



UNIVERSITAS INDONESIA

**Sintesis dan Karakterisasi Nanorod ZnO Hasil Proses Sol Gel dan
Hidrothermal untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna
Organik**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Oscar Hammer Stein

0606075145

Fakultas Teknik

Departemen Metalurgi dan Material

Depok

Desember 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Oscar Hammer Stein

NPM : 06 06 07 5145

Tanda Tangan :

Tanggal : 29 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Oscar Hammer Stein
NPM : 06 06 07 5145
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

Sintesis dan Karakterisasi Nanorod ZnO Hasil Proses Sol Gel dan Hidrothermal untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna Organik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M.Phil.Eng. (.....)
Penguji : Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng. (.....)
Penguji : Nofrijon Sofyan, Ph.D (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya pula saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini ditulis dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini.. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M. Phil. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran, dan dana untuk mengarahkan Saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; serta
3. Sahabat dan seluruh pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 29 Desember 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Oscar Hammer Stein
NPM : 0606075145
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Sintesis dan Karakterisasi Nanorod ZnO Hasil Proses Sol Gel dan
Hidrothermal untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna Organik**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 29 Desember 2009

Yang menyatakan

(Oscar Hammer Stein)

ABSTRAK

Nama : Oscar Hammer Stein
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Sintesis dan Karakterisasi Batang Nano ZnO Hasil Proses Sol Gel dan Hidrothermal untuk Aplikasi Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna Organik**

ZnO berbentuk batang nano dengan ukuran dan bentuk yang cukup seragam dibuat dengan membuat lapisan tipis dari benih nano ZnO sebagai bibit di atas kaca ITO TCO untuk dilakukan proses hidrothermal. Sampel dikarakterisasi dengan scanning electron microscopy (SEM). Benih nano disintesis dengan menggunakan zinc acetate dihydrate, 2-methoxyethanol dan ethanolamine. Larutan yang berisi benih nano di diamkan dalam waktu 2, 4, dan 6 hari, sehingga menghasilkan besar benih nano yang bervariasi dengan ukuran diameter rata-rata yaitu sebesar 82,33; 332,39; dan 1384,78 nm. Besar ukuran benih nano akan menentukan ukuran dan bentuk dari batang nano yang akan terbentuk setelah proses hidrothermal.

Batang nano yang terbentuk dirakit menjadi rangkaian sel surya tersensitasi zat pewarna organik. Sel surya diuji coba untuk mengetahui tegangan terbuka yang dihasilkan dengan perbedaan ukuran batang nano yang berasal dari perbedaan waktu tahan pembuatan benih nano dan menghasilkan tegangan terbuka pada waktu penahanan larutan masing-masing 2, 4, dan 6 hari, yaitu sebesar 341,83; 270,93; dan 256,20 mV pada kondisi cahaya ruang, sedangkan 397,67; 486,03; dan 456,10 mV pada kondisi cahaya yang terfokus.

Kata kunci:

ZnO, perlakuan hidrothermal, waktu tahan, benih nano, batang nano, tegangan terbuka, sel surya tersensitasi zat pewarna organik

ABSTRACT

Name : Oscar Hammer Stein
Study Program : Teknik Metalurgi dan Material
Title : **Synthesis and Characterization of ZnO Nanorod with Sol Gel and Hydrothermal Method for Application of Dye Sensitized Solar Cell**

ZnO nanorod arrays with quite homogeneous size and shape were fabricated by applying ZnO seed-layer as nucleation on the ITO TCO glass to the hydrothermal reaction. The samples were characterized by scanning electron microscopy (SEM). Nanoseed were synthesized by using zinc acetate dihydrate, 2-methoxyethanol and ethanolamine. Solution that contains nanoseed were held 2,4, and 6 days until produced nanoseeds with different size and diameter of nanorod are 82,33; 332,39; dan 1384,78 nm . Nanoseed size determined the shape and size of nanorod that would be formed after the hidrothermal process.

Dye sensitized solar cell were fabricated by using nanorod that were formed before. Dye sensitized solar cell were tested to examine the open circuit voltage that were produced by dye sensitized solar cell with different holding time of nanoseeds and produced open circuit voltage with each holding time of 2, 4, and 6 days, are 341,83; 270,93; and 256,20 mV respectively at room lightning, whereas at focused lightning, DSSC produced 397,67; 486,03; and 456,10 mV.

Key words :

ZnO, hydrothermal process, holding time, nanoseed, nanorod, open circuit voltage, dye sensitized solar cell.

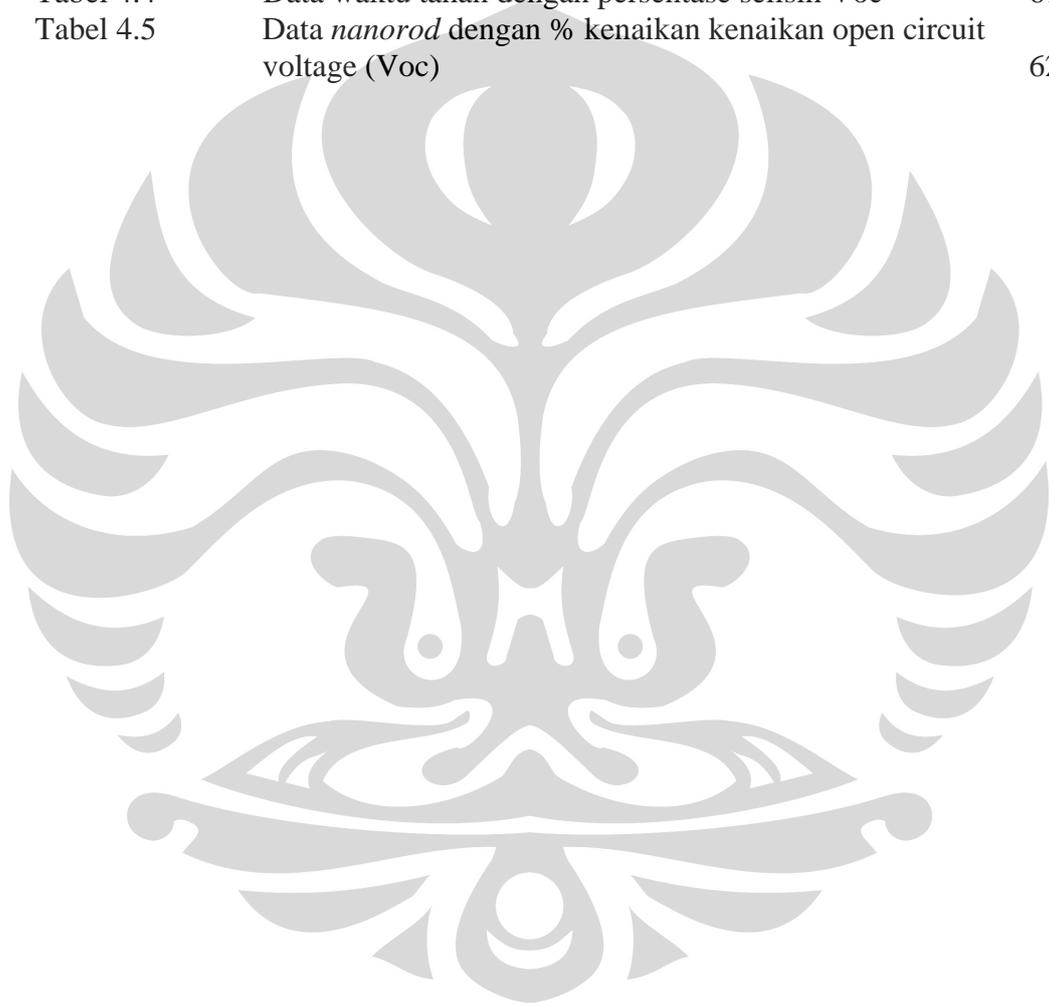
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan penelitian	3
1.4. Batasan penelitian	4
1.5. Sistematika penulisan	4
2. LANDASAN TEORI	5
2.1. Sel surya dan semikonduktor	5
2.2. Mekanisme perubahan energi pada sel surya	7
2.3. Sel surya tersensitasi zat warna (dye sensitized solar cell, DSSC)	12
2.4. Material-material yang digunakan pada DSSC	14
2.4.1. Substrat	14
2.4.2. <i>Sensitizer</i>	15
2.4.3. Semikonduktor DSSC	16
2.4.4. Elektrolit	23
2.5. Proses fotoelektrokimia	24
2.6. Proses sintesis nano partikel ZnO dengan teknik sol-gel	26
2.7. Proses sintesis <i>nanorod</i> ZnO dengan proses hidrothermal	28
3. METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1. Rencana penelitian	31
3.2. Bahan dan peralatan	32
3.2.1. Bahan-bahan	32
3.2.2. Peralatan	32
3.3. Persiapan larutan seeding	33
3.4. Pelapisan kaca konduktif	34
3.5. Sintesis ZnO <i>nanorod</i> dengan hidrothermal	36
3.6. Persiapan larutan elektrolit	39
3.7. Persiapan elektroda lawan	40
3.8. Perakitan DSSC	42
3.9. Pengujian DSSC	44

3.10.Lokasi penelitian	46
4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	47
4.1. Hasil pengamatan visual pengaruh lama waktu tahan terhadap pertumbuhan bibit (<i>seeding</i>) ZnO	47
4.2. Pelapisan kaca konduktif	48
4.3. Proses hidrothermal dengan <i>nanorod</i>	48
4.4. Hasil SEM	49
4.5. Efek waktu tahan terhadap bentuk ZnO <i>nanorod</i>	50
4.5.1. Analisa morfologi ZnO <i>nanorod</i>	53
4.5.2. Analisa ukuran diameter dan distribusi ukuran <i>nanorod</i> ZnO	54
4.6. Hasil pengukuran tegangan terbuka (Voc) DSSC	56
4.6.1. Pengaruh waktu tahan terhadap open circuit voltage (Voc)	59
4.6.2. Pengaruh diameter <i>nanorod</i> terhadap open circuit voltage	61
4.6.3. Pengaruh waktu tahan terhadap persentase kenaikan open circuit voltage (Voc)	63
4.6.4. Pengaruh diameter <i>nanorod</i> terhadap persentase kenaikan open circuit voltage(Voc)	65
5. KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1. Kesimpulan	67
5.2. Saran	68
DAFTAR REFERENSI	69
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Data ukuran <i>nanorod</i> ZnO hasil variasi waktu tahan 2,4, dan 6 hari	51
Tabel 4.2	Data persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata	55
Tabel 4.3	Data hasil pengukuran Voc DSSC pada konsisi sebelum dan sesudah pemfokusan cahaya	59
Tabel 4.4	Data waktu tahan dengan persentase selisih Voc	61
Tabel 4.5	Data <i>nanorod</i> dengan % kenaikan kenaikan open circuit voltage (Voc)	62



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur dari sel surya	5
Gambar 2.2	Proses Czochralski untuk pembuatan silikon monokristalin	8
Gambar 2.3	Proses pelepasan elektron silikon	9
Gambar 2.4	Diagram penggunaan material solar cell pada tahun 2002	10
Gambar 2.5	(a) Skematis pita energi yang langsung dalam semikonduktor (<i>direct band gap semiconductor</i>), dan (b) Skematis pita energi yang tidak langsung dalam semikonduktor (<i>indirect semiconductor</i>).	11
Gambar 2.6	Skema cara kerja foton (energi cahaya) pada DSSC	13
Gambar 2.7	Perwarna sintesis <i>Ruthenium</i> (a) N3, dan (b) N719	16
Gambar 2.8	Pewarna organik P3HT	16
Gambar 2.9	<i>Nanoseed</i> hasil proses pada temperature : (a) 130°C; (b) 300°C; dan (c) 900°C	18
Gambar 2.10	<i>Nanorod</i> hasil proses pada temperature : (a) 130°C; (b) 300°C; dan (c) 900°C	19
Gambar 2.11	<i>Nanoseed</i> dengan waktu tahan(a) 2 hari, (b) 4 hari, dan (c) 6 hari.	20
Gambar 2.12	Spektrum FT-IR dari serbuk <i>nanocrystalline ZnO</i>	21
Gambar 2.13	Skematik dari <i>nanorod</i> ; dimana ketinggian, diameter dari <i>nanorod</i> dan jarak antara <i>nanorod</i> bisa diubah untuk mendapatkan sifat yang paling baik untuk transport elektron dan penyerapan sinar	21
Gambar 2.14	Skematik dari laju alir elektron yang mungkin terjadi di berbagai nanostruktur dari <i>nanorod</i> yang berbeda dengan (a) nanopartikel, (b) <i>nanorod</i> , (c) <i>nanorod</i> bercabang, dan (d) <i>porous single crystal</i>	22
Gambar 2.15	<i>Ballistic effect</i> pada kondisi elektron yang mengalir adalah : (a) kejadian dimana panjang konduktor (L) lebih besar daripada lebar celah (W) (b) kondisi dimana jarak panjang konduktor hampir menyamai lebar celah (W) (c) kondisi dimana $L \ll l$ sehingga tidak terjadi pengabluran yang berarti	23
Gambar 2.16	Struktur fotoelektrokimia ZnO <i>nanorod</i>	25
Gambar 2.17	Proses Redoks pada fotoelektrokimia	26
Gambar 2.18	Skema Hydrothermal	29
Gambar 3.1	Diagram alir rencana penelitian	31
Gambar 3.2	Timbangan digital	33
Gambar 3.3	Magnetic stirrer	33
Gambar 3.4	Flowchart larutan seeding	34
Gambar 3.5	Proses <i>spin coating</i>	35
Gambar 3.6	Mesin <i>spin coating</i>	35
Gambar 3.7	Flowchart pelapisan kaca konduktif	36

Gambar 3.8	Flowchart sistesis <i>nanorod</i> dengan hidrothermal	37
Gambar 3.9	Flowchart Persiapan larutan elektrolit	39
Gambar 3.10	Larutan elektrolit	40
Gambar 3.11	Elektroda lawan	41
Gambar 3.12	Flowchart pembuatan elektroda lawan	42
Gambar 3.13	Warna dye pada kaca konduktif	41
Gambar 3.14	Hasil perakitan DSSC	42
Gambar 3.15	Flowchart perakitan DSSC	43
Gambar 3.16	Pengujian DSSC	44
Gambar 3.17	Flowchart pengujian DSSC	45
Gambar 3.18	Mesin Scanning Electron Microscope <i>LEO 420i</i>	46
Gambar 4.1	<i>Nanorod</i> hasil waktu tahan 2 hari pada permukaan kaca preparat	50
Gambar 4.2	<i>Nanorod</i> waktu tahan 2 hari	51
Gambar 4.3	<i>Nanorod</i> waktu tahan 4 hari	52
Gambar 4.4	<i>Nanorod</i> waktu tahan 6 hari	52
Gambar 4.5	Variasi waktu tahan larutan terhadap diameter <i>nanorod</i>	54
Gambar 4.6	Persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata	55
Gambar 4.7	(a) Rangkaian yang tidak diberi cahaya, (b) Rangkaian yang mengalami <i>short circuit voltage</i> , dan (c) Rangkaian yang mengalami open circuit voltage.	57
Gambar 4.8	Voc terhadap waktu tahan sebelum pemberian cahaya lampu	60
Gambar 4.9	Voc terhadap waktu tahan setelah pemberian cahaya lampu	60
Gambar 4.10	Voc terhadap diameter <i>nanorod</i> sebelum pemberian cahaya lampu terpusat	62
Gambar 4.11	Voc terhadap diameter <i>nanorod</i> setelah pemberian cahaya lampu terpusat	62
Gambar 4.12	Waktu tahan terhadap persentase peningkatan Voc	64
Gambar 4.13	Diameter <i>nanorod</i> terhadap persentase peningkatan Voc	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Foto SEM



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Selama satu dekade, nanomaterial telah menjadi subjek penelitian yang menarik. Material ini sangatlah kecil tetapi memiliki potensi yang luas untuk aplikasi industri, biomedikal, kosmetik, dan elektronik. Tidak dapat disangkal lagi bahwa dengan adanya nanomaterial ini telah memberikan berbagai peningkatan baik di bidang ekonomi, akademis dan lingkungan hidup. Nanomaterial dapat berupa logam, keramik, bahkan untuk sekarang ini dapat dibuat dari bahan polimer untuk dijadikan komposit. Nanomaterial dapat didefinisikan sebagai material dengan ukuran sekitar 1-100 nanometer (nm). Pada ukuran ini, beberapa karakteristik material akan sangat dipengaruhi oleh hukum-hukum fisika atom^[1].

Nanomaterial sebenarnya telah diproduksi dan digunakan oleh manusia selama ratusan tahun yang lalu. Namun, proses sintesisnya masih banyak didominasi oleh kejadian kebetulan yang menguntungkan (*fortunate accident*). Wacana ilmiah mengenai nanomaterial baru mulai mencuat 50 tahun yang lalu ketika Fisikawan *Richard Feynman* menyampaikan di tahun 1959 dalam buku yang berjudul "*There's Plenty of Room at the Bottom*"^[2], dimana ia menyatakan bahwa "tidak ada alasan suatu bahan tidak dapat di manipulasi dari susunan atom-atomnya". Penelitian lanjut nanomaterial terus berlanjut dengan berkembangnya alat instrumentasi yang mampu melihat struktur material hingga level atomik dan molekul, seperti SEM (*scanning elektron microscope*) maupun TEM (*transmission electron microscope*)

Hal yang membuat nanomaterial menarik perhatian dari sisi ilmiah, teknologi dan komersialisasi adalah efek permukaan (*surface*) dan batas antar muka (*interface*) yang sangat intens dibandingkan material ruah (*bulk*). Keunikan inilah yang menjadikan nanomaterial memiliki sifat-sifat unggul.

Sintesis nanomaterial berkembang sangat cepat. Dewasa ini selain nanopartikel dengan bentuk bola, juga diinginkan pula berbagai macam bentuk lainnya seperti *mesoporous*, *nanotube*, *nanorod*, dan sebagainya. Jenis-jenis nanomaterial adalah TiO₂, ZnO, CuInSe₂, CdTe, GaN dan ZnSe.

Seng oksida (ZnO) adalah material yang mempunyai aplikasi yang sangat luas seperti penggunaan untuk plastik, gelas, semen, karet (seperti roda ban), pelumas, cat, perekat, penutup, pewarna, penambah nutrisi pada makanan, baterai, pemadam kebakaran, dan lain sebagainya. ZnO ini mempunyai 3 struktur kristal, yaitu : *hexagonal wurtzite*, *cubic zinblende*, dan *cubic rocksalt*. Biasanya ZnO dikenal sebagai II-VI semikonduktor karena seng dan oksigen berada pada tabel periodik ke 2 dan ke 6^[3]. ZnO ini mempunyai beberapa sifat, seperti mampu tembus yang baik, mobilitas elektron yang tinggi, *bandgap* yang lebar, tahan pada temperatur cukup tinggi, dapat memendarkan cahaya dan sebagainya. ZnO juga mempunyai sifat-sifat lainnya, seperti : *catalytic*, *optoelectronic and piezo electric properties*. Selama ini ZnO telah dipelajari secara luas yang digunakan pada aplikasi *microwave absorber*, *light emitting diodes*, *optical switches*, *solar cells*, *chemical sensors* dan *field effect transistor*. ZnO merupakan salah satu material yang cukup murah dengan lebar celah pita energynya adalah 3,37eV dan mempunyai energi eksitasi dari gap energy 60meV dan mempunyai sifat yang beraneka ragam dalam bentuk 1 dimensi. ZnO dapat dibuat berbagai bentuk, seperti satu dimensi (*rod*, *tube*, *wire*, dan *nail*), dua dimensi (*sheet*, *hexagon*, *tower*, dan *comb*) dan multi-dimensi (*flower*)^[4].

