.-S. (2016). Highly-Efficient Plasmon-Enhanced Dye-Sensitized Solar Cells Created by Means of Dry Plasma Reduction. *Nanomaterials*, Vol. 6(4), 1-9. doi:10.3390/nano6040070
- Debnath, M., & Chatterjee, P. (1995). Effect of an insulating interfacial layer at the metal (or TCO)/semiconductor front contact on the performance of a-Si : H solar cells. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 181(3), 301-309. doi:10.1016/S0022-3093(94)00488-9
- DeVore, J. R. (1951). Refractive indices of rutile and sphalerite. *Journal of the Optical Society of America*, 41(6), 416-419. doi:10.1364/JOSA.41.000416
- Dutta, S. K., Mehetor, S. K., & Pradhan, N. (2015). Metal Semiconductor Heterostructures for Photocatalytic Conversion. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6, 936-944. doi:10.1021/acs.jpcclett.5b00113
- Eom, K. H., Yun, T. K., Hong, J. Y., Bae, J. Y., Huh, S., & Won, Y. S. (2014). Effect of nitrogen doping on the performance of dye-sensitized solar cells composed of mesoporous TiO₂ photoelectrodes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12, 9362-9369. doi:PMID 25971066
- Erwin, W. R., Zarick, H. F., Talbert, E. M., Bardhan, R., Zarick, H. F., & Boulesbaa, A. (2016). Light trapping in mesoporous solar cells with plasmonic nanostructures. *Energy & Environmental Science*, Vol. 9(5), 1577-1601. doi:10.1039/c5ee03847b
- Fan, S., Lu, X., Sun, H., Zhou, G., Chang, Y. J., & Wang, Z. S. (2016). Effect of the co-sensitization sequence on the performance of dye-sensitized solar cells with porphyrin and organic dyes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(2), 932-938. doi:10.1039/C5CP05986K

- Fulay, P., & Lee, J. K. (2016). *Electronic, Magnetic, and Optical Materials, Second Edition*. Florida: CRC Press Taylor and Francis Group.
- Gao, F., Wang, Y., Zhang, J., Shi, D., Wang, M., Humphry-Baker, R., . . . Grätzel, M. (2008). A new heteroleptic ruthenium sensitizer enhances the absorptivity of mesoporous titania film for a high efficiency dye-sensitized solar cell. *Chemical Communications*, *0*(23), 2635-2637. doi:10.1039/B802909A
- Gosh, G. (1999). Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz. *Optics Communications*, *163*(1-3), 95-102. doi:10.1016/S0030-4018(99)00091-7
- Hahn, D. W. (2009). *Light Scattering Theory*. Florida: University of Florida.
- Halme, J. (2002). *Dye-Sensitized Nanostructured and Organic Photovoltaic Cells: Technical Review and Preliminary Test*. Finland: Helsinki University of Technology.
- Hara, K., Horiguchi, T., Kinoshita, Tohru, Sayama, K., Sugihara, H., & Arakawa, H. (2000). Highly Efficient Photon-To-Electron Conversion With Mercurochrome-Sensitized Nanoporous Oxide Semiconductor Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *Vol. 64*(2), 115-134. doi:10.1016/S0927-0248(00)00065-9
- Hassanien, A. S., & Akl, A. A. (2015). Influence of composition on optical and dispersion parameters of thermally evaporated non-crystalline Cd₅₀S_{50-x}Sex thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, *Vol. 648*, 280-290. doi:10.1016/j.jallcom.2015.06.231
- Ii, S. (2012). Nanoscale Chemical Analysis in Various Interfaces with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy and Transmission Electron Microscopy. *X-Ray Spectroscopy*, *13*, 265-280. doi:10.5772/31645
- Ito, S. (2011). Investigation of Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells: Ruthenium-Complex Dyes, Metal-Free Dyes, Metal-Complex Porphyrin Dyes and Natural Dyes. *Solar*

- Cells - Dye-Sensitized Devices*, 2, 19-48.
doi:10.5772/19960
- Jang, 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*, Vol. 6(3), 1823-1832. doi:10.1039/C3NR05012B
- Jeng, M. J., Wung, L. Y., Chang, L. B., Chow, L., Wei, T., & Xiandong, W. (2013). Particle Size Effects of TiO₂ Layers on the Solar Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2013(2013), 1-9. doi:10.1155/2013/563897
- Jin, E. M., Jeong, S. M., Kang, H. C., Gu, H. B., Chung, B., & Chon, N. (2016). Photovoltaic Effect of Metal-Doped TiO₂ Nanoparticles for Dye-Sensitized Solar Cells. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 5(5), Q-109-Q114. doi:10.1149/2.0031605jss
- Kay, A., & Grätzel, M. (1996). Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 44(1), 99-117. doi:10.1016/0927-0248(96)00063-3
- Khatri, I., Bao, J., Kishi, N., Soga, T., Hopkinson, M., & Robinson, A. (2012). Similar Device Architectures for Inverted Organic Solar Cell and Laminated Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells. *International Scholarly Research Network*, Vol. 2012(2012), 1-10. doi:10.5402/2012/180787
- Lee, J.-K., & Yang, M. (2011). Progress in light harvesting and charge injection of dye-sensitized solar cells. *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 176(15), 1142-1160. doi:10.1016/j.mseb.2011.06.018
- Li, H., Hong, W., Cai, F., Tang, Q., Yan, Y., Hu, X., . . . Xu, Z. (2012). Au@SiO₂ nanoparticles coupling co-sensitizers for synergic efficiency enhancement of dye sensitized

- solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22(47), 24734-24743. doi:10.1039/C2JM35577A
- Li, J. F., Tian, X. D., Li, S. B., Anema, J. R., Yang, Z. L., Ding, Y., . . . Tian, Z. Q. (2012). Surface analysis using shell-isolated nanoparticle-enhanced Raman spectroscopy. *Nature Protocols*, Vol. 8(1), 52-62. doi:10.1038/nprot.2012.141
- Liao, W. Y., Yang, Y. J., Hsu, C. M., Hsu, C. C., Cheng, I. C., & Chen, J. Z. (2015). Atmospheric-pressure-plasma-jet sintered dual-scale porous TiO₂ using an economically favorable NaCl solution. *Journal of Power Sources*, Vol. 281, 252-257. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.01.160
- Lim, S. P., Lim, Y. S., Pandikumar, A., Lim, H. N., Ng, Y. H., Ramaraj, R., . . . Huang, N. M. (2017). Gold-silver@TiO₂ nanocomposite-modified plasmonic photoanodes for higher efficiency dye-sensitized solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(2), 1395-1407. doi:10.1039/C6CP05950C
- López-Muñoz, G. A., Pescador-Rojas, J. A., Ortega-Lopez, J., Salazar, J. S., Balderas-López, J. A., Albert, A. J., & Gorden, A. B. (2012). Thermal diffusivity measurement of spherical gold nanofluids of different sizes/concentrations. *Nanoscale Research Letters*, Vol. 7(423), 423-428. doi:10.1186/1556-276X-7-423
- Luttrell, T., Halpegamage, S., Tao, J., Kramer, A., Sutter, E., & Batzill, M. (2014). Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO₂ films. *Scientific Reports*, Vol. 4(4043), 4043-4051. doi:10.1038/srep04043
- Maeland, A., & Flanagan, T. B. (1964). Lattice Spacings of gold-palladium alloys. *Canadian Journal of Physics*, 42(11), 2364-2366. doi:10.1139/p64-213
- Nazeeruddin, M. K., Baranoff, E., & Grätzel, M. (2011). Dye-sensitized solar cells: A brief overview. *Solar Energy*, 85, 1172-1178. doi:10.1016/j.solener.2011.01.018

- Niu, H., Liu, L., Wang, H., Zhang, S., Ma, Q., Mao, X., . . . Xu, J. (2012). Significant influence of nano-SiO₂ on the performance of dye-sensitized solar cells based on P25. *Electrochimica Acta*, Vol. 81, 246-253. doi:10.1016/j.electacta.2012.07.028
- O'Regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Letters to Natures*, Vol. 353, 737-740. doi:10.1038/353737a0
- Panda, B. R., & Chattopadhyay, A. (2007). Synthesis of Au Nanoparticles at "all" pH by H₂O₂ Reduction of HAuCl₄. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 7(6), 1911–1915. doi:10.1166/jnn.2007.740
- Pandikumar, A., Lim, S. P., Jayabal, S., Huang, N. M., Lim, H. N., & Ramaraj, R. (2016). Titania@gold plasmonic nanoarchitectures : An ideal photoanode for dye-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 408–420. doi:10.1016/j.rser.2016.01.107
- Park, N. G., van de Lagemaat, J., & Frank, A. U. (2000). Comparison of Dye-Sensitized Rutile- and Anatase-Based TiO₂ Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 104(38), 8989-8994. doi:10.1021/jp9943651
- Pribadi, A. J., & Munasir, A. A. (2013). Pengaruh pH akhir larutan pada sintesis nanosilika dari bahan lusi dengan metode kopresipitasi. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, Vol. 2(3), 7-10.
- Puspitasari, R. N. (2016). *Fabrikasi Struktur core-shell SiO₂@TiO₂@Au sebagai Partikel Penghambur dan Material Plasmonic untuk aplikasi DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ruzicka, J. Y. (2013). *Particle sizing using ImageJ*. New Zealand: MacDiarmid Institute MESA.
- Saikia, B. J., & Parthasarathy, G. (2010). Fourier Transform Infrared Spectroscopic Fourier Transform Infrared