Dari energi sebesar 13 terawatt (TW) ekuivalen yang digunakan manusia, atau 13 triliyun watt, delapan puluh lima persen di antaranya berasal dari bahan bakar fosil^[5]. Penggunaan bahan bakar dari jenis ini bukan tanpa konsekuensi. Bahan bakar fosil, yang berasal dari sisa-sisa makhluk hidup terdahulu, adalah sumber daya yang terbatas. Ini berarti bahwa pada suatu saat kelak, bahan bakar fosil dapat mencapai titik rendah karena ketidaksesuaian pasokan dan permintaan. Keberadaan energi dari bahan bakar fosil yang terbatas di beberapa negara penghasil minyak, gas bumi, dan batu bara menjadikan bahan bakar fosil menjadi komoditas yang rawan. Kerawanan ini misalnya didapati pada kasus penyetopan pasokan gas dari Rusia ke Ukraina pada 2006. Kasus ini terjadi akibat adanya perselisihan seputar pembagian pendapatan antara kedua negara. Nyatanya, dengan adanya perselisihan ini, pasokan gas ke sebagian Eropa menjadi terhambat.^[6]

Maka dari itu pentingnya sumber energi yang terbarukan seperti hidro, geotermal, angin dan cahaya matahari menjadi penting. Dan pada awal dekade 1990-an, Prof. Michael Grätzel *et al*^[7] menemukan metode lain dari metode mengubah sinar matahari menjadi listrik yang sudah ada. Metode baru ini meniru proses fotosintesis pada tanaman. Fenomena fotosintesis ini ditiru dengan mempergunakan bahan semikonduktor yang disensitisasi oleh bahan pewarna (*dye*), sehingga teknologi ini disebut sebagai *dye-sensitised solar cell* (DSSC). Dan salah satunya adalah dengan menggunakan nanomaterial ZnO, karena mempunyai kelebihan sebagai semikonduktor *direct bandgap*, sehingga memiliki absorpsi sinar UV yang sangatlah baik, lalu apabila ZnO dibentuk menjadi nanotube dan nanorod dapat menyebabkan terjadinya efek balistik yang akan meningkatkan kemampuan dari sel surya. Oleh sebab itu, kemudian dirasakan pentingnya penelitian yang bertujuan untuk mampu mensintesis ZnO nanorod yang dapat digunakan untuk aplikasi sel surya.

1.2 Perumusan masalah

Bahan semikonduktor yang akan dipergunakan untuk aplikasi sel surya dalam riset ini adalah ZnO nanorod. Kesulitan utama yang ditemui adalah mensintesis *nanorod* dengan teknik hidrothermal dengan peralatan atau fasilitas yang ada di Departemen Metalurgi dan Material. Penggunaan nanorod di dalam sel surya yang sudah di rakit menjadi DSSC adalah sebagai penghantar elektron yang dihasilkan dari penyerapan energi foton cahaya yang diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan peralatan uji yang terbatas.

1.3 Tujuan penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mensintesis ZnO nanorod dengan teknik kimiawi basah sol-gel dengan menggunakan fasilitas yang tersedia di Laboratorium Material Lanjut, Departemen Metalurgi dan Material FTUI,
2. Mengetahui pengaruh variasi besar pembibitan terhadap pertumbuhan ZnO nanorod,
3. Mengintegrasikan ZnO nanorod ke prototipe solar sel DSSC.

4. Menganalisis pengaruh nanostruktur ZnO terhadap kinerja dari DSSC yang dihasilkan.

1.4 Batasan penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan semikonduktor ZnO yang dibuat dengan metode sol-gel dan hidrothermal. Pada penelitian ini akan diteliti pengaruh lamanya waktu tahan pembibitan terhadap pertumbuhan nanorod ZnO dan pengaruhnya terhadap kinerja DSSC yang dihasilkan.

Lalu proses sintesis dan karakterisasi dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

1.5 Sistematika penulisan

Skripsi ini terbagi atas lima bab:

Bab 1 (Pendahuluan) :

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian, sistematika penulisan, dan manfaat dari penulisan skripsi ini.

Bab 2 (Landasan Teori) :

Berisi atas teori penunjang yang akan mendukung hipotesis awal penelitian mengenai DSSC ini. Pada bab ini dibahas beberapa hal mengenai sel surya, dan juga prinsip dasar dari DSSC.

Bab 3 (Metodelogi Penelitian) :

Bab ini akan dibahas seluk beluk penelitian DSSC ini, mengenai persiapan bahan-bahan dan alat-alat, teknik penyiapan sampel, hingga cara pengambilan data.

Bab 4 (Hasil Penelitian dan Pembahasan) :

Berisi hasil-hasil pengujian-pengujian yang telah dilakukan.

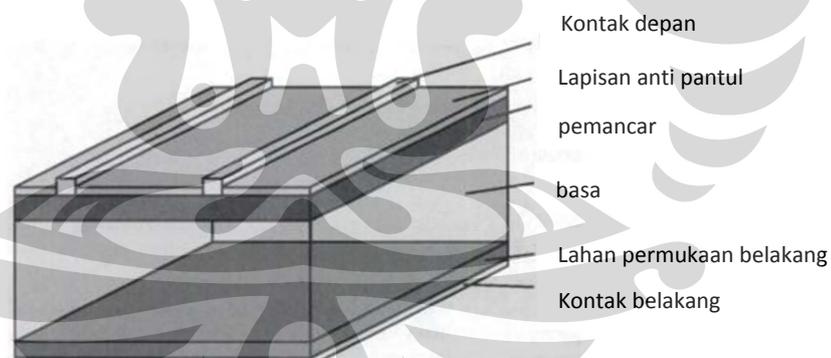
Bab 5 (Kesimpulan dan Saran) :

Berisi hasil dan kesimpulan dari hasil yang didapatkan dan saran

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Sel Surya dan semikonduktor

Sel surya (*solar cell*) adalah suatu alat yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik dengan mengikuti prinsip fotovoltaik (*photovoltaics, PV*). Efek ini pertama kali di pelajari oleh Hendri Becquerel tahun 1839. Efek ini timbul terutama pada material semikonduktor listrik sebagai penghantar listrik yang memiliki konduktivitas menengah ($10^{-4} > \sigma > 10^{-8} \text{ } (\Omega\text{cm})^{[7]}$). Hal ini dikarenakan sifat elektron di dalam material yang terpisah dalam pita-pita energi tertentu yang disebut pita konduksi dan pita valensi. Semikonduktor ini dapat menyerap spektrum cahaya dalam jumlah yang relatif banyak. Banyaknya cahaya yang diserap bergantung pada sifat dari material itu sendiri dimana cahaya yang diserap kurang lebih yang dekat dengan permukaan. Sebuah ilustrasi yang memperlihatkan sebuah susunan sel surya dapat dilihat seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Struktur dari sel surya.

Celah antara sisi positif dan negatif (*p-n junction*) dipisahkan oleh pemancar (*emmitter*) dan lapisan basa yang sangat dekat dengan permukaan. Hal ini diperlukan agar celah tersebut mempunyai hambatan yang kecil yang digunakan untuk mengalirkan elektron. Tapi pada prakteknya sel surya dikemas sebagai suatu wadah yang mengandung kristal silikon (Si) yang terhubung secara *series* atau berupa lapisan material film tipis. Hal ini dilakukan agar dapat

melindungi sel surya dari kejenuhan dan mengirimkan elektron lebih cepat daripada sel tunggal yang mana hanya menghasilkan tegangan kurang dari 1 volt. Efisiensi yang berhasil didapatkan untuk kristal silikon saat ini hanya 24,7%^[7].

Semi konduktor adalah suatu material yang memiliki elektron pada setidaknya dua pita energi yang terpisah oleh suatu pita tanpa keberadaan elektron (*band gap*). Kedua pita energi tersebut berturut-turut dari yang berenergi lebih rendah adalah pita valensi (pada semikonduktor terisi hampir penuh) dan pita konduksi (pada semikonduktor hampir kosong), sedangkan keadaan tanpa elektron –karena tidak ada energi yang dimungkinkan – disebut celah pita (*band gap*).

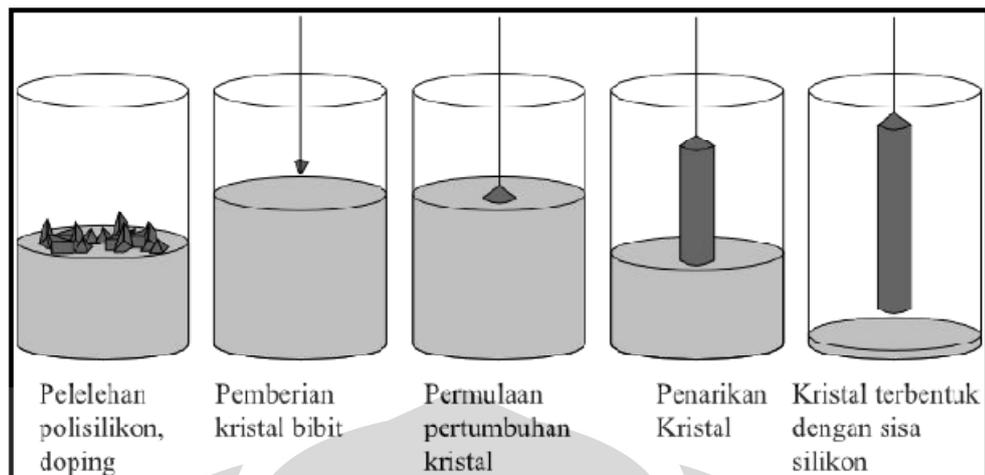
Celah pita ini besarnya berbeda-beda untuk setiap material semikonduktor, tetapi disyaratkan tidak melebihi 3 atau 4 eV ($3 \times 1.602 \times 10^{-19}$, atau $4 \times 1.602 \times 10^{-19}$ J) yang merupakan batas bawah material yang disebut isolator listrik. Keberadaan celah pita memberikan material semikonduktor sifat yang unik. Pada material konduktor listrik murni, konduktivitas akan menurun pada suhu yang semakin tinggi, sementara hal yang sebaliknya dijumpai pada semikonduktor – konduktivitasnya meningkat^[7]. Hal ini mungkin dapat dijelaskan bahwa elektron pada pita valensinya dapat berpindah ke pita konduksi apabila mendapatkan energi yang menyamai atau melampaui energi celah pita (*bandgap energy*, E_g) material tersebut. Energi yang dapat memindahkan, atau lebih sering disebut pengeksitasi, elektron tersebut dapat berasal dari sumber seperti gelombang panas dan gelombang elektromagnetik lainnya. Sifat ini dimanfaatkan pada sel surya yang berbahan dasar semikonduktor. Matahari memancarkan energi hasil fusi intinya sebagai gelombang elektromagnetik pada berbagai spektra. Gelombang tersebut mencapai bumi, terutama pada spektra gelombang ultraviolet (UV), cahaya tampak, dan inframerah (*infrared*, IR).

Lapisan atmosfer menahan sebagian spektrum UV dan meneruskan sebagian lainnya beserta spektra cahaya tampak dan IR ke permukaan bumi. Apabila gelombang elektromagnetik tersebut 'ditangkap' oleh material semikonduktor pada suatu sel surya, maka energi listrik yang diubah langsung dari energi cahaya matahari dapat dihasilkan.

Material semikonduktor harus disusun sedemikian sehingga memiliki setidaknya kutub positif dan negatif seperti layaknya baterai. Adanya kutub ini dapat dicapai dengan semikonduktor tipe-P (P untuk positif) dan N (N untuk negatif). Semikonduktor jenis ini biasanya diberikan perlakuan berupa *doping* dengan unsur tertentu untuk menghasilkan kelebihan atau kekurangan elektron. Hal ini dapat ditemukan pada semikonduktor silikon. Silikon, yang berada pada golongan IV A pada tabel sistem periodik unsur, memiliki empat elektron valensi (elektron yang menempati pita valensi) untuk membentuk ikatan pada struktur kristal. Penambahan fosfor (P), unsur golongan V A, yang memiliki lima elektron valensi akan menjadikan kristal seolah kelebihan elektron. Semikonduktor jenis ini disebut sebagai semikonduktor tipe-n. Proses yang serupa juga dimungkinkan dengan penambahan unsur silikon (Si) yang membuat semikonduktor seolah kekurangan elektron akan membuat semikonduktor tipe-p. Dua jenis semikonduktor ini, apabila dikombinasikan dengan teknik yang tepat – disebut sambungan p-n (*p-n junction*) – dapat membuat listrik mengalir antara kedua 'kutub'. Hal ini dimanfaatkan untuk menghasilkan tenaga listrik yang mendapat sumber energi untuk diubah dari matahari.

2.2 Mekanisme perubahan energi pada sel surya

Teknologi sel surya sebenarnya adalah pengembangan dari teknologi transistor yang mempunyai standar silikon yang tinggi yang kemudian berkembang menjadi IC (*integrated circuits*) dengan menggunakan mekanisme silikon yang *single crystal*. Pada tahun 1916, Jan Czochralski menemukan metode yang membuat material *single crystal* silikon yang kemudian digunakan untuk sel surya. Skema proses Czochralski dapat dilihat pada Gambar 2.2



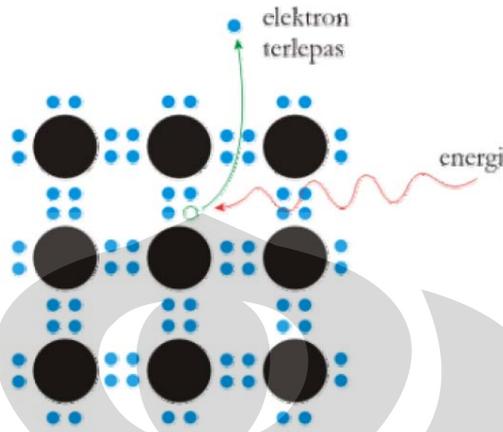
Gambar 2.2 Proses Czochralski untuk pembuatan silikon monokristalin^[8].

Silikon dengan tingkat kemurnian yang sangat tinggi dilelehkan di dalam suatu wadah yang biasanya terbuat dari kuarsa. Lalu beberapa atom *impurity* seperti Boron atau fosfor dapat ditambahkan ke lelehan silikon dalam jumlah tertentu yang bertujuan untuk mendoping silikon, yang kemudian merubahnya menjadi silikon tipe-n maupun tipe-p^[9].

Selain dengan silikon terdapat material sel surya yang berpotensi mengisi kebutuhan dari penyerapan cahaya dengan intensitas yang tinggi dan cocok untuk dijadikan sebagai lapisan film tipis dari sel surya, yaitu bahan semikonduktor yang berada pada periode III-V dalam tabel periodik, terutama pada kelompok II-VI dan I-III-VI₂ yang mempunyai 4 elektron bebas pada atom tersebut. Namun, yang menjadi permasalahan adalah rendahnya efisiensi dan kestabilan yang kurang sehingga menghambat penetrasi dari material ini.

Susunan sebuah sel surya, sama dengan sebuah dioda, terdiri dari dua lapisan yang dinamakan sambungan P-N (*p-n junction*). PN junction itu diperoleh dengan jalan membuat sebatang bahan semikonduktor silikon murni (bervalensi 4) yang impuriti sehingga bervalensi 3 pada bagian kiri dan akan bertambah di bagian kanan (bervalensi 5). Sehingga pada bagian kiri terbentuk silikon yang kekurangan elektron yang sebut silikon jenis P, sedangkan sebelah kanan yang kelebihan elektron dinamakan silikon jenis N. Di dalam silikon murni terdapat dua macam pembawa muatan listrik yang seimbang. Pembawa muatan listrik

yang positif dinamakan hole, sedangkan yang negatif dinamakan elektron. Di dalam silikon jenis N terbentuk elektron dalam jumlah yang sangat besar dibandingkan dengan hole nya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Proses pelepasan elektron silikon^[11].

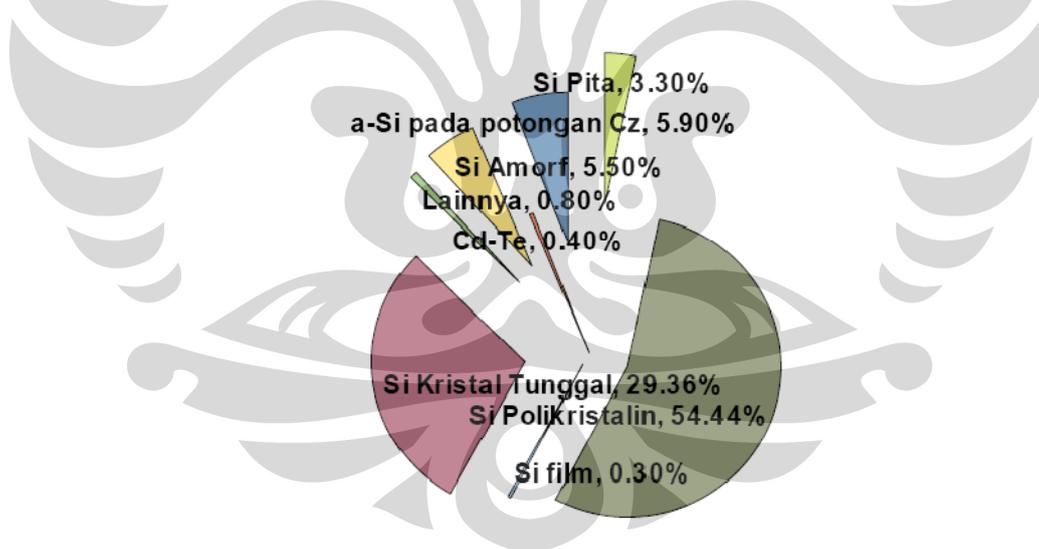
Di dalam batang silikon itu terjadi pertemuan antara bagian P dengan bagian N. Oleh karena itu dinamakan *p-n junction*. Dan apabila bagian P dihubungkan dengan kutub negatif dari sebuah baterai dan positifnya dihubungkan dengan bagian N, maka dengan keadaan seperti ini, maka hole (pembawa muatan positif) dapat terhubung dengan kutub positif, sedangkan elektron juga langsung ke kutub positif. Jadi jelas, di dalam *p-n junction* tidak terdapat gerakan elektron. Jadi elektron di bagian P akan berusaha untuk mencapai kutub positif baterai, demikian pula sebaliknya. Hal ini dinamakan sebagai *leakage current* atau *reverse saturation current*.

Tetapi ada yang menarik, ternyata bila suhu *p-n junction* dinaikkan ternyata dapat memperbesar *leakage current* yang terjadi. Karena itu, apabila ada cahaya yang dikenakan kepada *p-n junction* dapat menghasilkan energi yang cukup menghasilkan suatu muatan. Gejala ini disebut sebagai fotokonduktif. Sehingga didapatkan kesimpulan bahwa dengan memperbesar intensitas cahaya yang menimpa fotodiode, dapat meningkatkan *leakage current*. Bila baterai itu diganti dengan suatu tahanan (*resistor*), maka pemberian cahaya itu dapat menimbulkan pembawa muatan baik di hole maupun di elektron. Jika intensitas

cahaya itu ditingkatkan, ternyata arus yang timbul juga semakin besar. Hal ini disebut sebagai *photovoltaic*^[10].

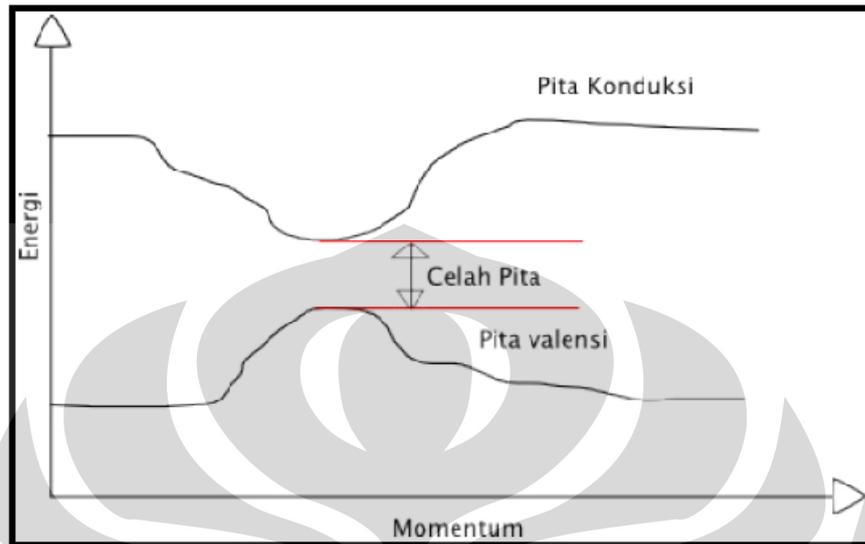
Dengan semakin berkembangnya teknologi dan munculnya material *single crystal* dapat sedikit mengatasi masalah tersebut. Sehingga, pembuatan sel surya dengan bahan silikon masih menjadi pilihan utama. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4 tentang penggunaan material sel surya pada tahun 2002^[12].

Perkembangan tersebut, juga merujuk pada material yang digunakan untuk membuat sel surya ini. Untuk sekarang ini, berbagai material digunakan sebagai bahan dasar pembuatan sel surya. Salah satunya adalah material ZnO. Material jenis ini mempunyai kondisi dimana ketika pita konduksi dan pita valensi saling ‘berhadapan’ pada ruang momentum kristal yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (b) , dibandingkan dengan material TiO₂ yang di mana pita konduksi dan pita valensi tidak saling ‘berhadapan’ pada ruang momentum kristal seperti yang terdapat pada Gambar 2.5 (a) .

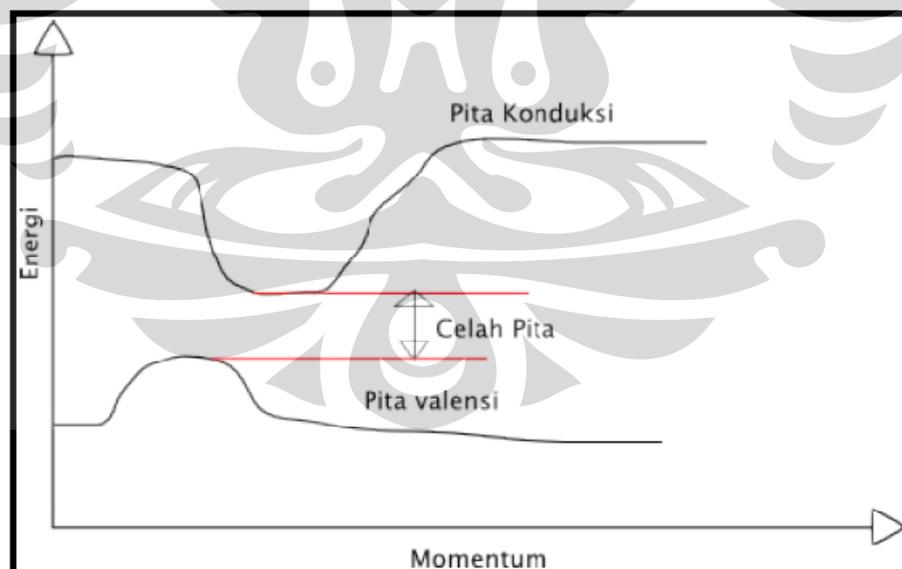


Gambar 2.4 Diagram penggunaan material sel surya pada tahun 2002.

Perbandingan kedua semikonduktor ini diilustrasikan pada Gambar 2.5 (a) dan (b).



Gambar 2.5 (a) Skematis pita energi yang langsung dalam semikonduktor (*direct band gap semiconductor*).



Gambar 2.5 (b) Skematis pita energi yang tidak langsung dalam semikonduktor (*indirect semiconductor*).

2.3 Sel surya tersensitasi zat warna (*Dye Sensitized Solar Cell, DSSC*)

Semikonduktor semacam ini memiliki koefisien serapan yang rendah untuk foton yang berada dekat tepi pita energi. Keadaan ini mensyaratkan ketebalan yang cukup besar agar spectrum matahari yang panjang agar dapat diserap.

Pada praktiknya, pembuatan sel surya jenis silikon membutuhkan biaya yang cukup besar. Maka berbagai konsep baru perubahan energy cahaya matahari menjadi listrik telah diajukan, diantaranya adalah teknologi sel surya tersensitisasi perwarna (*dye sensitized solar cell, DSSC*). Teknologi ini ditemukan oleh Michael Grätzel dari Swiss^[13].

Adapun kelebihan dari *DSSC* dibandingkan dengan sel silikon adalah^[14]

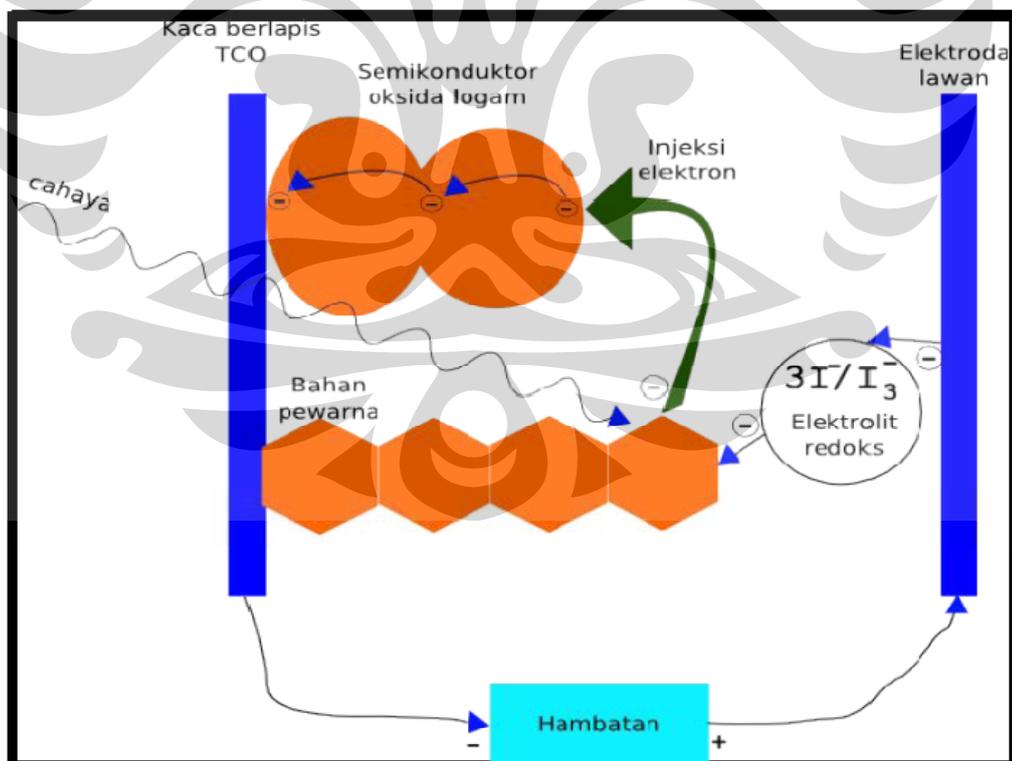
- Biaya yang rendah dan mudah diproduksi
- Kemampuan meningkat seiring meningkatnya temperatur
- Konfigurasi bifacial (kelebihan dalam mendifusikan cahaya) karena terdapat lapisan platina (Pt) pada kaca TCO yang akan memantulkan kembali cahaya.
- Transparan untuk *power windows*
- Variasi warna dengan pemilihan tipe *dye*
- Pembuatan yang ramah lingkungan

Pada sel surya anorganik yang telah lebih dulu ada, energi yang diterima (foton) mengeksitasi (mengusir elektron dari pita valensi) elektron dan meninggalkan 'lubang' (*hole*). Namun pada *DSSC* proses ini tidak terjadi.

DSSC, berdasarkan material penyusunnya, dapat dikategorikan sebagai sel surya hibrida organik-anorganik. Dikatakan demikian karena penyusun utama *DSSC* adalah semikonduktor (anorganik) yang disensitasi oleh bahan pewarna (organik) yang tersusun atas sepasang elektroda dan *counter* elektroda yang terbuat dari substrat kaca konduktif, yang telah dilapisi oleh *transparent conductive oxide* (TCO). Dimana elektoda terlapisi oleh lapisan oksida *nanoseed* maupun *nanorod* yang berfungsi sebagai penghantar elektroda yang dihasilkan

oleh molekul zat pewarna (*dye*) yang tersensitasi. Sedangkan pada *counter* elektroda dilapisi oleh karbon atau platinum yang berfungsi untuk terjadinya proses reduksi larutan elektrolit pada kaca *counter* elektroda.^[15]

Selain itu, cara pengubahan energy cahaya (foton) menjadi energy listrik pada DSSC tidaklah sama dengan pengubahan foton menjadi listrik pada sel surya anorganik. Pada DSSC, foton akan diserap oleh lapisan pewarna dan membentuk eksiton (sebuah keadaan pasangan elektron-lubang yang terikat) yang akan dipisahkan pada *interface* lapisan penerima elektron (akseptor) berupa semikonduktor oksida logam dan pewarna menjadi elektron dan *hole* dengan demikian muatan listrik dihasilkan. Meskipun demikian, tidak hanya DSSC saja yang mempunyai prinsip kerja dengan cara tersebut, melainkan sel surya organik-hibrida juga menggunakan cara tersebut. Prinsip kerja eksitasi eksiton ini mejadi dasar dari pembuatan sel surya eksitonik (*excitonic* sel surya, XSC), dimana sudah termasuk DSSC dan sel surya organik-hibrida^[16]. Dan mekanisme kerja dari DSSC dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Skema cara kerja foton (energi cahaya) pada DSSC.

Namun, pada umumnya secara termodinamika, efisiensi pengubahan foton menjadi listrik dari DSSC umumnya tidak akan melebihi efisiensi 10%^[17]. Hal ini disebabkan oleh material yang diperlukan untuk pembuatan DSSC ini tidak membutuhkan kemurnian setinggi sel surya anorganik, dan energi yang diperlukan untuk membuat bahan semikonduktor untuk membuat sel surya tersebut pun tidak sebesar membuat sel surya anorganik. Maka dari itu, untuk membuat DSSC ini dapat dilakukan di laboratorium sendiri dengan menggunakan material yang tersedia secara luas di pasaran.

2.4 Material-material yang digunakan pada DSSC

Material yang dipergunakan untuk membuat sebuah DSSC secara garis besar dapat dibagi menjadi empat bagian, yaitu : substrat, *sensitizer*, semikonduktor DSSC, dan elektrolit.

2.4.1 Substrat

Sel surya jenis DSSC ini juga masih memerlukan tempat untuk melekatnya material-material DSSC yang disebut sebagai substrat. Substrat yang digunakan pada umumnya adalah kaca yang diberi perlakuan tertentu agar dapat menghantarkan listrik. Perlakuan ini biasanya berupa pelapisan dengan oksida konduktif transparan (*transparent conducting oxide*, TCO). Oksida yang umum digunakan antara lain *aluminium-doped zinc oxide* (AZO), *fluorine-doped tin oxide* (FTO), *indium-doped tin oxide* (ITO), dan *antimony-doped tin oxide* (ATO). Kaca yang sudah dilapisi TCO memiliki hambatan jenis yang rendah pada sisi yang dilapisi – dapat mencapai ratusan Ω/cm atau lebih rendah^[18]. Untuk mendapatkan kaca sedemikian, dapat dilakukan pelapisan dengan berbagai metode. Metode-metode yang umum digunakan antara lain adalah metode *sputtering*, *vacuum evaporation*, *dip coating*, *sol-gel* dan *spray pyrolysis*.

Keunggulan dari kaca yang diperlakukan sedemikian adalah sifatnya yang, meskipun konduktif secara elektrik, dapat ditembus cahaya. Sifat ini penting karena tanpa cahaya yang mengenai penyerap cahaya, foton tidak akan

mengeksitasi eksiton pada lapisan penyerap cahaya. Tanpa adanya eksiton yang tereksitasi, tidak akan terjadi pemisahan eksiton yang berarti tidak akan dihasilkan muatan listrik. Sifat penghantar listrik dari kaca kemudian dipergunakan untuk menghantarkan elektron, dan secara keseluruhan listrik, menuju sirkuit dan kembali ke sel surya. Khusus mengenai kembalinya elektron ke sel surya, kaca konduktif yang memegang peran ini disebut juga sebagai elektroda lawan (*counter electrode*), dan peningkatan efektivitas dengan pelapisan platina atau karbon, umumnya lebih digunakan karbon karena harga yang relatif rendah.

2.4.2 Sensitizer

Sensitizer adalah material yang memberikan pengaruh sensitasi semikonduktor terhadap cahaya. Sensitizer pada *DSSC* juga berperan sebagai lapisan penyerap electron foton cahaya dan akan tereksitasi menjadi eksiton. Dalam proses penyinaran, pewarna akan bertugas 'menyuntikkan' elektron ke pita konduksi dari semikonduktor. *Sensitiser* yang paling efisien adalah dari kelompok pewarna kompleks organo-rutenium. Berikut ini adalah contoh dari *dye* sintetis untuk ZnO *nanorod* berbasis Ruthenium^[19] (Ru).

- N3

N3 sebenarnya adalah *Ruthenium 535* yang sangat efektif apabila digunakan untuk lebar celah band gap dengan panjang gelombang sampai 750 nm. Rumus kimia zat ini adalah :

cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II)

yang mempunyai struktur kimia yang ditunjukkan pada Gambar 2.7(a)

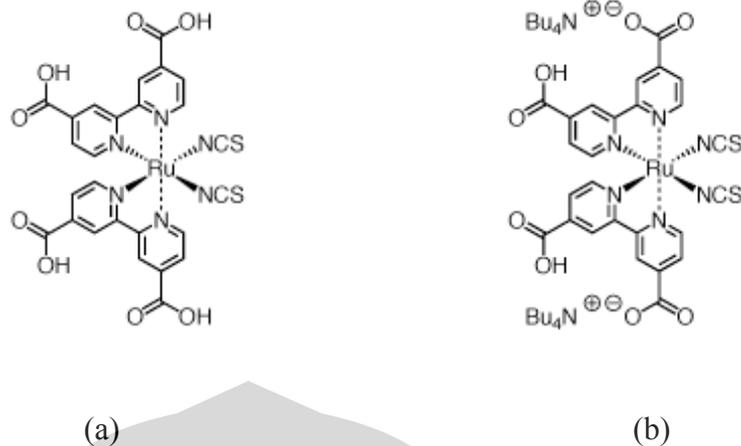
- N719

N719 adalah *Ruthenium 535-bisTBA* yang sangat efektif apabila digunakan untuk celah *bandgap* dengan panjang gelombang sampai 750 nm. Keistimewaan dari N719 adalah sifatnya yang *hygroscopic* yang akan melindungi sel surya walaupun digunakan dalam kondisi yang lembab. Rumus kimia dari sensitizer ini adalah :

cis-diisothiocyanato-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II)

bis(tetrabutylammonium)

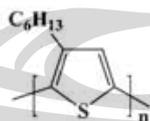
yang mempunyai struktur kimia yang ditunjukkan pada Gambar 2.7(b)



Gambar 2.7 Perwarna sintesis *Ruthenium* (a) N3, dan (b) N719^[20].

Meskipun demikian, pewarna jenis ini sangat sulit disintesis dan mahal. Pewarna lain dari bahan-bahan alami (organik) dapat pula menjadi *sensitiser* pada DSSC.

Namun, bahan pewarna yang diisolasi dari bahan organik ini dapat juga memberikan efek sensitisasi yang serupa, meskipun pengubahan energi dengan pewarna tersebut lebih kecil daripada pewarna sintetik^[18]. Berikut ini adalah contoh dari pewarna organik alami : P3HT - Poly (3-Hexylthiophene)^[21], yang mempunyai struktur kimia ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Pewarna organik P3HT^[22].

2.4.3 Semikonduktor DSSC

Walaupun TiO_2 diketahui sebagai oksida semikonduktor paling baik, tetapi ZnO sekarang ini banyak diteliti karena kesamaan sifatnya dengan TiO_2 dan juga memiliki *wide band gap* sebesar 3,37eV dengan posisi pita valensi tepat berada di bawah pita konduksi (Gambar 2.5 (a)). Hal ini berbeda dengan TiO_2 , dimana pita valensi tidak tepat berada di bawah pita konduksi (gambar 2.5 (b)).

Selain itu, telah dibuktikan bahwa mobilitas elektron ZnO lebih tinggi daripada TiO₂^[23,24]. Keuntungan yang paling penting dari ZnO dibandingkan dengan TiO₂ adalah ZnO dapat disintesis dengan menggunakan berbagai teknis sintesis sehingga bisa didapatkan berbagai variasi bentuk morfologi dan nanostuktur yang berbeda, terutama nanostruktur yang sangat vertikal.

Dengan adanya berbagai metode yang dapat digunakan untuk merekeyasa ZnO, sehingga memungkinkan untuk membuat sel surya lebih murah dalam proses teknik pembuatannya.^[25] Dan sangat penting untuk mengendalikan beberapa faktor yang menyebabkan efisiensi penggunaan material ZnO pada DSSC seperti konsentrasi *dye*, pH atau waktu sensitasi

Sekarang ini banyak sekali metode yang mungkin dapat digunakan untuk membuat nanomaterial ZnO dan juga sifatnya yang bergantung pada kondisi dari preparasi. Namun cukuplah sulit untuk membuat metodologi yang optimal untuk aplikasi sel surya karena tidak hanya bergantung pada nanostuktur ZnO, seperti ketebalan dari film, dimensi dari nanostruktur ataupun luas permukaan, tetapi juga dipengaruhi oleh preparasi secara keseluruhan seperti penggunaan *dye*, dan luas area aktif.