- Spectroscopic Meghalaya, Northeastern India. *Scientific Research*, Vol. 1(4), 206-210. doi:10.4236/jmp.2010.1403
- Sheehan, S. W., Noh, H., Brudvig, G. W., Cao, H., Schmuttenmaer, C. A., & Rooks, M. (2012). Plasmonic Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells Using Core-Shell-Shell Nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 117(2), 927-934. doi:10.1021/jp311881k
- Smyth, J. R., & Bish, D. L. (1988). *Crystal Structures and Cation Sites of the Rock-Forming Minerals*. Boston: ALLEN & UNWIN.
- Son, S., Hwang, S. H., Kim, C., Yun, J. Y., Jang, J., & Lie, H. N. (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*, Vol. 5(11), 4815-4820. doi:10.1021/am400441v
- Sze, S. M. (1985). *Semiconductor Devices Physics and Technology (2nd Edition)*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tien, T. C., Pan, F. M., Tsai, F. Y., Lin, C., Li, K. M., & Yao, L. M. (2011). Growth mode transition of atomic layer deposited Al₂O₃ on porous TiO₂ electrodes of dye-sensitized solar cells. *Thin Solid Films*, Vol. 520(6), 6-11. doi:10.1016/j.tsf.2011.08.057
- Tributsch, H. (1972). Reaction of Excited Chlorophyll Molecules at Electrodes and in Photosynthesis. *Photochemistry and Photobiology*, 16(4), 261-269. doi:10.1111/j.1751-1097.1972.tb06297.x
- Tung, R. T. (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 1-54. doi:10.1063/1.4858400
- Varghese, O., & Grimes, C. (2008). Appropriate Strategies for Determining The Photoconversion Efficiency of Water Photoelectrolysis Cells: A Review with Examples Using Titania Nanotube Array Photoanodes. *Solar Energy*

- Materials & Solar Cells*, Vol. 92(4), 374-384.
doi:10.1016/j.solmat.2007.11.006
- Wahyuono, R. A. (2013). *Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Fabrication with TiO₂ and ZnO Nanoparticle for High Conversion Efficiency*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wang, Y., Chen, E., Lai, H., Lu, B., Hu, Z., Qin, X., . . . Du, G. (2013). Enhanced light scattering and photovoltaic performance for dye-sensitized solar cells by embedding submicron SiO₂/TiO₂ core/shell particles in photoanode. *Ceramics International*, Vol. 39(5), 5407-5413.
doi:10.1016/j.ceramint.2012.12.048
- Willets, K. A., & Van Duyne, R. P. (2006). Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing. *Annual Review of Physical Chemistry*, Vol. 58, 267-297.
doi:10.1146/annurev.physchem.58.032806.104607
- Wongcharee, K., Meeyoo, V., Chavadej, S., Kumara, N. T., Lim, A., Lim, C. M., . . . Ekanayake, P. (2017). Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91(7), 566-571.
doi:10.1016/j.solmat.2006.11.005
- Wu, Y., & Zhu, W. (2013). Organic sensitizers from D-p-A to D-A-p-A: effect of the internal electron-withdrawing units on molecular absorption, energy levels and photovoltaic performances. *The Royal Society of Chemistry*, Vol. 42(5), 2039-2058.
doi:10.1039/C2CS35346F
- Zhang, R., Zhou, Y., Peng, L., Li, X., Chen, S., Feng, X., . . . Huang, W. (2016). Influence of SiO₂ shell thickness on power conversion efficiency in plasmonic polymer solar cells with Au nanorod@SiO₂ core-shell structures. *Scientific Reports*, Vol. 6(25036), 1-9.
doi:10.1038/srep25036
- Ziegler, C., & Eychmüller, A. (2011). Seeded growth synthesis of uniform gold nanoparticles with diameters of 15-300 nm.

Journal of Physical Chemistry C, Vol. 115(11), 4502-4506. doi:10.1021/jp1106982

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A PERHITUNGAN XRD

- Au@SiO₂ 30 ml

Angle [$^{\circ}$ 2Th.]	I=Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	Type	hkl	X=I/Imax	Percentage= (X/Xtotal)x100%		Ukuran kristal (nm)
38,2656	44,96	0,3346	Au	111	0,0130	0,4284	0,4284	24,8419
31,6856	3448,25	0,1673	NaCl	200	1,0000	32,8599	33,8248	48,7928
53,8337	101,25	0,0816		311	0,0294	0,9649		
45,4220	2289,06	0,0816		SiO ₂	201	0,6638		21,8135
45,5421	1486,29	0,0612	201		0,4310	14,1635		
56,4659	690,73	0,1224	210		0,2003	6,5823		
56,6193	384,68	0,0816	210		0,1116	3,6658		
66,2107	320,22	0,1020	300		0,0929	3,0515		
73,0990	17,94	0,4080	104		0,0052	0,1710		
75,2738	428,93	0,1224	302		0,1244	4,0875		
75,4952	235,33	0,1020	302		0,0682	2,2426		
83,9612	266,28	0,1224	311		0,0772	2,5375		
84,2324	137,43	0,1224	204		0,0399	1,3096		
27,3948	465,64	0,1338	101		0,1350	4,4373		
66,3994	176,8	0,0816	γ -Al ₂ O ₃		440	0,0513	1,6848	1,6848
Xtotal								3,0432

- Au@SiO₂ 60 ml

Angle [$^{\circ}$ 2Th.]	I=Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	Type	hkl	X=I/Imax	Percentage= (X/Xtotal)x100%		Ukuran kristal (nm)		
38,3589	24,92	0,6691	Au	111	0,0098	0,3706	0,3706	12,4263		
31,7589	2531,88	0,1004	NaCl	200	1,0000	37,6548	38,4890	81,3199		
53,9086	56,09	0,204		311	0,0222	0,8342				
45,4782	1084,46	0,204		SiO ₂	201	0,4283		16,1284	59,2702	
45,6552	1034,04	0,0816	201		0,4084	15,3785				
56,5002	327,68	0,0612	210		0,1294	4,8733				
56,6043	350,94	0,1836	210		0,1386	5,2193				
66,271	171,64	0,102	300		0,0678	2,5527				
73,2842	14,1	0,4896	104		0,0056	0,2097				
75,3313	348,11	0,1224	302		0,1375	5,1772				
75,5099	271,95	0,204	302		0,1074	4,0445				
83,9843	190,77	0,102	311		0,0753	2,8372				
27,4519	191,59	0,2007	101		0,0757	2,8494				
66,4567	125,75	0,1224	γ -Al ₂ O ₃		440	0,0497	1,8702	1,8702		76,6989
Xtotal						2,6557				

• Au@SiO₂ 90 ml

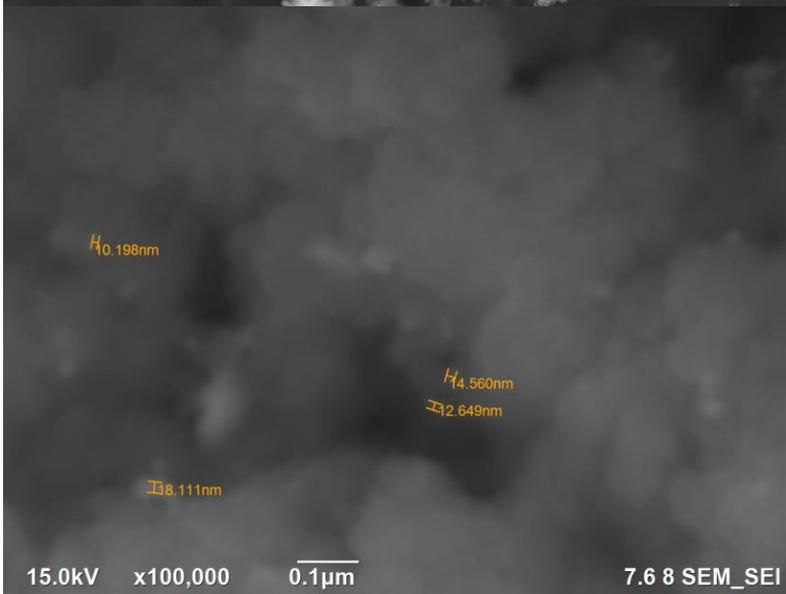
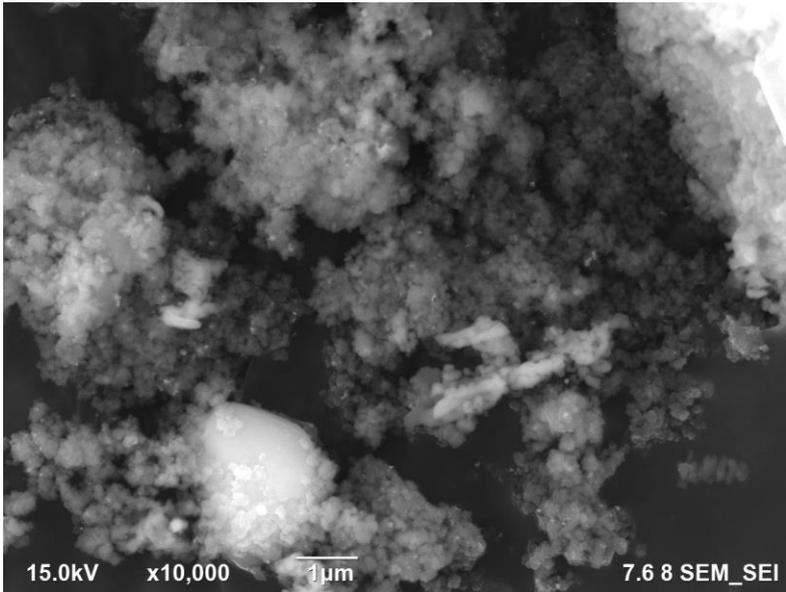
Angle [°2Th,]	I=Height [cts]	FWHM Left [°2Th,]	Type	hkl	X=I/Imax	Percentage=(X/Xtotal)x100%		Ukuran kristal (nm)
38,4489	23,92	0,6991	Au	111	0,0063	0,2346	0,2346	11,8963
31,6903	3801,76	0,0816	NaCl	200	1,0000	37,2910	38,0232	100,0384
53,868	74,65	0,1224		311	0,0196	0,7322		
45,4286	2297,27	0,0816	SiO ₂	201	0,6043	22,5336	60,8272	
45,5599	1078,26	0,0612		201	0,2836	10,5765		
56,4598	637,88	0,0816		210	0,1678	6,2569		
56,62	342,61	0,0612		210	0,0901	3,3606		
66,2079	210,3	0,102		300	0,0553	2,0628		
73,0415	29,25	0,2448		104	0,0077	0,2869		
75,2778	376,53	0,102		302	0,0990	3,6933		
75,5056	180,6	0,1224		302	0,0475	1,7715		
83,9671	386,99	0,0816		311	0,1018	3,7959		
84,2347	146,63	0,1224		204	0,0386	1,4383		
27,3526	514,92	0,0669		101	0,1354	5,0508		
66,4033	93,28	0,0816		γ-Al ₂ O ₃	440	0,0245		0,9150
Xtotal					2,6816			