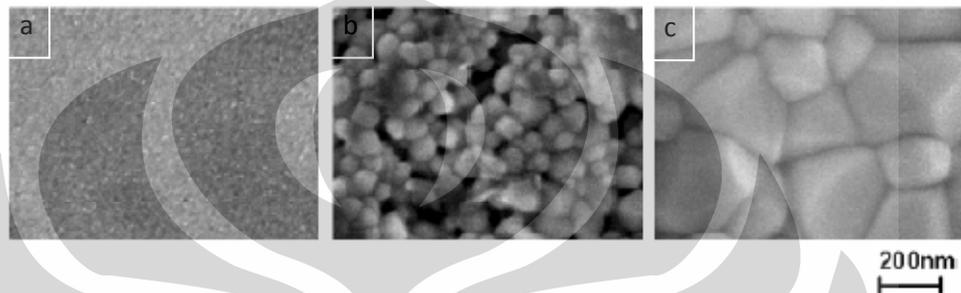
Untuk saat ini, metode yang paling menarik perhatian dalam membuat atau mensintesis nanostuktur ZnO untuk aplikasi sel surya adalah metode *hydrothermal* (HT). Selain dari metode *hydrothermal* masih terdapat berbagai metode untuk membuat nanostuktur ZnO seperti *high-temperature vapor-phase deposition techniques (physical and chemical vapor-phase deposition)*, *metal organic vapor deposition (MOCVD)*, *chemical vapor deposition (CVD)*, *atomic layer deposition (ALD)*, dan masih banyak yang lainnya.

Kunci dari tingginya efisiensi ketika diaplikasikan dari material *single crystal* bergantung pada jarak optimal antara ZnO dan *dye*. Maka dari itu, tidaklah terlalu sulit untuk menyadari bahwa untuk menyelesaikan masalah ataupun hambatan yang timbul dan untuk mendapatkan kemampuan maksimum dari DSSC.

Untuk membuat nanostruktur dengan cara hidrotermal, pertama dengan membuat pembibitan “*seeding*” yang berfungsi sebagai tempat *nanorod* tumbuh. Besar pembibitan juga akan menentukan seberapa besar *nanorod* itu akan tumbuh. Sedangkan besarnya pembibitan bergantung pada 2 faktor :

- Temperatur annealing

Temperatur annealing akan mempengaruhi besar dari *nanoseed* yang terbentuk, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.

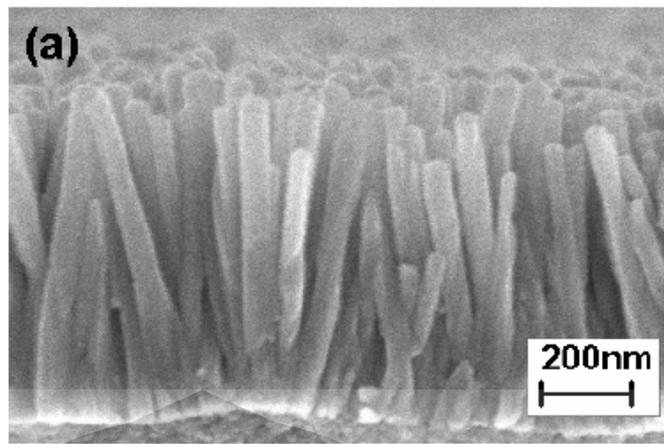


Gambar 2.9 *Nanoseed* hasil proses pada temperatur :

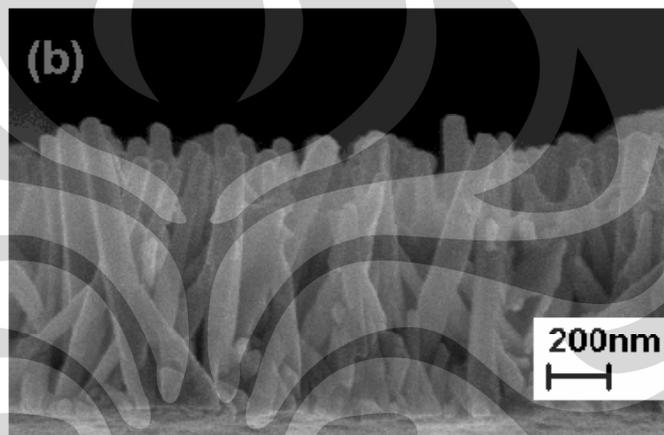
(a) 130°C; (b) 300°C; dan (c) 900°C^[35,36].

Pada Gambar 2.9 terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur anneal akan membuat partikel *nanoseed* menjadi lebih besar yang ditunjukkan dengan meningkatnya temperatur dari 130, 300, dan 900°C menjadi lebih besar sehingga masing-masing waktu annealing juga akan menghasilkan besar *nanorod* yang bervariasi pula yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10.

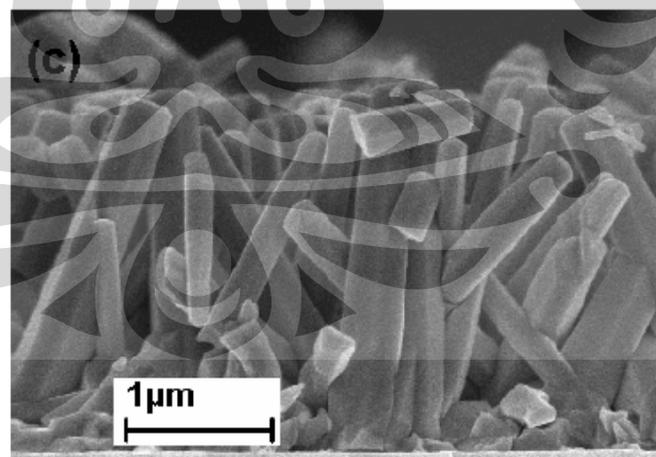
Pada Gambar 2.10 dapat pula dilihat bahwa dengan meningkatnya temperatur annealing akan membuat diameter dan tinggi dari *nanorod* menjadi semakin besar dari temperatur 130, 300, dan 900°C



(a)



(b)



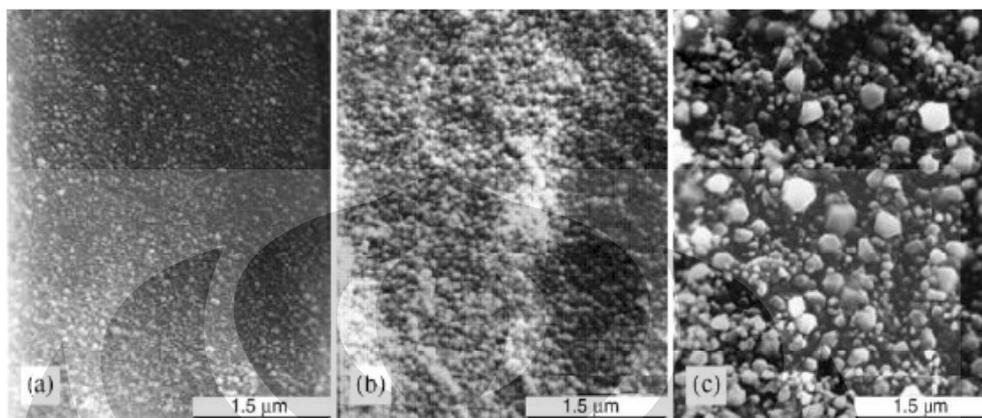
(c)

Gambar 2.10 Nanorod hasil proses pada temperatur :

(a) 130°C; (b). 300°C; dan (c) 900°C.

- Waktu tahan larutan

Waktu tahan larutan juga akan mempengaruhi besar dari *nanoseed* yang akan terbentuk, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2.11. *Nanoseed* dengan waktu tahan^[37-39] :

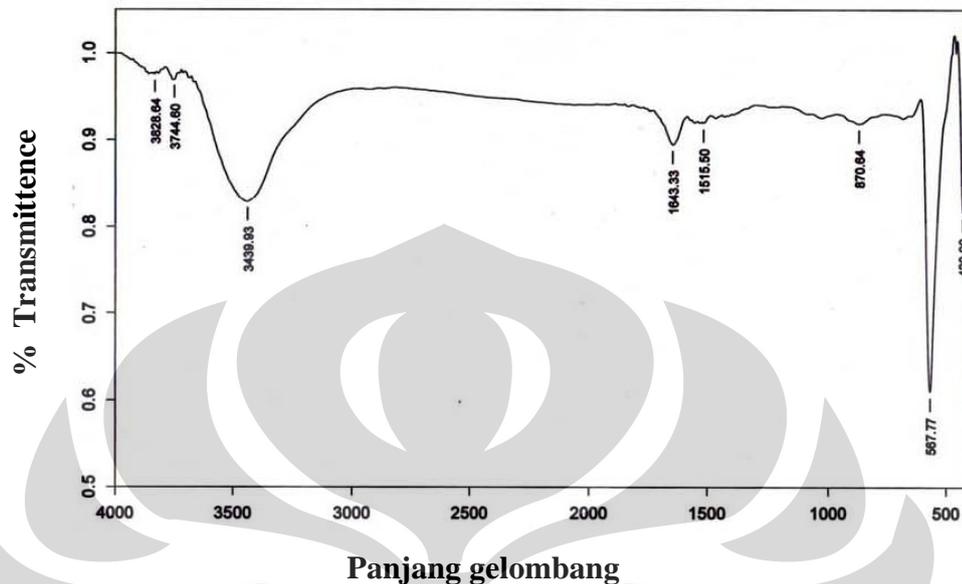
(a) 2 hari, (b) 4 hari, dan (c) 6 hari.

Pada Gambar 2.11 terlihat bahwa dengan waktu tahan yang semakin lama akan membuat partikel *nanoseed* yang ditahan selama 2, 4, dan 6 hari menjadi lebih besar sehingga diharapkan ketika dilakukan proses hidrotermal untuk mendapatkan *nanorod* yang mempunyai besar yang bervariasi pula.

Lalu untuk membuktikan bahwa benih yang terbentuk adalah *nanoseed* ZnO, maka dilakukan uji *Fourier transform infrared* (FT-IR)^[40]. FT-IR adalah suatu alat karakterisasi yang menggunakan sinar infra-merah dengan mencatat seberapa besar energi yang diserap ketika diberikan dalam berbagai macam frekuensi sinar infra-merah, sinar infra-merah yang dipantulkan akan ditangkap oleh *interferogram*. Dengan alat ini dapat digunakan untuk mengetahui jenis ikatan kimia yang terdapat pada bahan tersebut.

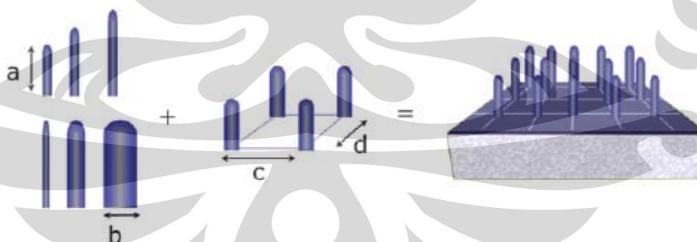
Pada Gambar 2.12 terlihat bahwa terdapat cukup banyak ikatan kimia yang terjadi pada serbuk *nanocrystalline* ZnO, yang terdiri atas kelompok hydroxyl pada 3430cm^{-1} ; C=O pada 1634 dan 1515 cm^{-1} ; O-H pada 567 cm^{-1} ; dan ZnO pada 430 cm^{-1} . Dari hasil FT-IR pada tersebut dapat diketahui bahwa senyawa

ZnO terbentuk pada proses pembuatan *nanoseed* ini. Sehingga metode ini dapat digunakan untuk pembuatan *nanorod* di tahap selanjutnya.



Gambar 2.12. Spektrum FT-IR dari serbuk *nanocrystalline* ZnO.

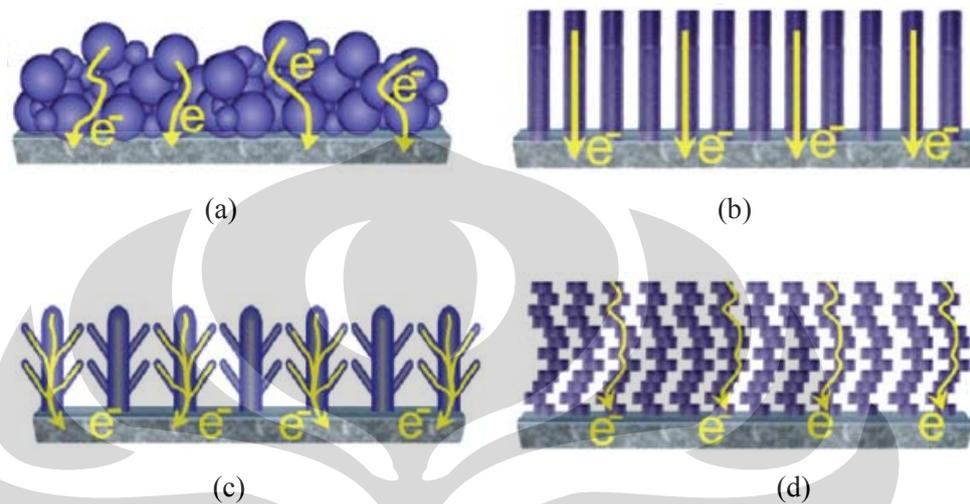
Nanostruktur dari ZnO harus memiliki ukuran yang optimum yaitu dengan ketinggian, diameter *nanorod* dan juga jarak antara *nanorod*, yang direpresentasikan dalam Gambar 2.13 di bawah ini:



Gambar 2.13 Skematik dari *Nanorod*; dimana ketinggian, diameter dari *nanorod* dan jarak antara *nanorod* bisa diubah untuk mendapatkan sifat yang paling baik untuk transport elektron dan penyerapan sinar.^[14]

Nanostruktur yang ideal tidaklah mudah untuk didapatkan. Pada kenyataannya, panjang difusi elektron sekitar 20 nm, sehingga ukuran diameter dari *nanorod* yang paling baik adalah sekitar 20-40 nm dan jarak antara masing-masing *nanorod* adalah sekitar 40 nm. Tetapi selain dari sifat elektriknya,

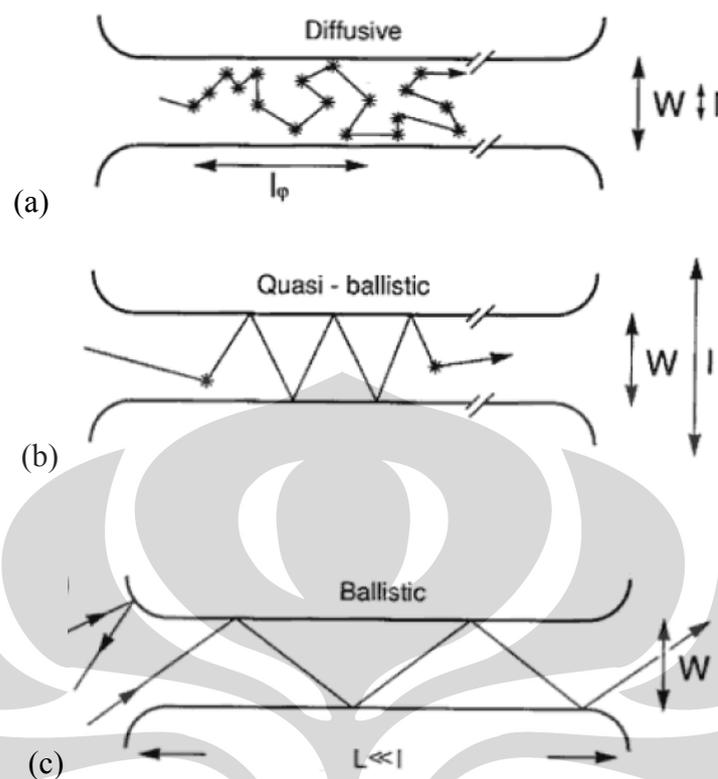
nanostruktur dari *nanorod* itu sendiri mempunyai pengaruh yang cukup besar dalam mendapatkan transpor elektron yang cukup tinggi. Oleh sebab itu, dibentuklah berbagai nanostruktur dari *nanorod* yang sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skematik dari laju alir elektron yang mungkin terjadi di berbagai nanostruktur dari *nanorod* yang berbeda dengan (a) nanopartikel, (b) *nanorod*, (c) *nanorod* bercabang, dan (d) *porous single crystal*^[26].

Sebagaimana yang telah ditunjukkan pada Gambar 2.14, tampak bahwa pada secara mendasar apabila suatu struktur yang mempunyai luas area permukaan untuk menyerap cahaya dan transpor seperti Gambar 2.14(c), maka laju alir elektron akan menjadi lebih cepat dan lebih efisien^[26].

Bentuk *nanorod* ini mempunyai suatu sifat khusus karena dapat menyebabkan terjadinya *ballistic transport*. *Ballistic transport* disebut juga sebagai teori Landauer-Buttiker (LB) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15



Gambar 2.15 *Ballistic effect* pada kondisi elektron yang mengalir adalah : (a) kejadian dimana panjang konduktor (L) lebih besar daripada lebar celah (W) (b) kondisi dimana jarak panjang konduktor hampir menyamai lebar celah (W) (c) kondisi dimana $L \ll W$ sehingga tidak terjadi penghamburan yang berarti

Kondisi seperti ini muncul ketika panjang dari konduktor lebih kecil dibandingkan dengan jarak antar celah. Hal yang penting dalam *ballistic transport* adalah tidak ada energi yang terbuang dalam pengaliran energi dan tidak ada penghamburan elastik. Ketika penghamburan elastik muncul (*elastic scattering*), koefisien transmisi dan konduktifitas elektrik akan menurun^[27,28].

2.4.4 Elektrolit

Elektrolit pada DSSC berfungsi untuk meregenerasi elektron pada pewarna yang telah mengalami eksitasi dan kehilangan elektron. DSSC pada umumnya menggunakan elektrolit pasangan redoks triiodida/iodida (I^3/I). Elektrolit tersebut dapat berfasa cair maupun padat, tergantung pada pelarutnya,

meskipun efektivitas perubahan energi pada elektrolit berfasa cair lebih baik daripada elektrolit berfasa padat. Hal ini disebabkan oleh lebih tingginya kontak antara permukaan elektrolit dengan pewarna pada elektrolit berfasa cair^[11]. Elektrolit berfasa cair yang umum digunakan adalah yang berbasis pelarut. Hal ini bukan tanpa kekurangan mengingat elektrolit jenis ini tidak stabil dalam jangka panjang. Ketakstabilan ini disebabkan karena jenis pelarut yang digunakan biasanya adalah pelarut organik – seperti asetonitril – yang asiri, digabungkan dengan proses penyinaran yang menimbulkan panas.

Kehilangan elektrolit berarti pewarna tidak dapat teregenerasi, dan proses pengubahan energi matahari menjadi terhenti. Meskipun demikian, untuk penggunaan DSSC sampai sekarang masih banyak menggunakan elektrolit berfasa cair berbasis pelarut organik, terutama karena alasan kemudahan dalam persiapannya, serta elektrolit jenis lain masih dalam tahap pengembangan dan belum cukup mampu menjadi pengganti.

Pemilihan pasangan redoks I^3^-/I^- memiliki alasan khusus. Laju rekombinasi elektron dan lubang setelah terjadinya pemisahan muatan yang harus ditekan dapat terjadi pada pasangan redoks tersebut – yang secara kinetik sangat lambat. Keberadaan elektrolit juga secara umum mencegah adanya medan listrik, yang biasanya terjadi pada sel surya silikon terdahulu, memasuki sel surya baik saat penyinaran maupun keadaan setimbang. Medan listrik ini menghambat penghantaran muatan, sehingga DSSC dapat dikatakan lebih mangkus menghantar elektron menghantar listrik.

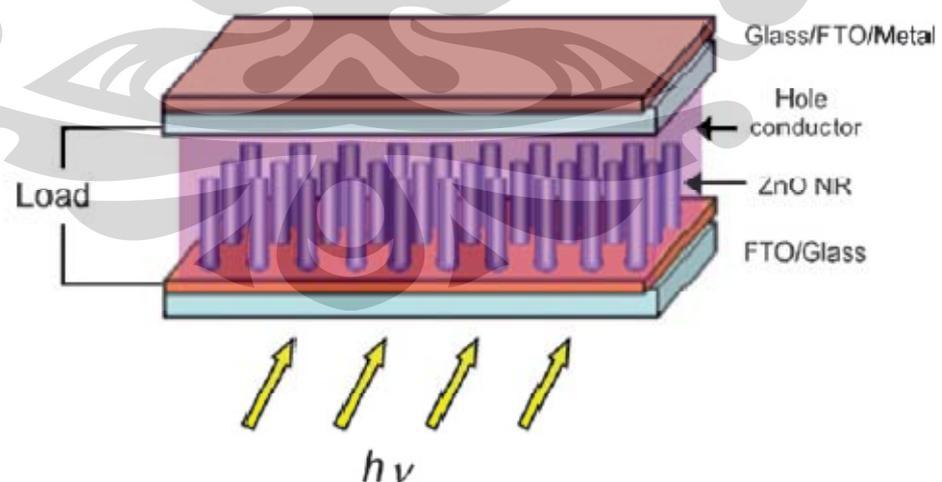
2.5 Proses fotoelektrokimia

Photovoltaic cell atau sel surya dikenal juga sebagai pengembangan dari fotoelektrokimia. Alat fotoelektrokimia mengandung material yang mempunyai *p-n junction*. Fotoelektrokimia pertama kali ditemukan oleh Fujishima dan Honda pada 1972, yang menyatakan bahwa telah terjadi pemisahan air menjadi molekul hidrogen dan oksigen yang terjadi karena cahaya UV. Kejadian ini dikenal dengan efek fotokatalisis^[29].

Kejadian ini membuka peluang perubahan energi matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan semikonduktor atau *sensitiser*. Prinsip ini hampir sama dengan fotosintesis pada tumbuhan hijau, dan tumbuhan autotrof yang menyediakan makanan untuk dirinya sendiri dan mengalami pertumbuhan karena adanya sinar matahari. Proses ini melibatkan produksi oksigen dari oksidasi air dan reduksi karbon dioksida. Proses ini terjadi karena adanya sensitisasi oleh klorofil yang merupakan sebuah kompleks magnesium (Mg) dari turunan porfirin.

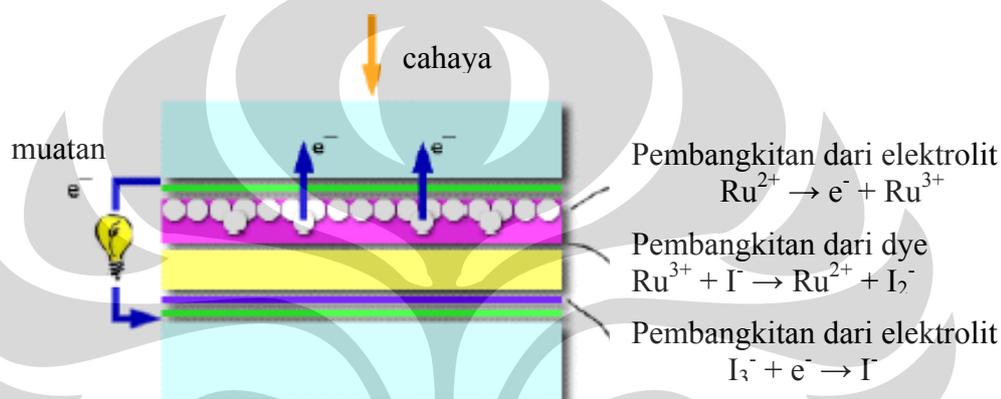
Proses sensitisasi dengan pewarna sendiri telah lebih dulu dikenal pada dunia fotografi. Untuk dunia perubahan energi cahaya menjadi energi listrik, sensitisasi dengan pewarna adalah proses yang penting dalam proses memanen foton dari cahaya tampak. Untuk jenis-jenis pewarna yang dapat digunakan pada DSSC dengan menggunakan material ZnO *nanorod* telah dibahas pada subbab 2.4.2.

Selain faktor pewarna, faktor lain yang menentukan kemampuan menjaring foton, serta perpindahan dan pergerakan elektron dalam DSSC adalah ukuran. Ukuran yang semakin kecil dan menuju skala nano meningkatkan kemampuan DSSC secara signifikan.



Gambar 2.16 Struktur fotoelektrokimia ZnO *nanorod*^[21].

Pada Gambar 2.16 diperlihatkan struktur dari fotoelektrokimia dengan menggunakan konduktor ZnO *nanorod*. Umumnya fotoelektrokimia ini terdiri atas dua elektroda dengan penghubung yang sesuai. Anoda yang terdiri atas semikonduktor yang bersifat konduktif dan substrat yang transparan dengan material yang sudah dijelaskan pada subbab 2.3.3. sedangkan katoda berperan sebagai pengoleksi arus dan juga sebagai katalis dalam reaksi redoks. Cahaya yang diserap akan mengeksitasi elektron ke dalam semikonduktor sehingga elektrolit dan menghasilkan elektron yang diilustrasikan pada Gambar 2.17^[30]



Gambar 2.17 Proses Redoks pada fotoelektrokimia^[30].

2.6 Proses sintesis nano partikel ZnO dengan teknik sol-gel

Untuk mendapatkan partikel yang berskala nano, setidaknya ada dua metode umum yang bisa ditarik garis besar di antaranya, yaitu metode *top-down* (pengecilan ukuran) dan *bottom up* (penyusunan atom-atom). Metode pengecilan ukuran membutuhkan energi yang digunakan untuk memecah ukuran partikel dari skala mikro menjadi skala nano. Metode ini terutama menggunakan pemecahan secara fisis dan mekanis. Metode penyusunan atom-atom, di lain pihak, banyak menggunakan reaksi kimia. Salah satunya dengan metode sol-gel. Metode sol-gel ini menggunakan teknik reaksi kimia berbasis larutan (*solution*) yang berfungsi sebagai proses untuk mendapatkan partikel berukuran nano, kemudian partikel *nanoseed* yang sudah terbentuk dipisahkan dari larutan. Pemisahan

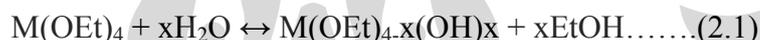
larutan dari partikel ini melalui fasa gel, sehingga nama yang disematkan padanya adalah proses sol-gel.

Proses sol-gel sangat berfungsi dalam membuat logam oksida yang kompleks, material gabungan antara organik-anorganik yang sangat sensitif terhadap suhu dan material yang metastabil. Proses sol-gel juga mempunyai banyak kelebihan seperti temperatur proses yang rendah dan kesamaan tingkat molekul yang sangat tinggi.

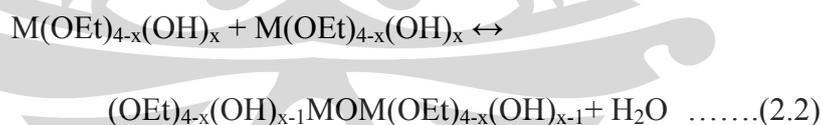
Metode sol-gel untuk menghasilkan oksida logam melibatkan reaksi logam alkoksida (M-OR) dan air pada pelarut berbasis alkohol. Reaksi pertama adalah reaksi hidrolisis yang menghasilkan pergantian gugus -OR pada logam dengan gugus logam hidroksida M-OH. Spesies hidroksida ini dapat bereaksi bersama membentuk ikatan M-O-M yang akhirnya membentuk jaringan. Larutan kemudian dikeringkan yang membentuk gel.

Skema reaksi sol-gel untuk mendapatkan ZnO nanopartikel dapat dilihat pada reaksi berikut :

- Hidrolisis



- Kondensasi



Namun pada saat kondensasi terdapat masalah yaitu sering sekali terjadi homo-kondensasi. Hal ini dapat diatasi dengan pembuat sol-gel di dalam keadaan asam. Masalah lainnya yang mungkin terjadi adalah *shrinkage*^[32].

Tahap selanjutnya setelah gel sudah dapat dibentuk, maka gel dipisahkan dari larutannya dengan berbagai cara. Terdapat tiga^[31] metode: *aerogel*, *cryogel*, dan *xerogel*. *Cryogel* dihasilkan dari proses pengeringan beku dari material yang hidrofilik. *Cryogel* yang terbentuk dapat bereaksi kembali dengan air dan

membentuk larutan yang identik dengan asalnya. Sebuah *aerogel* adalah hasil dari proses pendinginan superkritis yang dilakukan pada *autoclave* yang memungkinkan terlampauinya titik-titik kritis pelarut (tekanan dan suhu kritis). Selain kedua proses tersebut, proses pengeringan larutan dapat dikategorikan sebagai proses *xerogel*, yang menggunakan suhu dan tekanan di sekitar suhu ruang. Gel anorganik sangat jarang yang langsung dipergunakan setelah pengeringan, Biasanya, gel yang dihasilkan diberikan proses perlakuan panas. Ada dua macam gel anorganik yang berbeda perilaku ketika diberikan panas: gel yang mengalami kristalisasi dan yang tidak. Proses perlakuan panas ini sendiri berbeda beda, dan salah satunya – proses hidrotermal – akan dijelaskan pada subbab 2.7.

2.7 Proses sintesis *nanorod* ZnO dengan proses hidrotermal

Hidrotermal adalah penggunaan air pada suhu dan tekanan tinggi untuk merubah struktur kristal dan membentuk material nanostruktur^[33]. Istilah ini pertama kali digunakan pada bidang geologi untuk mendeskripsikan kerja air bersuhu tinggi pada tekanan tinggi yang membuat perubahan pada kerak bumi yang memicu pembentukan berbagai batuan dan mineral. Dalam proses hidrotermal, dapat terjadi berbagai reaksi: sintesis fasa atau stabilisasi kompleks baru; dekomposisi, korosi, etsa, dan; pertumbuhan kristal senyawa anorganik.

Persiapan ZnO dan oksida lainnya telah umum dilakukan dengan proses hidrotermal. Proses hidrotermal memungkinkan pengendalian ukuran kristal, morfologi dan tingkat aglomerasi dengan pemilihan material awalan, keasaman, waktu dan suhu. Keunggulan metode hidrotermal adalah struktur kristalin yang sangat homogen pada suhu yang relatif rendah (<150 °C).

Secara umum, teknik hidrotermal berdasarkan atas 2 metoda mengikuti *coating* dari nanopartikel ZnO yang berdiameter di bawah 10 nm. Setiap partikel ZnO berfungsi sebagai inti dari pembentukan *nanorod* dalam kondisi basah. *Nanorod* yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satu faktornya adalah penambahan bahan sintesis selama proses, diharapkan dengan penambahan

partikel sistesis ini dapat meningkatkan kemampuan menyerap cahaya apabila digunakan untuk material DSSC.

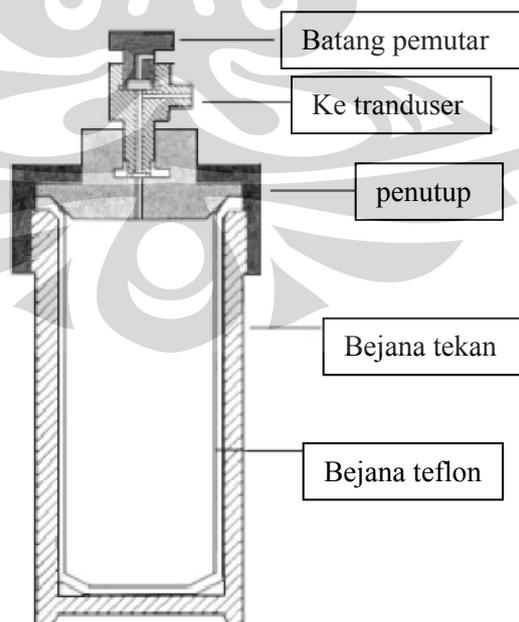
Keuntungan menggunakan *autoclave* ini adalah :

- Dapat menggunakan beberapa jenis tipe dari pertumbuhan Kristal;
- Dapat menumbuhkan material yang mempunyai temperatur uapnya dekat dengan temperatur lelehnya;
- Dapat menumbuhkan material yang tidak stabil apabila berada pada temperatur luluhnya;
- Cocok untuk menumbuhkan cristal dalam jumlah yang cukup banyak dengan mengatur komposisinya.

Kekurangan dari metode hydrothermal :

- Membutuhkan pengalaman dalam menggunakan;
- Benih atau “*seed*” sangat menentukan bagaimana kristal akan tumbuh

Proses hidrotermal umumnya dilakukan pada *autoclave*, untuk mendapatkan suhu dan tekanan kerja yang sesuai. Bagan umum dari sebuah *autoclave* dapat dilihat pada Gambar 2.18.^[33]



Gambar 2.18 Skema hidrothermal.

Bejana tekan biasanya terbuat dari bahan stainless steel yang cukup tebal agar dapat menahan tekanan selama proses berlangsung. Sedangkan untuk bejana di dalamnya biasanya digunakan adalah bahan yang inert dan terbebas dari unsur karbon seperti tembaga, perak, emas, platinum, titanium, kuarsa atau yang paling banyak digunakan adalah teflon. Tapi material ini tergantung kepada temperatur dan jenis larutan yang digunakan.



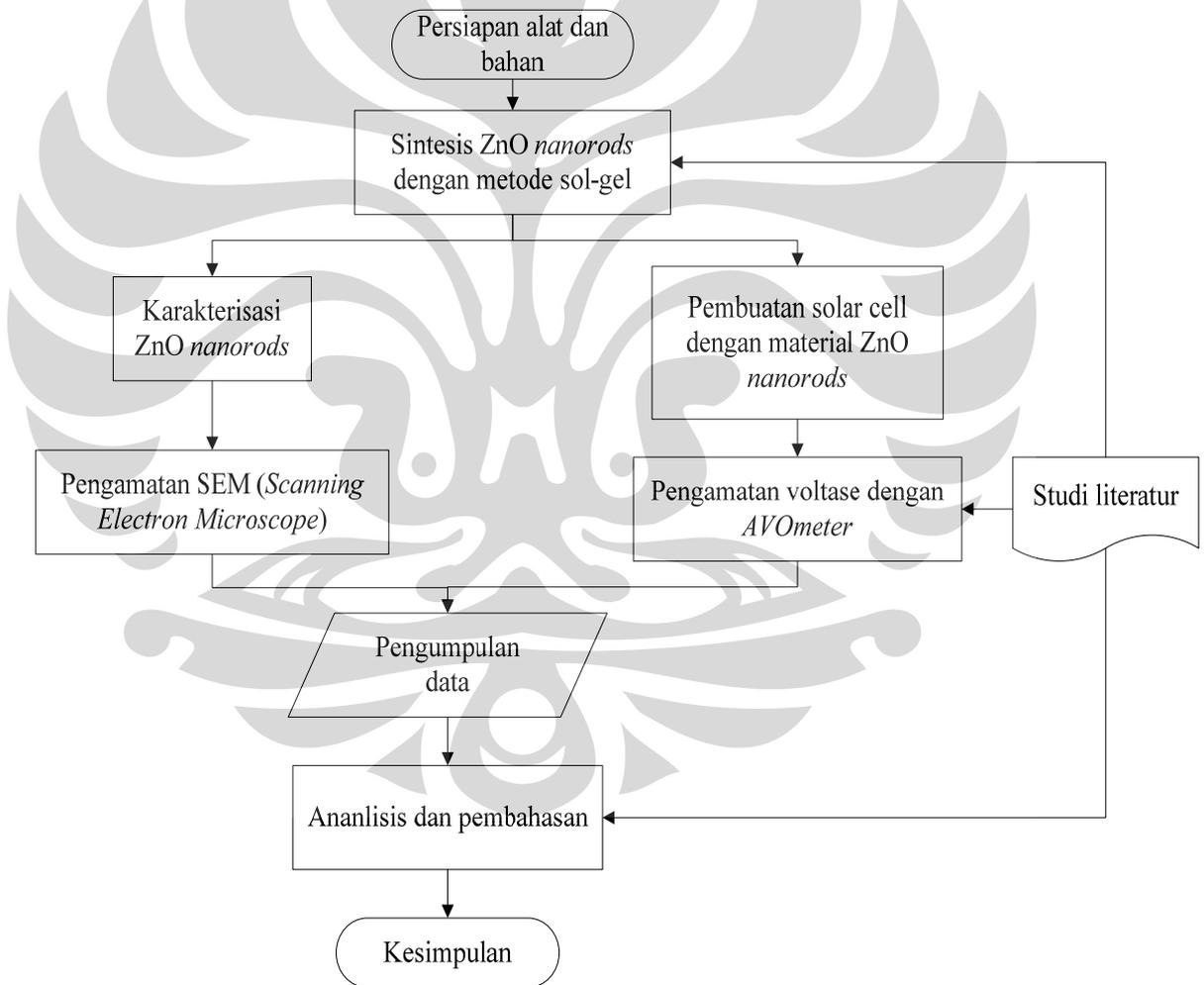
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rencana penelitian

Secara garis besar rencana penelitian ini dibagi atas 2 tahap:

1. Sintesis semikonduktor *nanorod* ZnO yang akan direkatkan pada substrat dengan menggunakan metode hidrothermal.
2. Penyusunan dan pengujian DSSC

Diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram alir rencana penelitian.

3.2 Bahan dan peralatan

3.2.1 Bahan-bahan

- Etanol
- Ruthenium 535-4TBA
- DI-H₂O
- NH₂CH₂CH₂OH (Ethanolamine) [0,75M]
- CH₃OCH₂-CH₂OH (2-Methoxyethanol)[0,75M]
- ZnCH₃COO.2H₂O (Zinc acetate dehydrate / ZAD) [0,75M]
- (CH₂)₆N₄ (Hexamethylenetetramine / HMTA) [0,1mM]
- Zn(NO₃)₂.4H₂O (Zinknitrat-Tetrahydrat /ZNTH) [0,1mM]
- Iodin (I₂)
- Acetonitril
- Kalium Iodida (KI)
- Lilin
- Kaca *ITO TCO*

3.2.2 Peralatan

- Pengaduk magnetik dan batang pengaduk magnetik
- Lempeng pemanas
- Lumpang dan alu spatula
- Gelas ukur
- Gelas beker
- Gunting
- Batang gelas pengaduk
- Cawan petri
- Labu Erlenmeyer
- Ampere-volt-ohm-meter (AVOmeter)
- Dapur pemanas
- Sarung tangan tahan panas
- Masker
- Neraca digital
- Pinset
- Gunting

- Cahaya lampu
- Autoclave

3.3 Persiapan larutan seeding

Pembuatan larutan seeding diperlukan sebagai bakalan agar *nanorod* dapat tumbuh

Pada percobaan ini dilakukan dengan cara:

- Seberat 6,58 gram ZAD ditimbang dalam beaker glass dengan menggunakan timbangan digital (Gambar 3.2);
- Sebanyak 1,83 gram larutan Ethanolamine ditambahkan kedalam beaker glass yang berisi ZAD (Larutan 1);
- Larutan 2-Methoxyethanol ditambahkan ke dalam larutan 1 sampai 40 ml (Larutan 2);
- Larutan 2 diaduk dengan magnetic stirrer (Gambar 3.3) selama 2 jam pada suhu berkisar antara 60 – 70°C;
- Larutan 2 yang sudah diaduk didiamkan selama 2, 4, dan 6 hari.