• Au@SiO₂ 120 ml

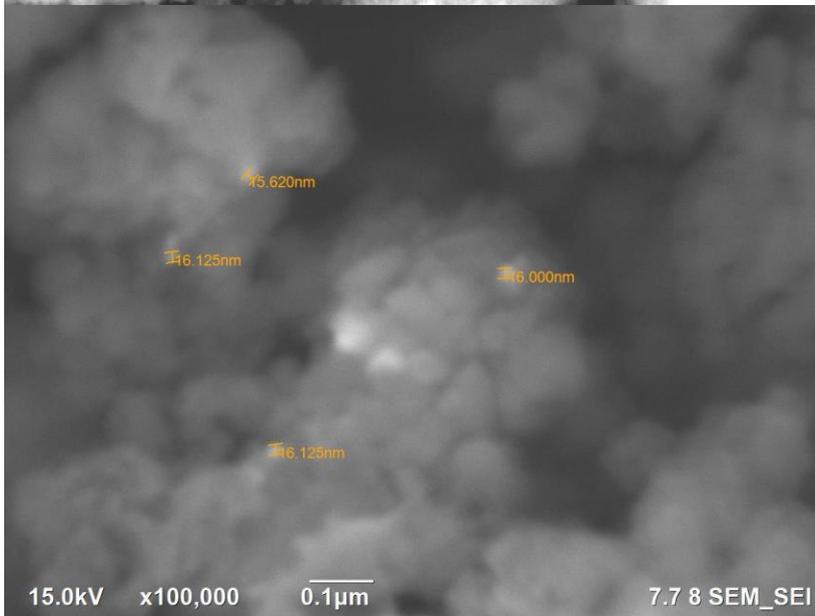
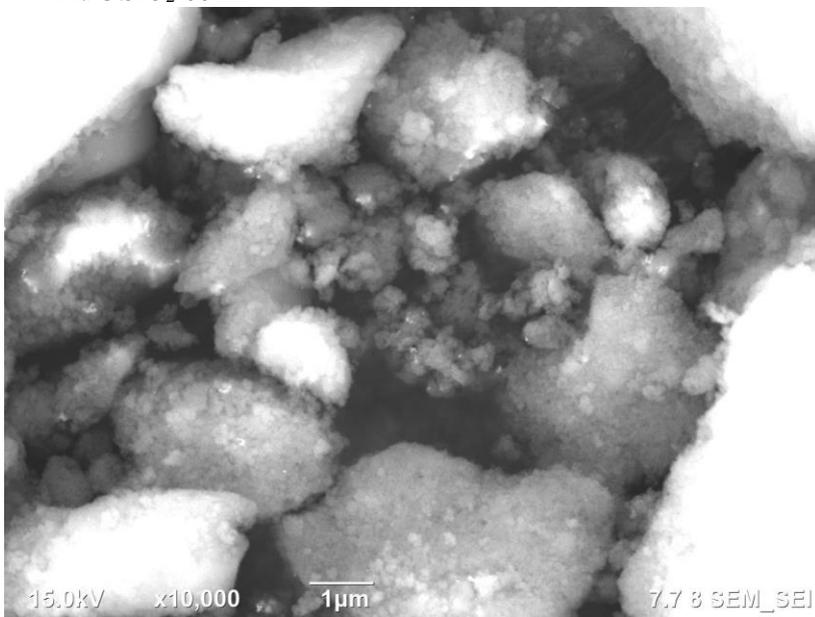
Angle [°2Th,]	I=Height [cts]	FWHM Left [°2Th,]	Type	hkl	X=I/Imax	Percentage=(X/Xtotal)x100%		Ukuran kristal (nm)
38,4489	23,92	0,6991	Au	111	0,0063	0,2346	0,2346	11,8963
31,6903	3801,76	0,0816	NaCl	200	1,0000	37,2910	38,0232	100,0384
53,868	74,65	0,1224		311	0,0196	0,7322		
45,4286	2297,27	0,0816	SiO ₂	201	0,6043	22,5336	60,8272	
45,5599	1078,26	0,0612		201	0,2836	10,5765		
56,4598	637,88	0,0816		210	0,1678	6,2569		
56,62	342,61	0,0612		210	0,0901	3,3606		
66,2079	210,3	0,102		300	0,0553	2,0628		
73,0415	29,25	0,2448		104	0,0077	0,2869		
75,2778	376,53	0,102		302	0,0990	3,6933		
75,5056	180,6	0,1224		302	0,0475	1,7715		
83,9671	386,99	0,0816		311	0,1018	3,7959		
84,2347	146,63	0,1224		204	0,0386	1,4383		
27,3526	514,92	0,0669		101	0,1354	5,0508		
66,4033	93,28	0,0816		γ-Al ₂ O ₃	440	0,0245		0,9150
Xtotal					2,6816			

LAMPIRAN B HASIL FE-SEM

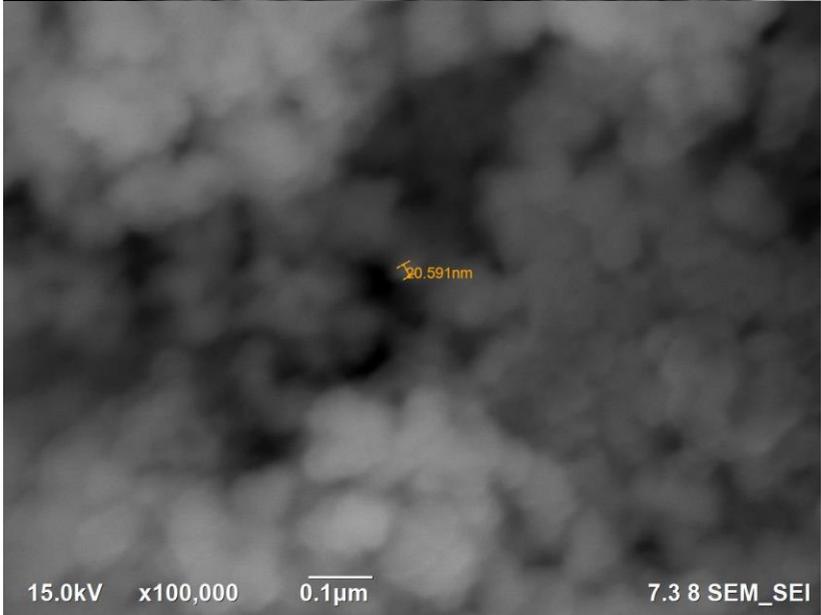
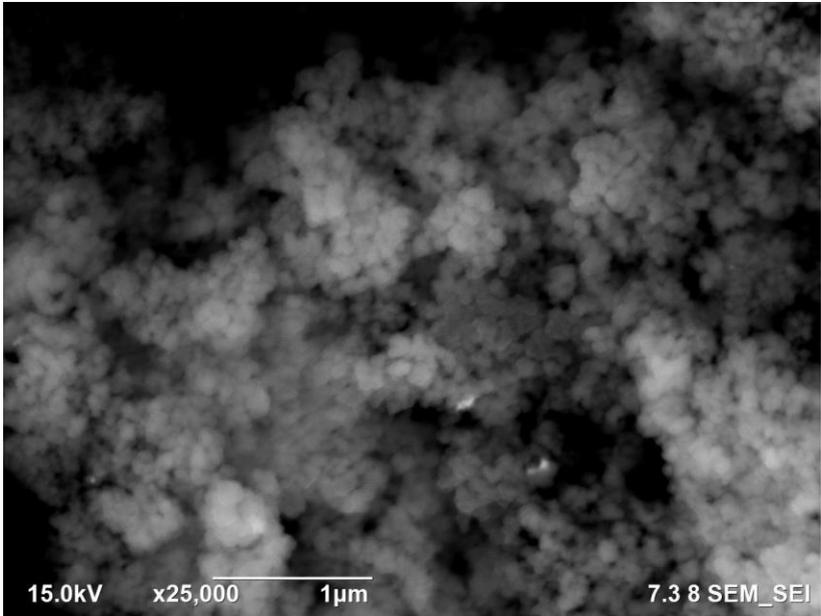
- Au@SiO₂ 30 ml



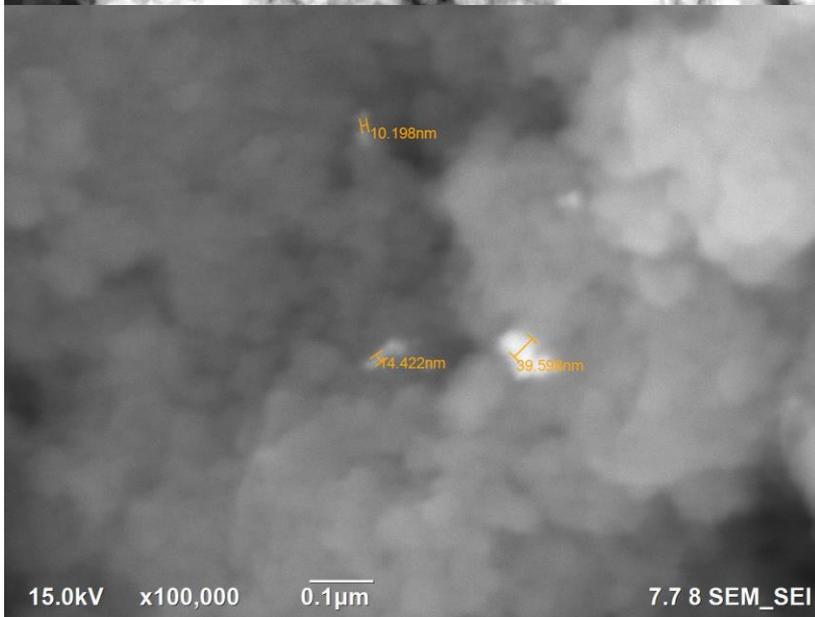
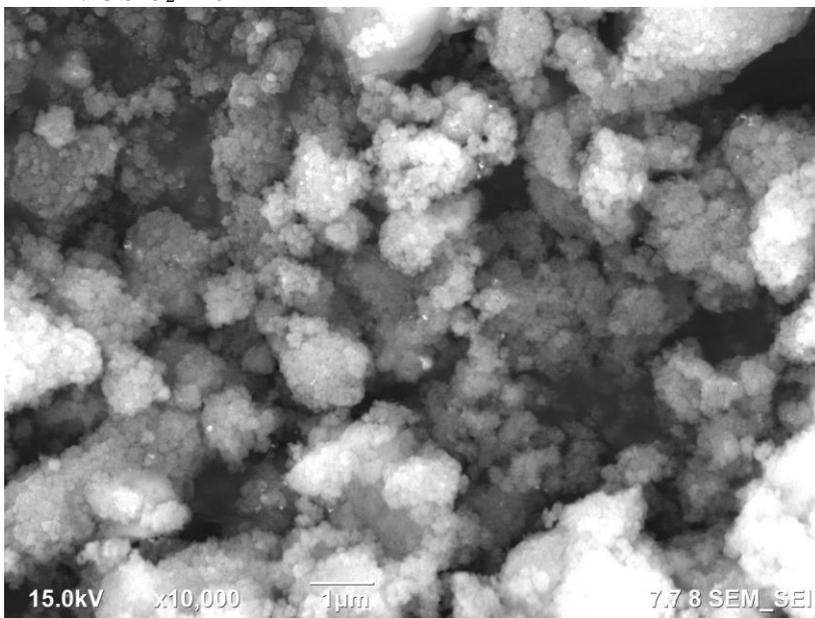
- Au@SiO₂ 60 ml