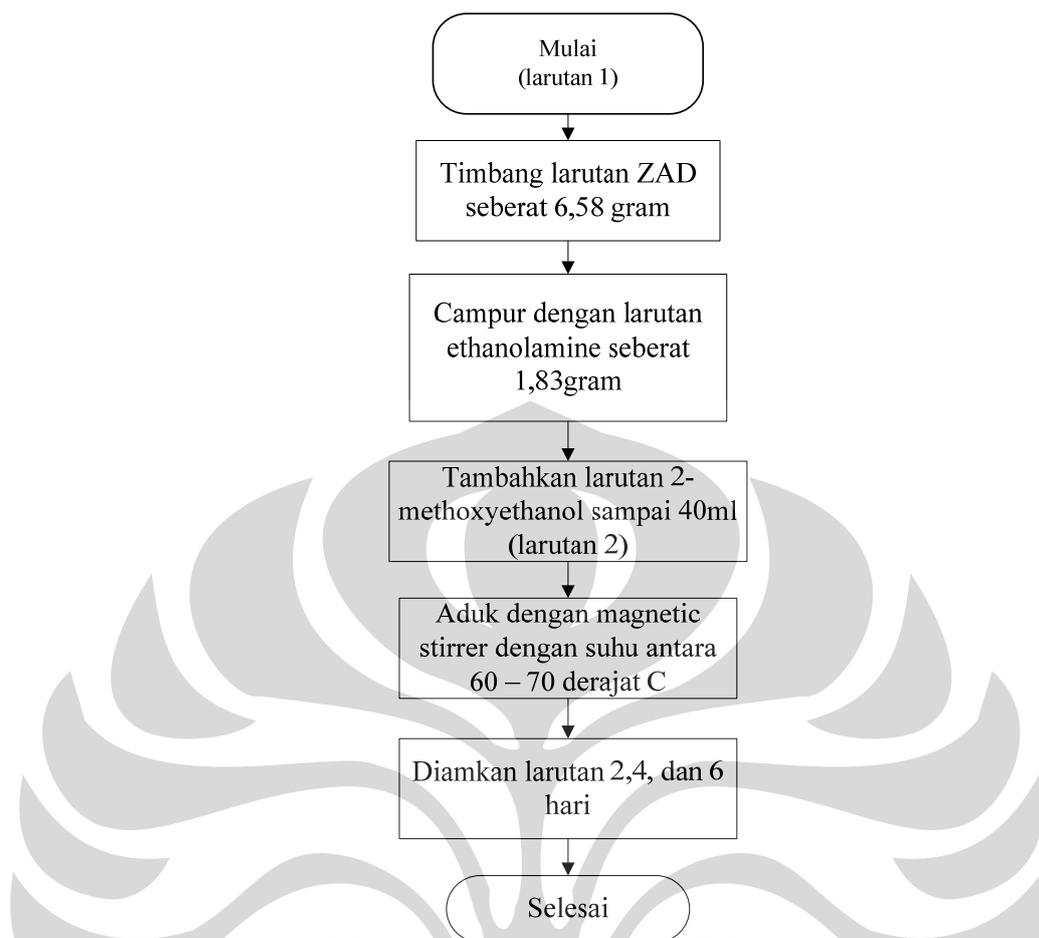
Proses diatas dapat dilihat secara lebih jelas pada Gambar 3.4.



Gambar 3.2 timbangan digital.



Gambar 3.3 magnetic stirrer.



Gambar 3.4 Flowchart larutan seeding

3.4 Pelapisan kaca konduktif

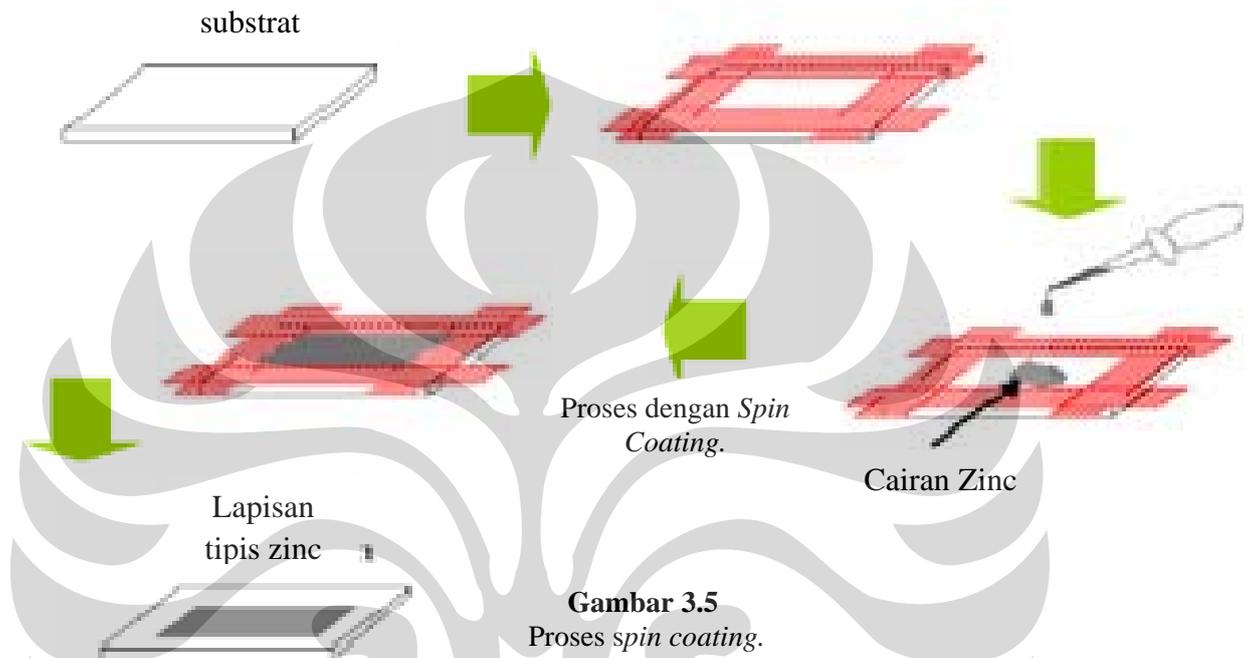
Pelapisan kaca konduktif digunakan agar ZnO dapat tumbuh di permukaan kaca membentuk struktur *nanorod*.

Cara yang harus dilakukan adalah;

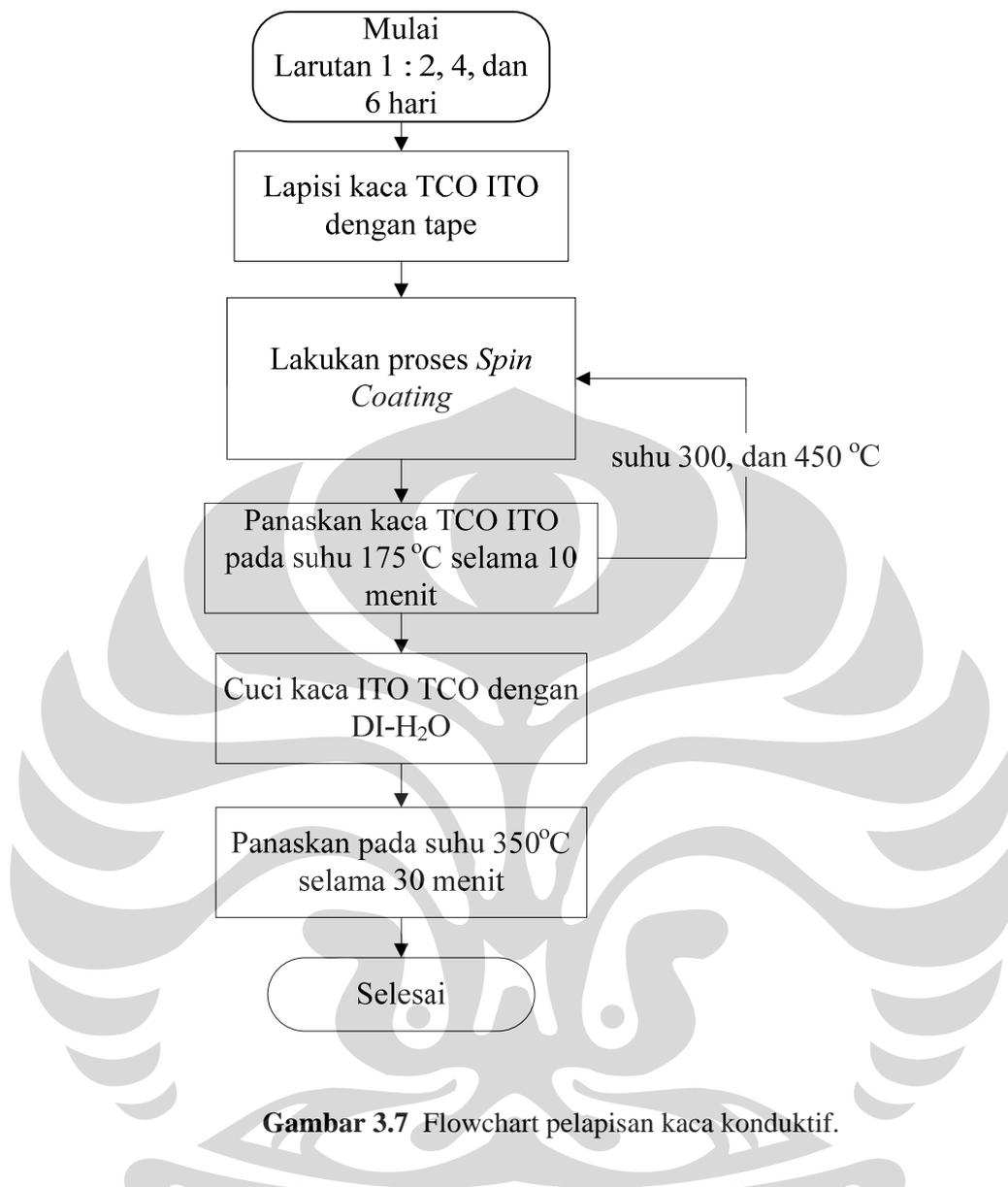
- a. Larutan 2 yang sudah didiamkan 2 hari diambil dengan menggunakan pipet;
- b. Kaca TCO ITO dilapisi dengan menggunakan *tape*;
- c. Kaca TCO ITO hasil dari *b* dilakukan proses *spin coating* seperti pada Gambar 3.5 dengan menggunakan mesin *spin coating* (Gambar 3.6);
- d. Kaca TCO ITO yang sudah terlapisi seed dipanaskan pada suhu 175 °C selama 10 menit;
- e. Prosedur *c* dan *e* diulangi kembali dengan suhu 300, dan 450 °C;

- f. Kaca *ITO TCO* dicuci dengan menggunakan DI- H_2O ;
- g. Kaca *ITO TCO* hasil dari *f* dipanaskan pada suhu $350^{\circ}C$ selama 30 menit;
- h. Percobaan a – e dilakukan kembali untuk larutan pembibitan 4 dan 6 hari.

Untuk mempermudah proses pembuatan, alur proses dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.6 Mesin *spin coating*



Gambar 3.7 Flowchart pelapisan kaca konduktif.

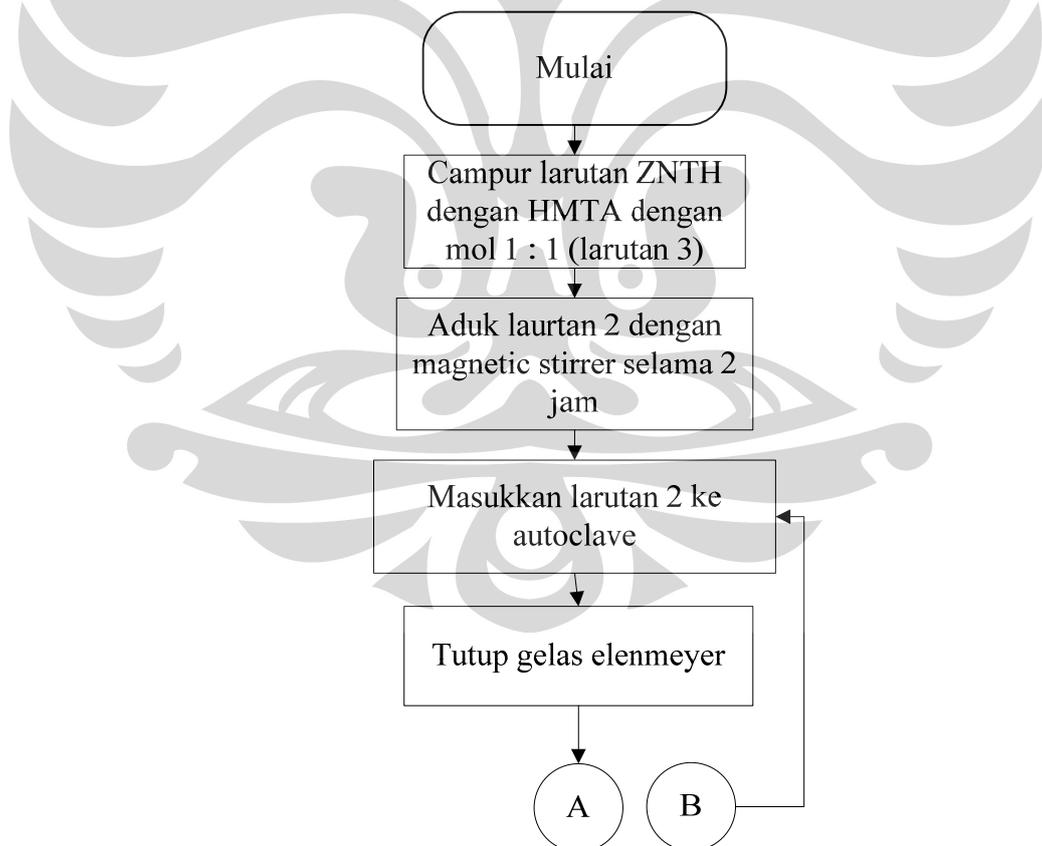
3.5 Sintesis ZnO nanorod dengan teknik hidrothermal

Proses sintesa ZnO nanorod ini dilakukan dengan cara sol-gel dengan proses hydrothermal. Cara yang dilakukan adalah sebagai berikut :

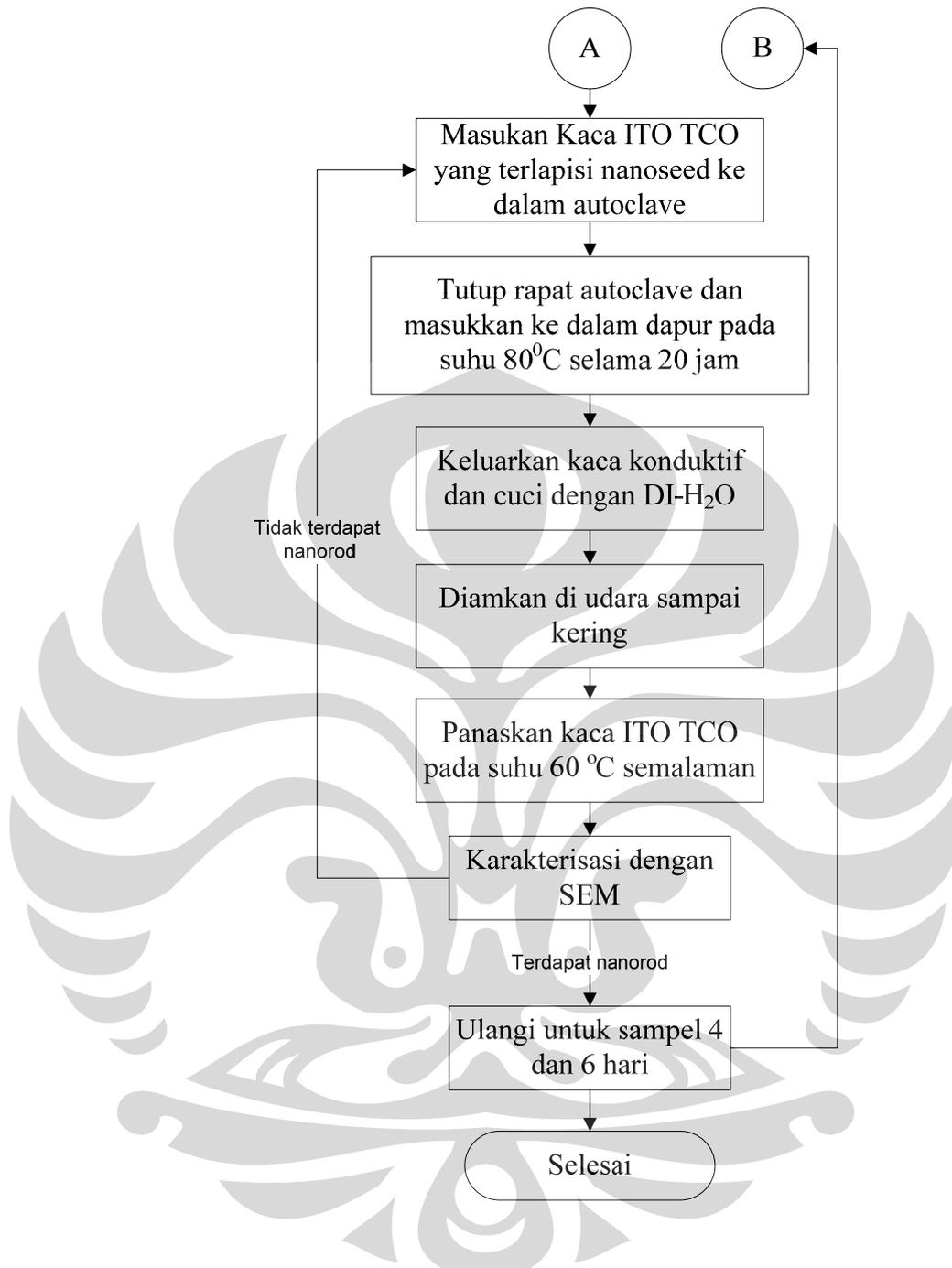
- Larutan ZNTH dengan HMTA dicampur dengan perbandingan mol 1 : 1 (larutan 3);
- Larutan 3 diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 2 jam;
- Larutan 3 hasil *b* dimasukkan ke dalam autoclave;
- Kaca ITO TCO hasil dari hasil subbab 3.4 dimasukkan ke dalam autoclave;
- Autoclave ditutup rapat, kemudian dimasukkan ke dalam dapur;

- f. Dapur diatur suhunya pada suhu 80°C selama 20 jam;
- g. Kaca *ITO TCO* yang diharapkan sudah terdapat *nanorod* dikeluarkan dari dapur; lalu kaca tersebut dicuci dengan $\text{DI-H}_2\text{O}$; yang kemudian didiamkan di udara sampai kering lalu dilakukan proses pemanasan kembali pada suhu 60°C semalaman dan setelahnya dikarakterisasi dengan menggunakan SEM
- h. Apabila kaca *ITO TCO* yang tidak terdapat *nanorod* ZnO , percobaan diulangi kembali dari c;
- i. Apabila kaca *ITO TCO* terdapat *nanorod*, hitung besar *nanorod* yang dihasilkan dari masing-masing larutan dengan mengukur diameter rata-ratanya.