- Au@SiO₂ 90 ml

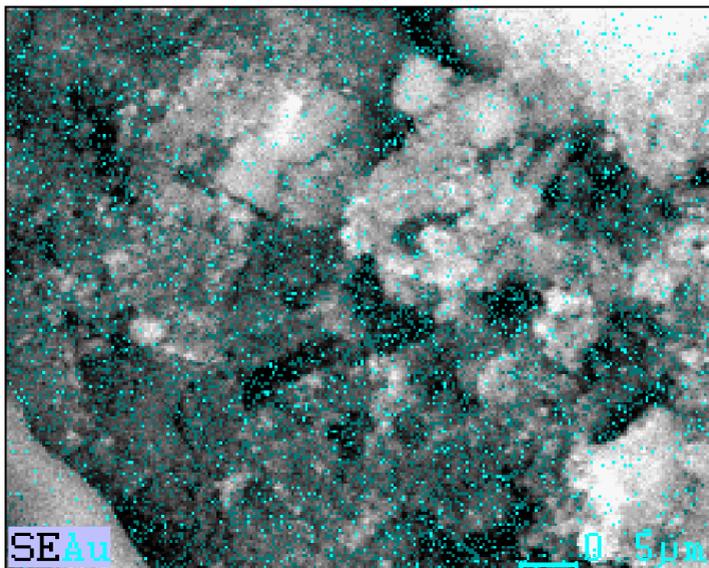


- Au@SiO₂ 120 ml

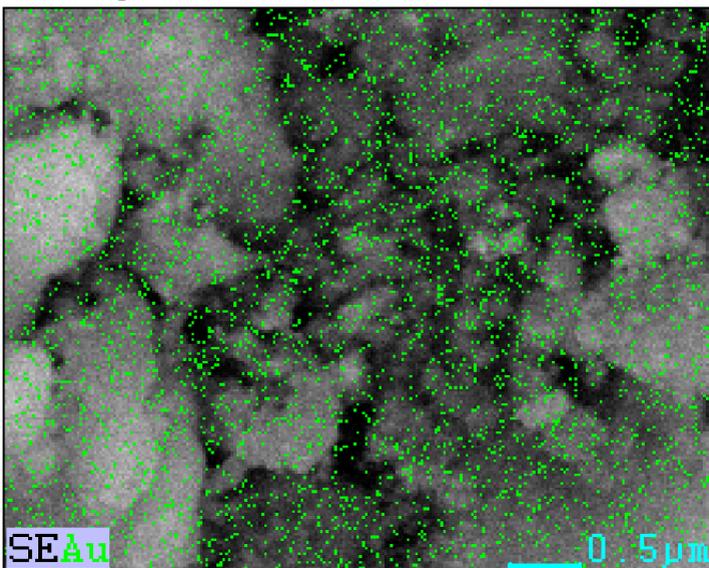


LAMPIRAN C HASIL EDX

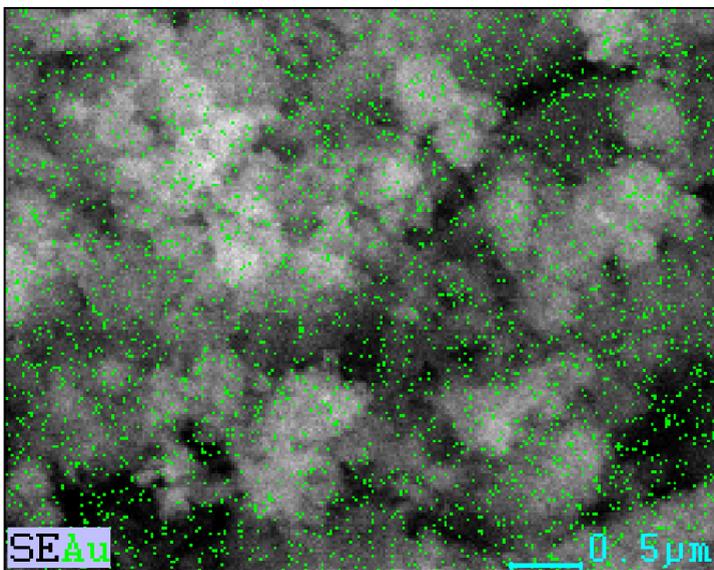
- Au@SiO₂ 30 ml



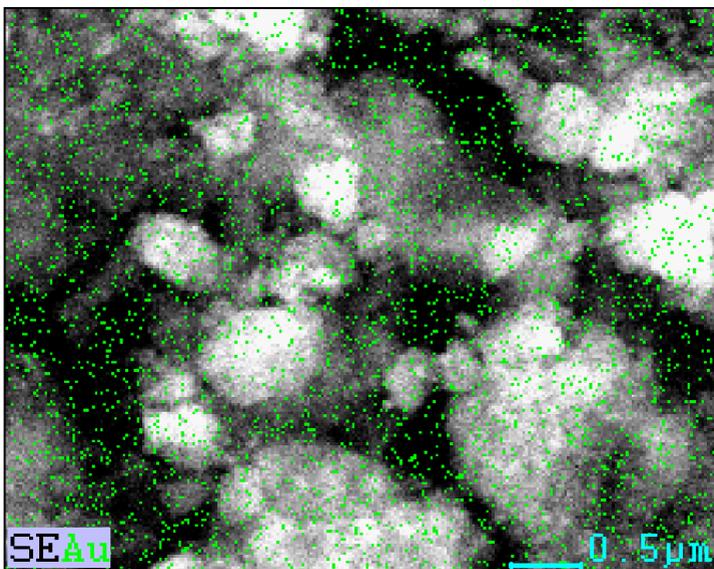
- Au@SiO₂ 60 ml



- Au@SiO₂ 90 ml



- Au@SiO₂ 120 ml



LAMPIRAN D

PERHITUNGAN ENERGI PITA CELAH

Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi				$(ahv)^2$				hv
	Au@SiO ₂ 30 ml	Au@SiO ₂ 60 ml	Au@SiO ₂ 90 ml	Au@SiO ₂ 120 ml	Au@SiO ₂ 30 ml	Au@SiO ₂ 60 ml	Au@SiO ₂ 90 ml	Au@SiO ₂ 120 ml	
370	0,0483	0,0567	0,2583	0,1213	1390,67	1911,55	39727,58	8763,78	3,35
372	0,0683	0,0760	0,2767	0,1417	2749,88	3401,54	45077,77	11819,09	3,33
374	0,0860	0,0950	0,2933	0,1590	4309,12	5258,22	50131,91	14729,42	3,31
376	0,1010	0,1090	0,3060	0,1717	5880,33	6848,76	53976,14	16987,56	3,30
378	0,1100	0,1180	0,3133	0,1793	6901,39	7941,73	55996,93	18343,11	3,28
380	0,1160	0,1240	0,3177	0,1850	7594,22	8677,82	56952,23	19315,72	3,26
382	0,1200	0,1290	0,3197	0,1883	8042,12	9293,67	57069,31	19808,99	3,25
384	0,1230	0,1310	0,3207	0,1907	8361,47	9484,51	56830,28	20091,93	3,23
386	0,1240	0,1330	0,3213	0,1917	8410,14	9675,27	56477,00	20093,39	3,21
388	0,1250	0,1340	0,3203	0,1920	8458,46	9720,33	55548,90	19956,01	3,20
390	0,1260	0,1347	0,3193	0,1923	8506,41	9716,85	54637,89	19820,50	3,18
392	0,1257	0,1350	0,3177	0,1927	8375,34	9665,63	53518,73	19686,82	3,16
394	0,1260	0,1350	0,3167	0,1923	8334,57	9567,75	52643,76	19420,09	3,15
396	0,1260	0,1347	0,3153	0,1923	8250,60	9424,63	51675,42	19224,43	3,13
398	0,1260	0,1350	0,3137	0,1920	8167,88	9376,40	50618,03	18965,79	3,12
400	0,1250	0,1347	0,3127	0,1917	7958,56	9237,08	49794,09	18711,47	3,10
402	0,1250	0,1347	0,3107	0,1910	7879,57	9145,40	48671,18	18397,10	3,08
404	0,1250	0,1347	0,3097	0,1903	7801,75	9055,08	47880,74	18088,46	3,07
406	0,1247	0,1347	0,3077	0,1907	7683,93	8966,08	46799,74	17973,48	3,05
408	0,1240	0,1340	0,3063	0,1900	7527,62	8790,71	45941,25	17673,46	3,04
410	0,1240	0,1337	0,3050	0,1897	7454,36	8661,90	45098,97	17440,10	3,02
412	0,1233	0,1333	0,3033	0,1893	7303,00	8535,28	44175,40	17210,54	3,01
414	0,1230	0,1333	0,3020	0,1890	7193,57	8453,01	43365,85	16984,69	2,99
416	0,1230	0,1330	0,3007	0,1880	7124,56	8330,12	42571,46	16644,23	2,98
418	0,1223	0,1330	0,2987	0,1873	6980,26	8250,60	41605,96	16368,63	2,97
420	0,1220	0,1320	0,2970	0,1873	6876,31	8049,78	40752,00	16213,10	2,95
422	0,1217	0,1320	0,2953	0,1870	6774,12	7973,66	39914,87	16002,69	2,94
424	0,1210	0,1317	0,2940	0,1863	6637,03	7858,77	39182,99	15739,25	2,92
426	0,1207	0,1310	0,2927	0,1860	6538,68	7706,52	38464,67	15536,08	2,91
428	0,1200	0,1307	0,2907	0,1853	6406,33	7595,86	37586,99	15281,08	2,90
430	0,1200	0,1300	0,2890	0,1843	6346,88	7448,77	36812,34	14976,33	2,88
432	0,1190	0,1300	0,2877	0,1840	6183,88	7379,96	36136,51	14784,37	2,87
434	0,1190	0,1293	0,2863	0,1833	6127,02	7237,29	35473,09	14542,47	2,86
436	0,1187	0,1290	0,2847	0,1830	6036,97	7134,13	34740,41	14357,00	2,84
438	0,1180	0,1283	0,2827	0,1820	5914,94	6996,25	33941,86	14071,14	2,83
440	0,1170	0,1280	0,2817	0,1813	5762,37	6896,83	33396,44	13841,55	2,82
442	0,1163	0,1280	0,2803	0,1813	5645,45	6834,55	32782,31	13716,57	2,80
444	0,1160	0,1270	0,2790	0,1800	5562,69	6667,70	32179,34	13394,11	2,79
446	0,1160	0,1270	0,2777	0,1793	5512,91	6608,04	31587,29	13176,10	2,78
448	0,1150	0,1260	0,2760	0,1793	5370,00	6446,44	30931,20	13058,72	2,77
450	0,1150	0,1260	0,2747	0,1790	5322,37	6389,26	30361,38	12894,83	2,76
452	0,1140	0,1260	0,2727	0,1777	5184,03	6332,85	29656,63	12591,27	2,74
454	0,1140	0,1257	0,2720	0,1777	5138,46	6244,00	29252,35	12480,58	2,73
456	0,1137	0,1253	0,2707	0,1773	5063,74	6156,56	28712,73	12324,97	2,72
458	0,1130	0,1247	0,2690	0,1763	4960,90	6038,16	28113,07	12080,16	2,71
460	0,1130	0,1250	0,2677	0,1763	4917,86	6017,82	27593,55	11975,34	2,70
462	0,1123	0,1247	0,2667	0,1763	4818,01	5934,05	27151,15	11871,88	2,68
464	0,1120	0,1243	0,2657	0,1753	4748,26	5851,59	26716,08	11636,64	2,67

466	0,1120	0,1240	0,2643	0,1753	4707,59	5770,40	26222,05	11536,97	2,66
468	0,1113	0,1240	0,2627	0,1743	4612,04	5721,19	25671,60	11308,47	2,65
470	0,1113	0,1237	0,2617	0,1743	4572,88	5642,14	25260,14	11212,43	2,64
472	0,1110	0,1233	0,2603	0,1733	4507,09	5564,31	24791,92	10990,43	2,63
474	0,1107	0,1233	0,2590	0,1733	4442,34	5517,46	24331,98	10897,88	2,62
476	0,1103	0,1227	0,2580	0,1730	4378,59	5412,20	23941,98	10764,97	2,60
478	0,1097	0,1223	0,2570	0,1723	4289,71	5337,88	23558,36	10592,96	2,59
480	0,1097	0,1220	0,2557	0,1723	4254,04	5264,68	23120,67	10504,87	2,58
482	0,1100	0,1213	0,2543	0,1713	4244,49	5164,17	22690,66	10297,32	2,57
484	0,1093	0,1213	0,2533	0,1713	4158,62	5121,58	22326,91	10212,40	2,56
486	0,1090	0,1210	0,2520	0,1713	4099,35	5051,65	21911,05	10128,52	2,55
488	0,1093	0,1210	0,2507	0,1707	4090,72	5010,32	21502,46	9967,64	2,54
490	0,1090	0,1200	0,2500	0,1707	4032,70	4887,70	21214,00	9886,44	2,53
492	0,1093	0,1200	0,2490	0,1703	4024,48	4848,05	20873,88	9767,96	2,52
494	0,1093	0,1200	0,2480	0,1700	3991,96	4808,87	20539,23	9651,14	2,51
496	0,1090	0,1190	0,2467	0,1693	3935,72	4691,00	20155,44	9498,53	2,50
498	0,1090	0,1190	0,2457	0,1693	3904,17	4653,39	19832,09	9422,39	2,49
500	0,1093	0,1187	0,2447	0,1693	3896,73	4590,42	19513,91	9347,16	2,48
502	0,1093	0,1180	0,2437	0,1683	3865,74	4502,89	19200,81	9163,63	2,47
504	0,1097	0,1177	0,2427	0,1683	3858,54	4442,02	18892,69	9091,05	2,46
506	0,1100	0,1180	0,2420	0,1680	3851,40	4431,98	18640,79	8983,64	2,45
508	0,1093	0,1177	0,2410	0,1680	3774,96	4372,34	18341,77	8913,04	2,44
510	0,1110	0,1177	0,2407	0,1677	3860,47	4338,12	18147,89	8808,21	2,43
512	0,1107	0,1177	0,2393	0,1683	3807,40	4304,29	17807,42	8809,17	2,42
514	0,1110	0,1170	0,2387	0,1673	3800,62	4222,60	17570,82	8637,21	2,41
516	0,1113	0,1170	0,2377	0,1673	3793,90	4189,93	17289,08	8570,38	2,40
518	0,1117	0,1170	0,2370	0,1670	3787,23	4157,64	17059,72	8470,48	2,39
520	0,1127	0,1167	0,2363	0,1673	3825,77	4102,24	16833,64	8439,04	2,38
522	0,1123	0,1157	0,2357	0,1673	3774,08	4001,38	16610,78	8374,49	2,38
524	0,1123	0,1160	0,2347	0,1663	3745,32	3993,82	16344,62	8211,65	2,37
526	0,1127	0,1157	0,2340	0,1670	3738,99	3940,76	16128,53	8214,78	2,36
528	0,1133	0,1160	0,2330	0,1663	3754,76	3933,53	15870,06	8087,71	2,35
530	0,1133	0,1157	0,2327	0,1673	3726,48	3881,50	15705,48	8123,59	2,34
532	0,1133	0,1157	0,2317	0,1667	3698,51	3852,37	15453,91	7998,51	2,33
534	0,1137	0,1157	0,2307	0,1663	3692,48	3823,57	15206,24	7906,98	2,32
536	0,1133	0,1150	0,2307	0,1663	3643,51	3751,46	15092,97	7848,08	2,31
538	0,1133	0,1150	0,2297	0,1657	3616,47	3723,62	14851,35	7727,52	2,30
540	0,1137	0,1150	0,2287	0,1653	3610,88	3696,09	14613,45	7639,55	2,30
542	0,1133	0,1150	0,2283	0,1650	3563,29	3668,87	14463,54	7552,73	2,29
544	0,1140	0,1150	0,2277	0,1653	3578,88	3641,94	14273,67	7527,62	2,28
546	0,1137	0,1147	0,2263	0,1647	3531,96	3594,38	14003,82	7412,43	2,27
548	0,1137	0,1140	0,2257	0,1653	3506,22	3526,82	13820,01	7418,13	2,26
550	0,1133	0,1140	0,2250	0,1643	3460,39	3501,22	13638,74	7275,46	2,25
552	0,1133	0,1140	0,2243	0,1640	3435,36	3475,89	13459,97	7193,57	2,25
554	0,1133	0,1137	0,2237	0,1643	3410,60	3430,69	13283,66	7170,78	2,24
556	0,1130	0,1137	0,2227	0,1640	3366,22	3406,05	13070,60	7090,43	2,23
558	0,1123	0,1133	0,2217	0,1633	3302,81	3361,88	12860,77	6982,58	2,22
560	0,1127	0,1130	0,2213	0,1630	3298,75	3318,30	12730,70	6904,52	2,21
562	0,1127	0,1127	0,2207	0,1630	3275,31	3275,31	12564,22	6855,47	2,21
564	0,1123	0,1127	0,2193	0,1623	3232,91	3252,13	12324,97	6751,37	2,20
566	0,1117	0,1127	0,2190	0,1617	3172,11	3229,18	12200,85	6648,79	2,19
568	0,1113	0,1130	0,2190	0,1627	3131,04	3225,48	12115,08	6683,98	2,18
570	0,1110	0,1120	0,2173	0,1613	3090,52	3146,45	11847,80	6528,80	2,18
572	0,1113	0,1120	0,2167	0,1610	3087,40	3124,49	11693,02	6456,46	2,17
574	0,1103	0,1117	0,2160	0,1613	3011,09	3084,31	11540,33	6438,12	2,16
576	0,1103	0,1113	0,2150	0,1610	2990,22	3044,67	11354,46	6367,10	2,15