Diagram alir dari prosedur di atas diwakili oleh pada Gambar 3.8



Gambar 3.8 Flowchart sintesis *nanorod* dengan hidrothermal



Gambar 3.8 (lanjutan) Flowchart sintesis *nanorod* dengan hidrothermal

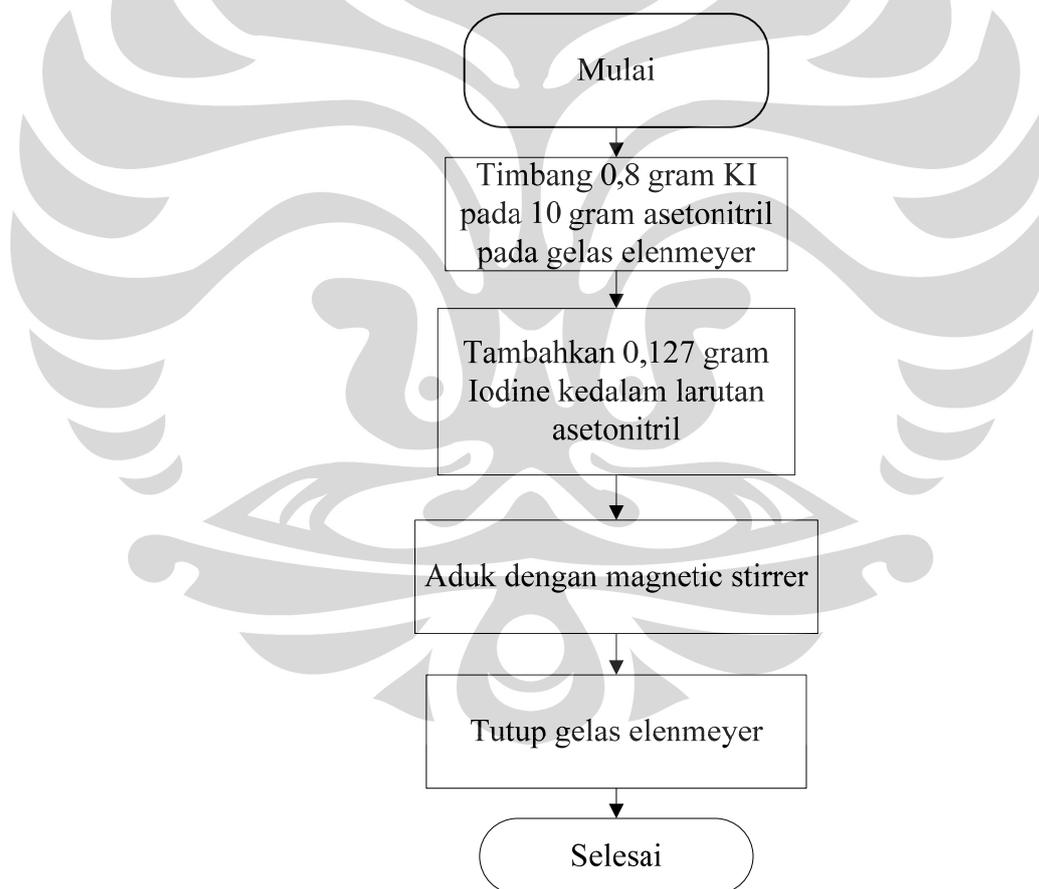
3.6 Persiapan larutan elektrolit

Larutan elektrolit yang dipergunakan dalam untuk sel surya ini adalah larutan elektrolit KI/I₃

Larutan ini dibuat dengan cara:

- a. Seberat 0,8 gr KI dilarutkan dalam 10 ml asetonitril, kemudian diaduk hingga KI larut sempurna dalam asetonitril (larutan 4) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10;
- b. Seberat 0.127 gr I₂ lalu ditambahkan ke dalam larutan 4 (larutan 5);
- c. Larutan 5 kemudian disimpan dalam botol tertutup untuk digunakan kemudian

Mekanisme pembuatan secara bertahap dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Flowchart persiapan larutan elektrolit



Gambar 3.10 Larutan elektrolit

3.7 Persiapan elektroda lawan

Bahan kaca berlapis semikonduktor perlu dipasangkan dengan elektroda-lawan yang berfungsi sebagai kutub lawan dari kaca konduktif diatas.

Elektroda-lawan untuk kaca konduktif dapat dilapisi oleh Karbon dengan pertimbangan :

1. Harga karbon yang murah.
2. Proses pelapisan yang mudah

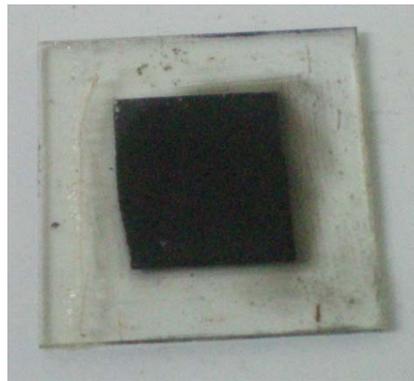
Pelapisan kaca konduktif dengan karbon dengan cara karbonisasi kaca.

Proses karbonisasi ini sebenarnya hanya melapisi permukaan dengan karbon .

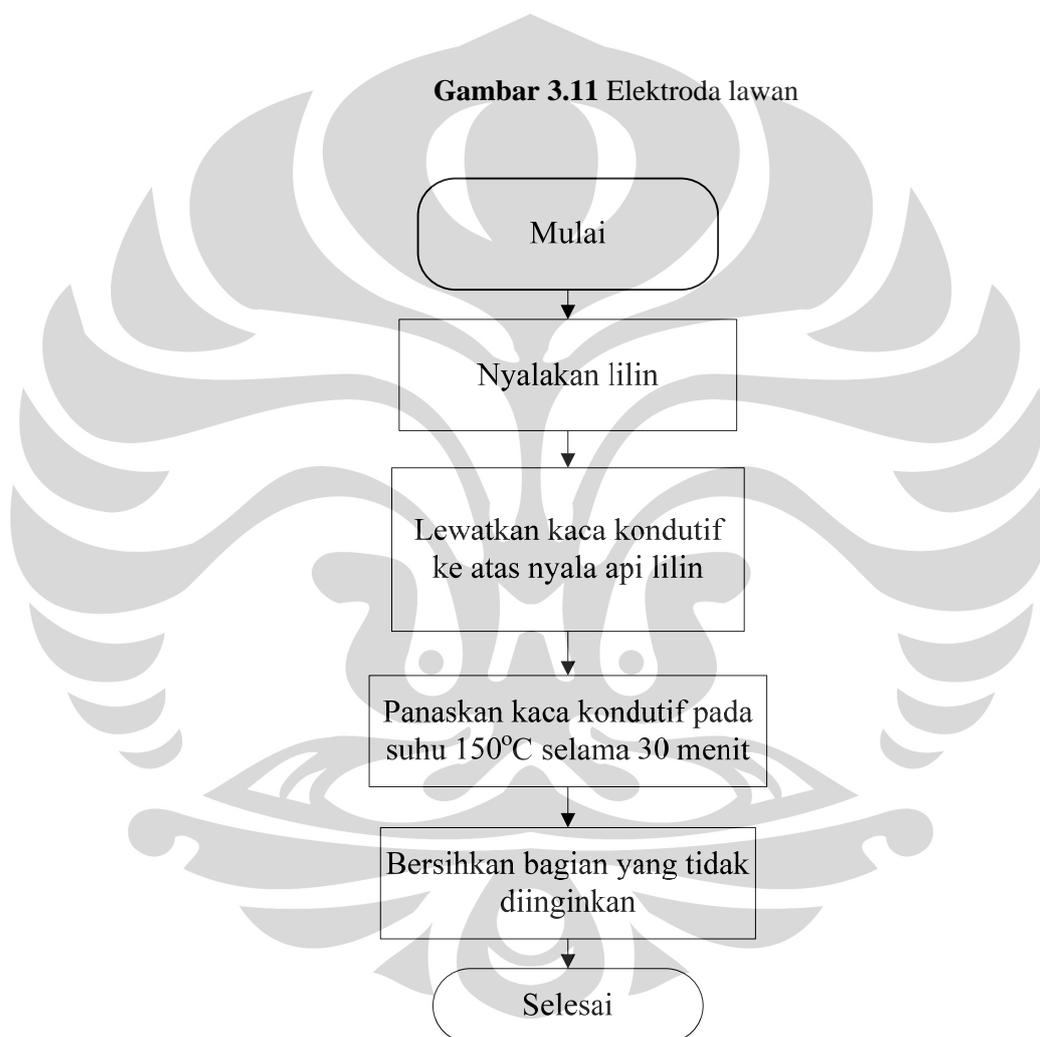
Cara proses karbonisasi kaca ini adalah:

- a. Kaca konduktif dilapisi dengan karbon black dari lilin;
- b. Panaskan kaca konduktif agar karbon black merata pada suhu 150°C selama 30 menit;
- c. Bersihkan bagian yang tidak diinginkan terdapat karbon hitam (Gambar 3.11).

Proses alur pembuatan elektroda lawan dari bahan pelapis karbon dapat dilihat pada Gambar 3.12



Gambar 3.11 Elektroda lawan



Gambar 3.12 Flowchart pembuatan elektroda lawan

3.8 Perakitan DSSC

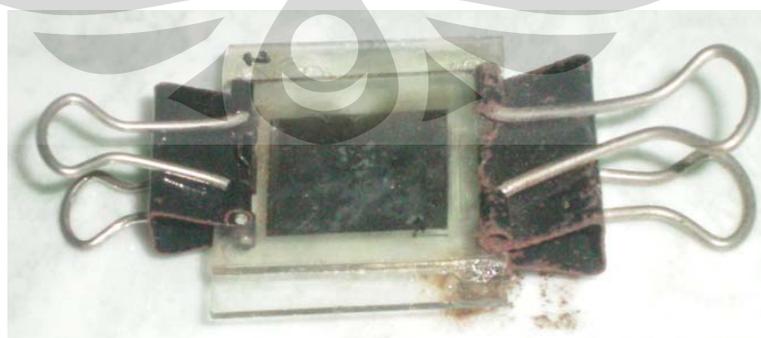
Proses perakitan DSSC pada penelitian ini :

- a. Kaca konduktif direndam dalam cawan petri berisi larutan pewarna Ru-N3
- b. Kaca konduktif diangkat setelah serapan mempunyai warna seperti pada Gambar 3.13, kira-kira selama 24 jam



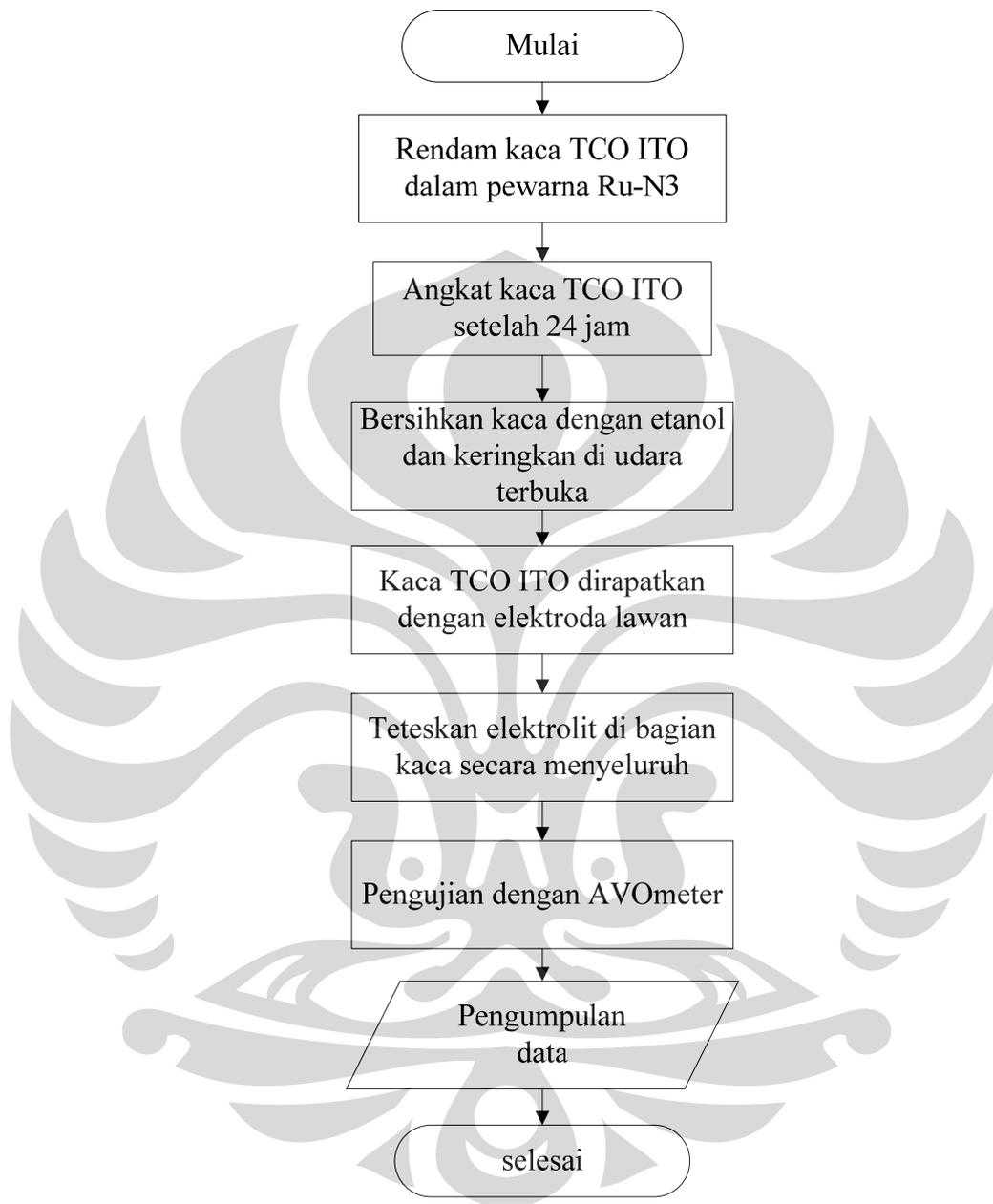
Gambar 3.13 Warna dye pada kaca konduktif

- c. Kaca yang telah direndam dibersihkan dengan air, lalu etanol, lalu dikeringkan diudara terbuka
- d. Elektroda-lawan ditempatkan berhadapan dengan kaca konduktif yang sudah diberi pewarna.
- e. Kaca diletakkan sedemikian rupa sehingga satu sisi yang tidak terlapisi pada kedua kaca terletak berjauhan untuk kontak, tekan agar tidak terdapat udara
- f. Elektrolit diteteskan di dekat bagian kaca yang tidak saling menempel.
- g. Apabila penyerapan elektrolit masih belum menyeluruh, lakukan proses *f*
- h. Alat siap untuk diuji.(Gambar 3.14)



Gambar 3.14 Hasil perakitan DSSC

Untuk mempermudah alur proses perakitan DSSC ini dapat dilihat pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Flowchart perakitan DSSC

3.9 Pengujian DSSC

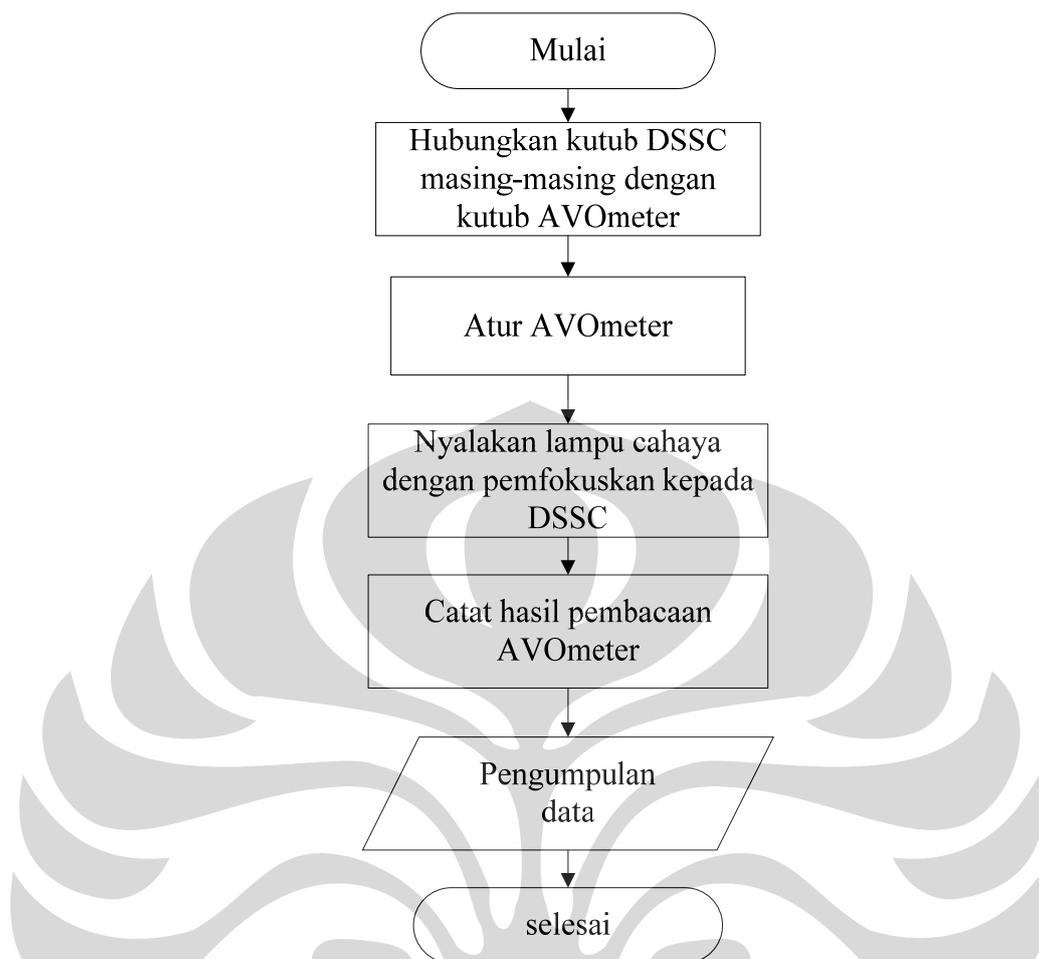
Pengujian dilakukan dengan menggunakan cahaya lampu LED agar mendapatkan intensitas cahaya yang seragam selama penelitian.

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan AVO meter yang menguji tegangan keluaran dari DSSC ini. Pengujian ini dilakukan dengan prosedur :

- Kontak listrik dihubungkan pada masing-masing kaca ke masing-masing kutub dari AVO-meter. Pemasangan kutub tidak boleh terbalik karena akan menimbulkan tegangan negatif.
 - AVO-meter diatur, sehingga tegangan dapat dibaca
 - Lampu OHP (Gambar 3.16) dinyalakan dengan dilakukan pemfokusan cahaya kepada DSSC.
 - Hasil pembacaan tegangan dari AVO-meter dicatat untuk setiap sel
- Proses alur pengujian DSSC ini dapat dilihat pada Gambar 3.17.



Gambar 3.16 Alat pengujian DSSC.



Gambar 3.17 Flowchart pengujian DSSC.