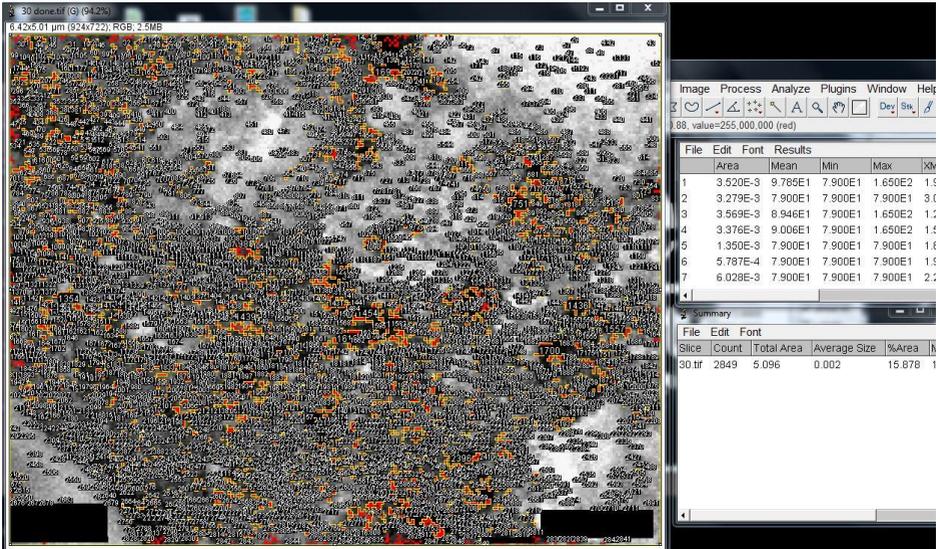
578	0,1097	0,1110	0,2147	0,1603	2933,78	3005,56	11241,08	6270,85	2,14
580	0,1097	0,1110	0,2133	0,1597	2913,59	2984,86	11025,44	6176,00	2,14
582	0,1083	0,1103	0,2127	0,1593	2823,66	2928,88	10881,47	6108,04	2,13
584	0,1087	0,1107	0,2120	0,1593	2821,64	2926,46	10739,42	6066,28	2,12
586	0,1083	0,1100	0,2110	0,1583	2785,25	2871,61	10565,85	5949,55	2,12
588	0,1077	0,1097	0,2103	0,1573	2732,39	2834,84	10427,88	5834,74	2,11
590	0,1073	0,1097	0,2093	0,1573	2697,12	2815,66	10259,06	5795,25	2,10
592	0,1073	0,1093	0,2087	0,1573	2678,92	2779,69	10125,05	5756,16	2,09
594	0,1067	0,1087	0,2080	0,1570	2627,96	2727,44	9992,83	5693,26	2,09
596	0,1060	0,1080	0,2073	0,1567	2577,83	2676,02	9862,35	5631,13	2,08
598	0,1053	0,1087	0,2067	0,1563	2528,51	2691,07	9733,59	5569,75	2,07
600	0,1057	0,1077	0,2060	0,1550	2527,60	2624,19	9606,53	5438,71	2,07
602	0,1050	0,1077	0,2050	0,1547	2479,25	2606,78	9450,38	5379,42	2,06
604	0,1043	0,1077	0,2033	0,1547	2431,68	2589,54	9235,87	5343,85	2,05
606	0,1043	0,1070	0,2030	0,1543	2415,66	2540,72	9144,95	5285,78	2,05
608	0,1033	0,1067	0,2030	0,1537	2354,01	2508,33	9084,89	5205,79	2,04
610	0,1030	0,1067	0,2017	0,1530	2323,54	2491,91	8907,24	5126,94	2,03
612	0,1023	0,1060	0,2010	0,1523	2278,59	2444,80	8790,71	5049,19	2,03
614	0,1023	0,1057	0,1993	0,1517	2263,77	2413,65	8589,30	4972,54	2,02
616	0,1013	0,1053	0,1993	0,1513	2205,35	2382,89	8533,62	4918,61	2,01
618	0,1010	0,1040	0,1980	0,1503	2176,71	2307,94	8365,43	4822,46	2,01
620	0,1003	0,1040	0,1973	0,1503	2134,23	2293,07	8255,67	4791,39	2,00
622	0,1000	0,1043	0,1967	0,1493	2106,46	2292,98	8147,33	4697,51	1,99
624	0,0993	0,1037	0,1960	0,1490	2065,17	2249,28	8040,40	4646,63	1,99
626	0,0987	0,1030	0,1950	0,1487	2024,54	2206,28	7907,79	4596,35	1,98
628	0,0977	0,1027	0,1940	0,1473	1971,10	2178,08	7777,12	4485,57	1,97
630	0,0980	0,1017	0,1930	0,1467	1971,99	2122,32	7648,36	4416,89	1,97
632	0,0977	0,1023	0,1923	0,1460	1946,23	2136,66	7547,61	4349,17	1,96
634	0,0977	0,1013	0,1917	0,1467	1933,97	2081,90	7448,17	4361,33	1,96
636	0,0967	0,1007	0,1910	0,1453	1882,67	2041,70	7350,00	4255,50	1,95
638	0,0957	0,1007	0,1900	0,1447	1832,38	2028,92	7227,71	4190,16	1,94
640	0,0960	0,1000	0,1890	0,1443	1833,65	1989,64	7107,20	4144,84	1,94
642	0,0947	0,0993	0,1880	0,1437	1771,98	1950,99	6988,44	4081,09	1,93
644	0,0943	0,0997	0,1877	0,1423	1748,61	1951,92	6920,50	3980,85	1,93
646	0,0947	0,0997	0,1870	0,1423	1750,10	1939,86	6828,93	3956,24	1,92
648	0,0937	0,0987	0,1850	0,1420	1702,77	1889,41	6642,45	3913,46	1,91
650	0,0930	0,0987	0,1853	0,1413	1668,30	1877,80	6625,44	3852,98	1,91
652	0,0930	0,0980	0,1840	0,1410	1658,08	1841,16	6490,45	3811,34	1,90
654	0,0927	0,0977	0,1830	0,1403	1636,16	1817,49	6380,89	3752,33	1,90
656	0,0923	0,0973	0,1833	0,1397	1614,52	1794,11	6365,17	3694,13	1,89
658	0,0927	0,0970	0,1823	0,1397	1616,33	1771,03	6257,70	3671,71	1,88
660	0,0917	0,0970	0,1820	0,1387	1572,06	1760,31	6197,11	3597,42	1,88
662	0,0907	0,0967	0,1810	0,1377	1528,67	1737,69	6092,22	3524,33	1,87
664	0,0907	0,0950	0,1797	0,1373	1519,48	1668,19	5966,69	3486,18	1,87
666	0,0900	0,0953	0,1797	0,1373	1488,23	1669,84	5930,91	3465,28	1,86
668	0,0897	0,0947	0,1787	0,1367	1468,40	1636,73	5830,00	3411,20	1,86
670	0,0893	0,0953	0,1787	0,1363	1448,81	1649,96	5795,25	3374,34	1,85
672	0,0887	0,0947	0,1773	0,1357	1418,79	1617,30	5675,14	3321,56	1,84
674	0,0897	0,0943	0,1770	0,1357	1442,37	1596,41	5620,32	3301,88	1,84
676	0,0887	0,0940	0,1760	0,1350	1402,05	1575,78	5524,16	3250,19	1,83
678	0,0873	0,0947	0,1760	0,1347	1352,18	1588,80	5491,62	3215,11	1,83
680	0,0877	0,0937	0,1747	0,1340	1354,52	1546,28	5376,96	3164,66	1,82
682	0,0867	0,0930	0,1740	0,1333	1316,04	1515,42	5304,74	3114,89	1,82
684	0,0860	0,0927	0,1727	0,1327	1288,31	1495,79	5193,25	3065,82	1,81
686	0,0860	0,0927	0,1720	0,1320	1280,81	1487,08	5123,22	3017,41	1,81

688	0,0857	0,0920	0,1710	0,1313	1263,52	1457,25	5034,43	2969,67	1,80
690	0,0857	0,0910	0,1707	0,1307	1256,20	1417,49	4985,79	2922,58	1,80
692	0,0853	0,0907	0,1697	0,1303	1239,25	1399,00	4899,09	2890,90	1,79
694	0,0843	0,0903	0,1687	0,1297	1203,41	1380,74	4813,65	2844,94	1,79
696	0,0837	0,0897	0,1673	0,1300	1177,66	1352,63	4710,65	2843,17	1,78
698	0,0837	0,0897	0,1677	0,1290	1170,92	1344,89	4702,37	2783,58	1,78
700	0,0833	0,0897	0,1670	0,1290	1154,98	1337,21	4638,44	2767,69	1,77
702	0,0830	0,0897	0,1670	0,1283	1139,24	1329,60	4612,04	2723,58	1,77
704	0,0820	0,0890	0,1657	0,1277	1105,65	1302,47	4512,94	2680,06	1,76
706	0,0823	0,0877	0,1653	0,1267	1108,35	1256,59	4469,37	2623,31	1,76
708	0,0810	0,0877	0,1640	0,1263	1066,69	1249,50	4372,76	2594,80	1,75
710	0,0810	0,0877	0,1637	0,1260	1060,69	1242,47	4330,50	2566,60	1,75
712	0,0807	0,0873	0,1627	0,1253	1046,08	1226,12	4253,75	2525,27	1,74
714	0,0803	0,0863	0,1620	0,1250	1031,64	1191,50	4195,35	2497,80	1,74
716	0,0810	0,0873	0,1623	0,1243	1042,99	1212,46	4189,13	2457,44	1,73
718	0,0807	0,0863	0,1610	0,1240	1028,67	1178,26	4097,67	2430,69	1,73
720	0,0797	0,0863	0,1613	0,1240	997,75	1171,73	4091,83	2417,20	1,72
722	0,0793	0,0850	0,1597	0,1230	983,95	1129,53	3985,55	2365,21	1,72
724	0,0790	0,0853	0,1600	0,1227	970,31	1132,13	3980,13	2339,43	1,71
726	0,0787	0,0853	0,1580	0,1230	956,85	1125,90	3859,90	2339,22	1,71
728	0,0790	0,0843	0,1577	0,1237	959,68	1093,63	3822,54	2351,67	1,70
730	0,0780	0,0843	0,1573	0,1217	930,42	1087,65	3785,56	2263,77	1,70
732	0,0773	0,0837	0,1563	0,1210	909,59	1064,68	3717,20	2226,81	1,69
734	0,0783	0,0847	0,1560	0,1207	928,19	1084,34	3681,22	2202,51	1,69
736	0,0777	0,0843	0,1550	0,1210	907,50	1069,98	3614,45	2202,67	1,68
738	0,0773	0,0833	0,1550	0,1207	894,86	1039,10	3594,89	2178,70	1,68
740	0,0767	0,0830	0,1543	0,1197	874,75	1025,24	3544,79	2131,17	1,68
742	0,0780	0,0827	0,1553	0,1190	900,57	1011,55	3571,55	2096,14	1,67
744	0,0767	0,0820	0,1527	0,1193	865,37	989,96	3431,45	2096,58	1,67
746	0,0760	0,0823	0,1530	0,1187	845,83	992,68	3427,99	2062,12	1,66
748	0,0757	0,0820	0,1530	0,1183	833,95	979,40	3409,69	2039,60	1,66
750	0,0753	0,0823	0,1520	0,1173	822,22	982,12	3347,34	1994,60	1,65
752	0,0757	0,0813	0,1510	0,1170	825,10	953,31	3285,89	1972,74	1,65
754	0,0757	0,0813	0,1510	0,1177	820,73	948,26	3268,48	1984,72	1,64
756	0,0743	0,0810	0,1510	0,1170	787,88	935,54	3251,21	1951,92	1,64
758	0,0747	0,0813	0,1507	0,1167	790,77	938,28	3219,81	1930,59	1,64
760	0,0740	0,0797	0,1493	0,1153	772,63	895,49	3146,45	1876,80	1,63
762	0,0737	0,0807	0,1487	0,1153	761,67	913,30	3102,07	1866,96	1,63
764	0,0733	0,0803	0,1483	0,1143	750,85	901,03	3072,03	1825,13	1,62
766	0,0730	0,0800	0,1477	0,1150	740,16	888,91	3028,60	1836,85	1,62
768	0,0730	0,0797	0,1477	0,1150	736,31	876,93	3012,85	1827,29	1,61
770	0,0730	0,0800	0,1463	0,1140	732,49	879,70	2943,34	1786,33	1,61
772	0,0723	0,0783	0,1467	0,1140	715,45	839,06	2941,46	1777,09	1,61
774	0,0723	0,0783	0,1457	0,1133	711,75	834,73	2886,51	1747,30	1,60
776	0,0720	0,0783	0,1457	0,1130	701,58	830,43	2871,65	1728,10	1,60
778	0,0710	0,0787	0,1447	0,1127	678,72	833,21	2817,81	1709,10	1,59
780	0,0713	0,0787	0,1447	0,1117	681,60	828,95	2803,38	1670,29	1,59
782	0,0717	0,0777	0,1437	0,1123	684,47	803,88	2750,64	1681,66	1,59
784	0,0707	0,0780	0,1443	0,1120	662,11	806,66	2762,08	1663,18	1,58
786	0,0703	0,0780	0,1430	0,1110	652,55	802,56	2697,50	1625,31	1,58
788	0,0707	0,0770	0,1420	0,1097	655,41	778,15	2646,42	1578,45	1,57
790	0,0703	0,0773	0,1423	0,1097	645,96	780,93	2645,41	1570,47	1,57
792	0,0697	0,0770	0,1420	0,1100	630,57	770,31	2619,76	1572,06	1,57
794	0,0697	0,0760	0,1413	0,1097	627,40	746,66	2582,16	1554,69	1,56
796	0,0700	0,0767	0,1407	0,1090	630,24	756,00	2545,02	1528,13	1,56
798	0,0690	0,0757	0,1400	0,1090	609,29	732,72	2508,33	1520,48	1,55

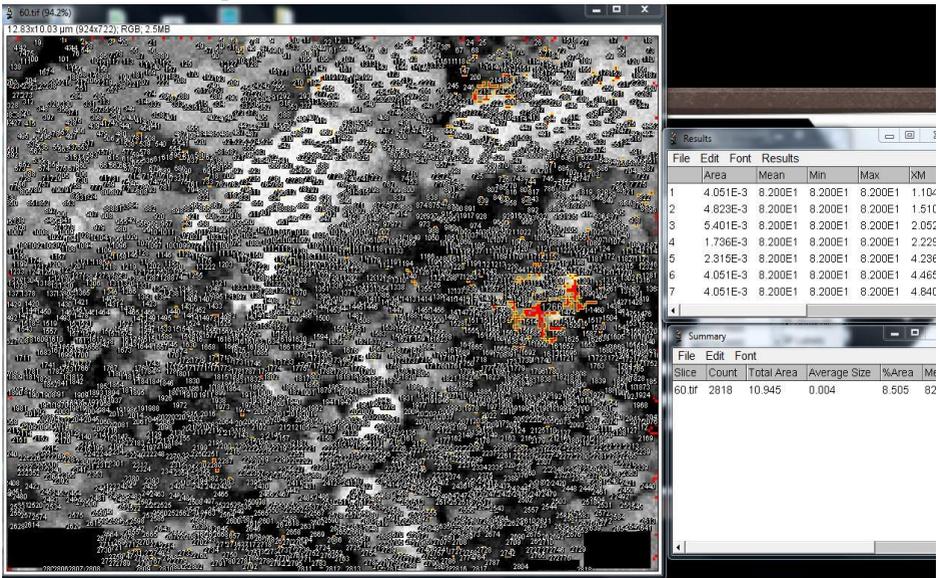
LAMPIRAN E

HASIL ANALISIS *SOFTWARE IMAGEJ*

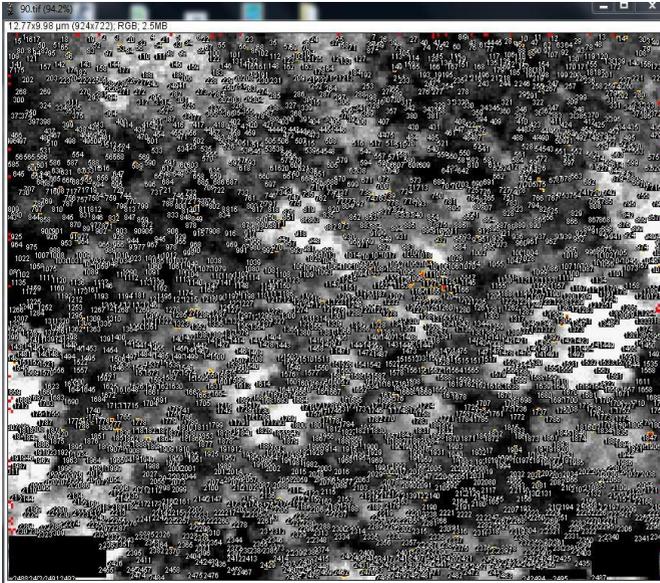
- Au@SiO₂ 30 ml



- Au@SiO₂ 60 ml



• Au@SiO₂ 90 ml



ROI Manager

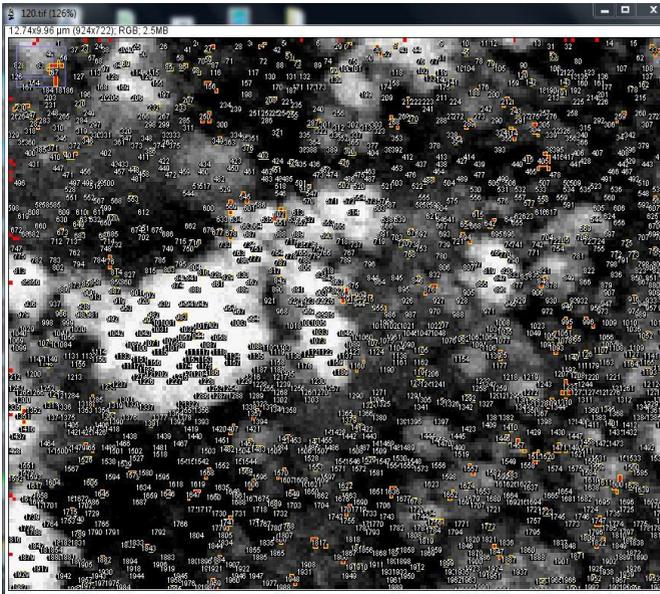
Results

File	Edit	Font	Results		
Area	Mean	Min	Max	Xh	
1	1.720E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	3.1
2	1.720E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	1.4
3	1.720E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	2.7
4	2.294E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	2.4
5	2.294E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	3.0
6	2.294E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	3.7
7	1.720E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	7.3

Summary

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	%
90.tif	2495	8.275	0.003	6.490	8

• Au@SiO₂ 120 ml



ROI Manager

Results

File	Edit	Font	Results		
Area	Mean	Min	Max	XM	
1	1.712E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	7.24
2	2.283E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	2.7
3	1.712E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	3.5
4	5.327E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	3.6
5	1.712E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	4.0
6	1.712E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	4.5
7	4.566E-3	8.200E1	8.200E1	8.200E1	4.9

Summary

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	%
120.tif	2593	8.702	0.003	6.856	8

• Distribusi Ukuran Partikel Emas

Au@SiO ₂ 30 ml		Au@SiO ₂ 60 ml		Au@SiO ₂ 90 ml		Au@SiO ₂ 120 ml	
Ukuran Partikel (nm)	Jumlah Partikel	Ukuran Partikel (nm)	Jumlah Partikel	Ukuran Partikel (nm)	Jumlah Partikel	Ukuran Partikel (nm)	Jumlah Partikel
0,1427	1	0,5787	2	0,5787	2	0,7752	1
0,1902	5	0,7716	1	0,7716	1	1,5500	1
0,4281	253	1,543	2	1,736	299	1,7440	307
0,5707	706	1,736	287	2,315	926	2,3260	948
0,7610	574	2,315	961	3,086	684	3,1010	704
0,9988	104	3,086	744	4,051	67	3,4880	1
1,1410	74	4,051	107	4,63	58	4,0700	84
1,1890	63	4,63	81	4,823	59	4,6510	80
1,3320	192	4,823	69	5,401	183	4,8450	48
1,4270	5	5,401	212	5,787	1	5,4260	172
1,5220	54	5,787	1	6,173	44	5,8140	2
1,5700	26	6,173	52	6,366	14	6,2020	44
1,6170	4	6,366	21	6,944	8	6,3950	11
1,7120	23	6,559	5	7,137	32	6,5890	2
1,7600	68	6,944	24	7,716	31	6,9770	15
1,9020	65	7,137	39	7,909	10	7,1710	27
1,9500	22	7,716	57	8,102	2	7,7520	42
1,9980	2	7,909	11	8,488	19	7,9460	11
2,0930	53	8,488	28	8,681	3	8,1390	1
2,1400	9	8,681	5	8,873	2	8,5270	25
2,1880	6	8,873	4	9,259	3	8,7210	3
2,2830	5	9,259	2	9,452	8	8,9150	3
2,3310	36	9,452	11	10,03	5	9,3020	5
2,3780	2	10,03	14	10,22	7	9,4960	12
2,4730	15	10,22	12	10,42	1	9,6900	2
2,5210	18	10,8	14	10,8	5	10,0800	7
2,6160	1	11	1	11	1	10,2700	4
2,6630	42	11,57	3	11,57	7	10,6600	1
2,7110	7	11,77	3	11,77	2	10,8500	10
2,7590	2	11,96	1	11,96	1	11,0500	1
2,8540	10	12,35	2	12,35	1	11,2400	2
2,9010	16	12,54	11	13,12	1	11,6300	3
2,9490	2	13,12	2	13,31	1	11,8200	2
3,0440	6	13,31	3	13,89	3	12,4000	2
3,0920	28	13,5	1	15,43	1	12,7900	1
3,1390	1	13,89	3	17,94	1	13,1800	2
3,2340	18	14,27	1	23,15	1	13,3700	1
3,2820	13	14,66	1	25,08	1	13,5700	1
3,3290	8	14,85	3			14,1500	1
3,4240	7	15,43	1			14,7300	1
3,4720	10	15,62	2			15,7000	1
3,5200	9	16,2	3			19,3800	1
3,6150	7	16,4	2			19,7700	1
3,6620	16	17,55	1			24,4200	1
3,7100	5	18,71	1				
3,8050	5	20,45	1				
3,8530	6	20,83	1				
3,9000	1	21,03	1				
3,9950	9	24,11	1				
4,0430	6	25,08	1				
4,0900	5	27,01	1				
4,1850	4	28,16	1				
4,2330	9	32,6	1				
4,2810	4	51,5	1				
4,3760	7	71,76	1				
4,4230	9						
4,4710	1						
4,5660	6						

4,6140	6
4,6610	4
4,7560	5
4,8040	4
4,8510	3
4,9460	2
4,9940	7
5,0420	2
5,0890	1
5,1370	1
5,1840	4
5,2320	5
5,2790	2
5,3270	3
5,3750	3
5,4220	3
5,5170	2
5,5650	3
5,7070	1
5,7550	7
5,8030	3
5,8500	1
5,8980	2
5,9450	5
5,9930	2
6,0400	1
6,1360	1
6,1830	2
6,2780	1
6,3260	1
6,3730	1
6,4210	2
6,4680	1
6,5160	3
6,5640	1
6,7060	3
6,8490	1
6,8970	3
6,9440	1
6,9920	1
7,0870	2
7,1340	2
7,1820	1
7,2290	2
7,2770	2
7,3250	6
7,4670	3
7,5150	1
7,7050	1
7,8480	1
7,8950	1
7,9430	3
8,0380	1
8,0860	2
8,1330	1
8,2760	1
8,4190	1
8,4660	1
8,6090	1
8,6560	4
8,7990	1
8,9420	1
9,0370	2
9,0840	2
9,1320	1

9,2270	1
9,4170	2
9,4650	1
9,5600	1
9,6080	2
9,7500	1
9,8450	2
10,0400	2
10,1300	1
10,3200	1
10,5600	1
11,3700	1
11,4600	1
11,5100	1
11,5600	1
11,7500	2
11,8900	1
11,9400	1
12,1800	1
12,2200	1
12,2700	1
12,3200	1
12,3700	1
12,4600	1
12,5100	1
12,6000	2
12,7500	1
13,0300	1
13,2700	1
13,5100	1
13,9800	1
14,2700	2
15,1200	1
15,1700	2
15,6500	1
15,7900	1
16,1700	1
18,0700	1
18,2600	1
18,7400	1
18,7900	1
19,4100	2
19,8300	1
20,3600	1
20,5900	1
20,7800	1
21,8300	1
21,9700	1
26,6300	1
28,2500	1
29,4900	1
30,3000	1
34,2000	1

BIODATA PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap Emha Riyadhul Jinan Alhadi, lahir di Desa Meninting pada tanggal 10 Juli 1996 dan merupakan anak sulung dari 3 bersaudara. Penulis melewati masa kecil tepatnya di Desa Narmada, Kabupaten Lombok Barat dengan menempuh pendidikan di SDN 5 Lembuak lalu SMPN 1 Narmada. Kemudian melanjutkan studi di SMAN 1 Mataram yang kemudian dilanjutkan ke ITS Departemen Teknik Fisika pada tahun 2013 dengan NRP 2413100037. Selama kuliah, penulis telah aktif dalam beberapa organisasi dan kepanitiaan, seperti menjadi staff Student Resource Development di HMTF ITS periode 2014-2015, koordinator Rayon Bali dan Nusa Tenggara di Engineering Physics Week 2015 dan CEO BII-Maybank Scholarship ITS pada periode 2014-2015. Hingga pada tahun 2017 penulis akhirnya melaksanakan Tugas Akhir sebagai syarat untuk menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Fisika dengan judul Fabrikasi Nanopartikel Struktur *Core-shell* Au@SiO₂ dengan SiO₂ Ekstraksi Lumpur Sidoarjo sebagai Fotoanoda untuk Aplikasi DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cells*)". Bagi pembaca yang memiliki saran, kritik, atau ingin berdiskusi lebih lanjut tentang Tugas Akhir ini, maka bisa menghubungi penulis melalui nomor (085337525349) atau email riyadh.goes@gmail.com