3.10 Lokasi penelitian

Pembuatan dan Penelitian tentang DSSC ini dilakukan di ruang Laboratorium Nanomaterial Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Karakterisasi dari partikel *nanorod* dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia Uji SEM dilakukan di laboratorium SEM Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Pengujian SEM menggunakan SEM *LEO 420i* milik Departemen Metalurgi dan Material seperti yang terlihat pada Gambar 3.18. Mikroskop pemindai elektron (SEM) digunakan untuk studi detail kontur permukaan sel (atau struktur jasad renik lainnya), dan obyek diamati secara tiga dimensi. Pada SEM, gambar dibuat berdasarkan deteksi elektron baru

(elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel ketika permukaan sampel tersebut dipindai dengan sinar elektron. Elektron sekunder atau elektron pantul yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya, kemudian besar amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*cathode ray tube*). Di layar CRT inilah gambar struktur obyek yang sudah diperbesar bisa dilihat.



Gambar 3.18 Mesin scanning electron microscope (SEM) *LEO 420i*.

Agar dapat mengamati sampel hasil proses pengeringan dan juga hasil proses anil dengan baik, diperlukan persiapan sampel dengan melakukan fiksasi, yang bertujuan untuk agar tidak mengubah struktur serbuk yang akan diamati, fiksasi dapat dilakukan dengan menggunakan senyawa perekat carbon. Setelah itu sampel baru dapat dimasukkan kedalam *chamber*. Untuk mendapatkan hasil yang bagus maka harus diperhatikan pengaturan perbesaran dan kontas gambar

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas parameter waktu tahan larutan proses yang mempengaruhi pembentukan ZnO *nanorod* yang hubungannya terhadap ukuran, distribusi *nanorod* yang dihasilkan, dan Voc (*open circuit voltage*) yang dihasilkan saat diaplikasikan pada rangkaian sel surya yang tersensitasi pewarna (*DSSC/dye sintesis solar cell*)

4.1. Hasil pengamatan visual pengaruh lama waktu tahan terhadap pertumbuhan bibit (*seeding*) ZnO

Percobaan ini dilakukan dengan memvariasikan waktu penahanan pembibitan untuk menghasilkan *nanoseed* yang akan digunakan untuk menumbuhkan *nanorod* dengan menggunakan metode hidrothermal. Pada variabel proses ini digunakan waktu tahan 2, 4, dan 6 hari. Proses pembuatan *nanoseed* ini dimaksudkan untuk menghasilkan bibit atau benih dari *nanorod* yang akan dibuat. Semakin besar *nanoseed* yang ada, akan membuat perbedaan morfologi *nanorod* yang akan didapatkan.

Pada proses pembuatan *nanoseed*, ditambahkan larutan *ethanolamine* yang berfungsi sebagai katalis agar larutan antara *Zinc Acetate Dehydrate* (*ZAD*) dan *2-methoxyethanol*. Karena apabila tidak ditambahkan *ethanolamine*, maka *ZAD* akan sulit larut di dalam larutan *2-methoxyethanol* yang kemudian akan membentuk emulsi. Dengan penambahan larutan *ethanolamine*, maka *ZAD* akan segera terlarut di dalam *2-methoxyethanol*. Dan tentang jumlah perbandingan mol antara *ZAD* : *Ethanolamine* = 1 : 1, kemungkinan disebabkan agar tidak terlalu mempengaruhi volume yang ingin didapatkan, karena apabila kurang dari 1 : 1, ada kemungkinan bahwa *ZAD* tidak larut sempurna dengan *Ethanolamine*, namun apabila berlebihan maka jumlah *2-methoxyethanol* yang ditambahkan akan berkurang sehingga akan mempengaruhi konsentrasi dari larutan *nanoseed*.

Setelah *ZAD* larut dalam *2-methoxyethanol*, maka akan terbentuk serbuk-serbuk yang sangat halus yang sangat sulit untuk melakukan karakterisasi

terhadap serbuk halus ini. Namun apabila dibentuk lapisan cairan tipis pada cawan petri akan terbentuk seperti serbuk halus yang berbeda besar serbuknya. Semakin lama waktu penahanan terhadap larutan tersebut, serbuk yang dihasilkan dari hasil pengeringan dengan cawan petri, menunjukkan ukuran butir serbuk yang semakin besar.

4.2. Pelapisan kaca konduktif

Pelapisan *nanoseed* dilakukan dengan menggunakan metoda spin coating yang dimaksudkan untuk mendapatkan lapisan yang sangat tipis sehingga tidak terjadi penumpukan *nanoseed* yang berlebihan. Penumpukan *nanoseed* yang berlebihan dapat menyebabkan *nanorod* sulit untuk terbentuk. Pemanasan dilakukan setelah proses spin coating dimaksudkan untuk menguapkan 2-methoxyethanol sehingga tidak ada larutan 2-methoxyethanol yang tersisa. Hal ini membuat yang terdapat di permukaan kaca *ITO TCO* hanya *ZnO nanorod*-nya saja. Setelah melalui proses ini, seluruh lapisan dari kaca *ITO TCO* sudah tertutup oleh *ZnO nanorod* dengan melihat permukaan kacanya yang akan memantulkan cahaya berwarna hijau.

Kesulitan dalam mengkarakterisasi lapisan ini terletak kepada alat. Hal ini disebabkan oleh apabila menggunakan alat *SEM*, *nanoseed* yang ingin diketahui tidak terlihat karena ukuran *nanoseed* yang terlalu kecil. *Nanoseed* yang ada pada permukaan kaca *ITO TCO* sebaiknya dilihat dengan menggunakan alat *AFM* (*atomic force microscope*) atau *FEM* (*field emission spectroscopy*)

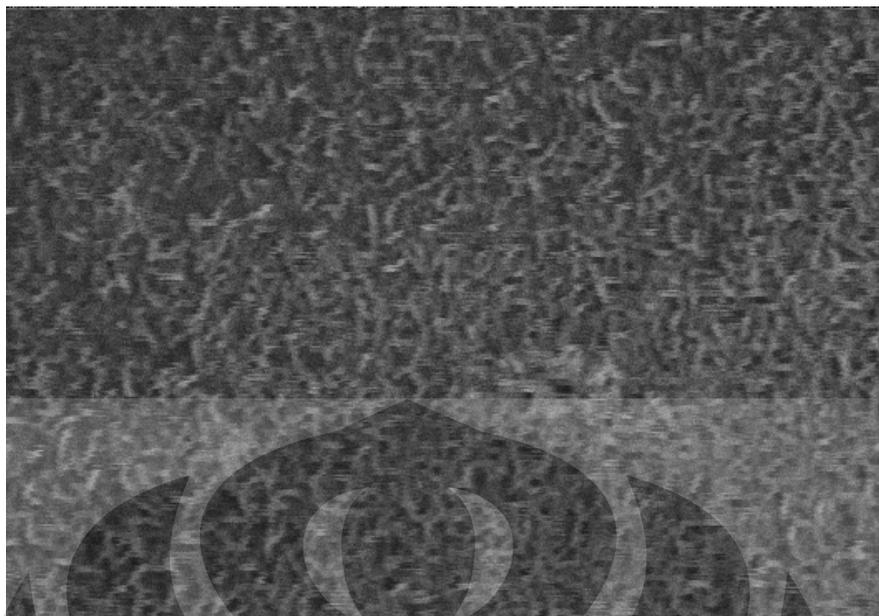
4.3. Proses hidrothermal dengan *nanorod*

Cara peletakan kaca *ITO TCO* di dalam *autoclave* dilakukan dengan posisi menghadapkan kaca *ITO TCO* searah dengan gravitasi bumi, hal ini dimaksudkan agar *nanorod* tumbuh tegak lurus ke bawah.

Dari analisis secara visual terhadap larutan 3 didapatkan bahwa temperatur titik uap hanya berkisar antara 60-70°C, hal ini menyebabkan bahwa pada saat melakukan proses hidrothermal tidak memerlukan temperatur sekitar 80°C. Dengan menggunakan temperatur sekitar 80°C, uap-uap yang terkumpul tersebut akan memberikan tekanan yang cukup agar ZnO *nanorod* dapat tumbuh, apabila tekanan yang dihasilkan terlalu besar terdapat kemungkinan *nanorod* yang diinginkan tidak akan tumbuh.

4.4. Hasil SEM

Nanorod yang terjadi pada percobaan ini tidak tegak lurus melainkan agak sedikit mempunyai posisi mendatar, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.1. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh bocornya tabung *autoclave* yang menyebabkan tekanan di dalam *autoclave* lebih rendah daripada tekanan yang diharapkan. Karena untuk proses hidrothermal memerlukan tekanan dan suhu pada mekanisme prosesnya. Tekanan di dalam *autoclave* disebabkan oleh uap larutan yang akan mengisi ruang, semakin banyak larutan yang menjadi uap, maka akan semakin besar tekanan yang terjadi di dalam *autoclave*. Bocornya *autoclave* diketahui ketika di bagian atas *Teflon* penutup *autoclave* yang seharusnya kering, terdapat uap air. Uap cairan itu menandakan bahwa terjadi kebocoran pada *autoclave* sehingga uap dapat keluar dari *autoclave* dan membasahi bagian atas dari *Teflon* penutup *autoclave*. Kebocoran ini juga menyebabkan pegas yang digunakan untuk menekan tutup *Teflon* *autoclave* menjadi terkorosi, sehingga pegas yang terkorosi menjadi berkurang kekuatan tekannya terhadap tutup *Teflon* *autoclave*, hal ini membuat kondisi *autoclave* yang bocor menjadi semakin buruk



Gambar 4.1 *Nanorod* hasil waktu tahan 2 hari pada permukaan kaca preparat

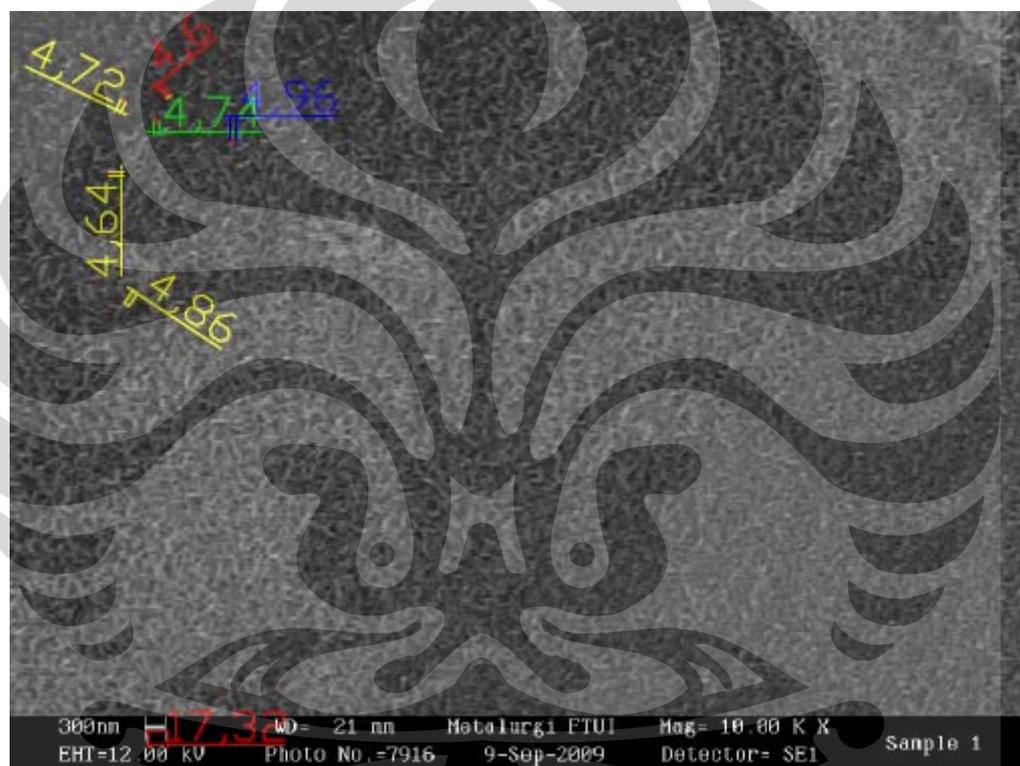
4.5. Efek waktu tahan terhadap bentuk *ZnO nanorod*

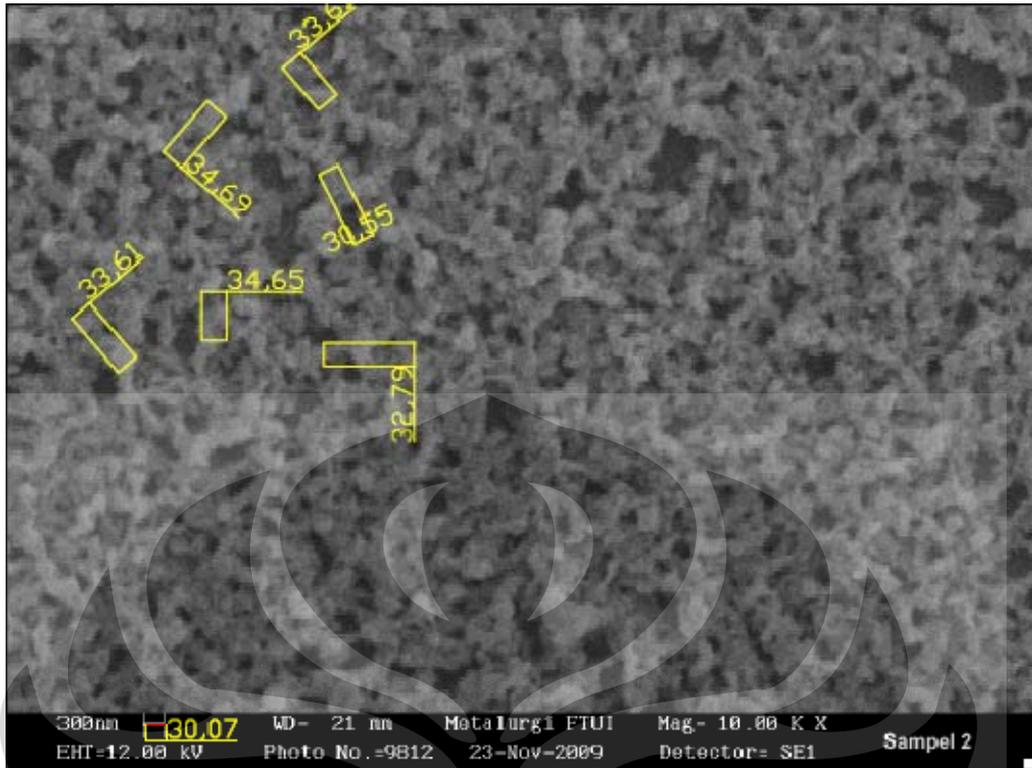
Seperti yang telah dijelaskan pada bagian di atas, bahwa waktu tahan akan mempunyai pengaruh terhadap bentuk *nanorod* yang akan terjadi. Dengan menggunakan tiga variasi perbesaran foto SEM dilakukan pengukuran besar diameter untuk setiap sampel sebanyak 6 kali, namun karena sulitnya melihat diameter nanorod untuk waktu tahan 2 dan 4 hari, maka hanya digunakan foto dengan perbesaran 10.000 kali, untuk mengetahui diameter dari *ZnO nanorod* tersebut dengan pengaruh lama waktu tahan. Percobaan yang dilakukan dengan waktu tahan dari 2, 4 dan 6 hari dengan waktu hidrothermal dan suhu hidrothermal yang konstan yaitu 20 jam pada suhu berkisar 80°C, pada Tabel 4.1 menunjukkan adanya peningkatan ukuran dari diameter dari *nanorods* yang dihasilkan dari 2, 4, dan 6 hari secara berurutan.

Proses pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4 untuk masing-masing *ZnO nanorod* dengan waktu tahan 2, 4, dan 6 hari. Sehingga didapatkan data hasil dari pengukuran foto SEM terhadap diameter *nanorod* dapatkan dilihat pada Tabel 4.1

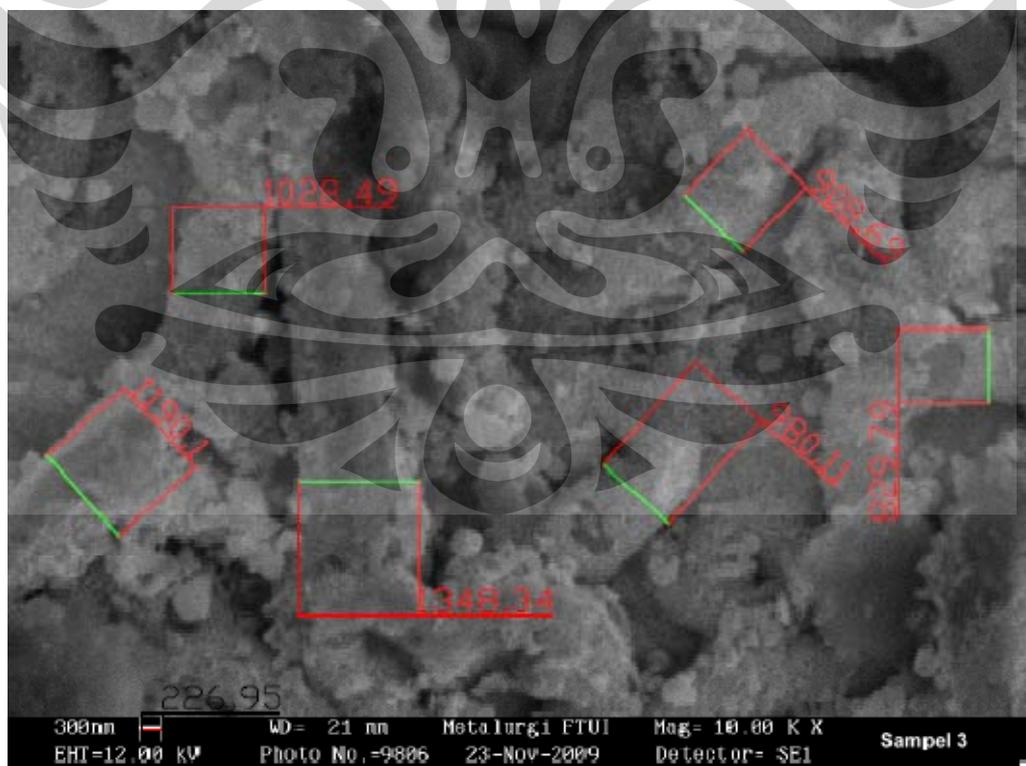
Tabel 4.1 Data ukuran *nanorod* ZnO hasil variasi waktu tahan 2,4, dan 6 hari

waktu tahan (hari)	diameter (nanometer)						
	1	2	3	4	5	6	rata-rata
2	81,76	79,68	82,10	85,91	80,37	84,18	82,33
4	335,32	335,32	346,09	345,69	304,79	327,14	332,39
6	1573,17	1359,54	1782,34	1295,58	1201,18	1096,88	1384,78

**Gambar 4.2** *Nanorod* waktu tahan 2 hari.



Gambar 4.3 *Nanorod* waktu tahan 4 hari.



Gambar 4.4 *Nanorod* waktu tahan 6 hari.

Dari Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa dengan semakin lamanya waktu tahan, maka diameter *nanorod* akan semakin besar. *Nanorod* yang dihasilkan dari waktu tahan 2, 4, dan 6 hari masing-masing mempunyai diameter rata-rata sebesar 82,33; 332,39; dan 1384,78 nm.

4.5.1 Analisis morfologi ZnO *nanorod*

Semakin besarnya ukuran *nanorod*, disebabkan oleh besarnya *nanoseed* awal yang digunakan untuk proses hidrotermal. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar *nanoseed* yang digunakan, maka *nanorod* yang terbentukpun akan semakin besar diameternya

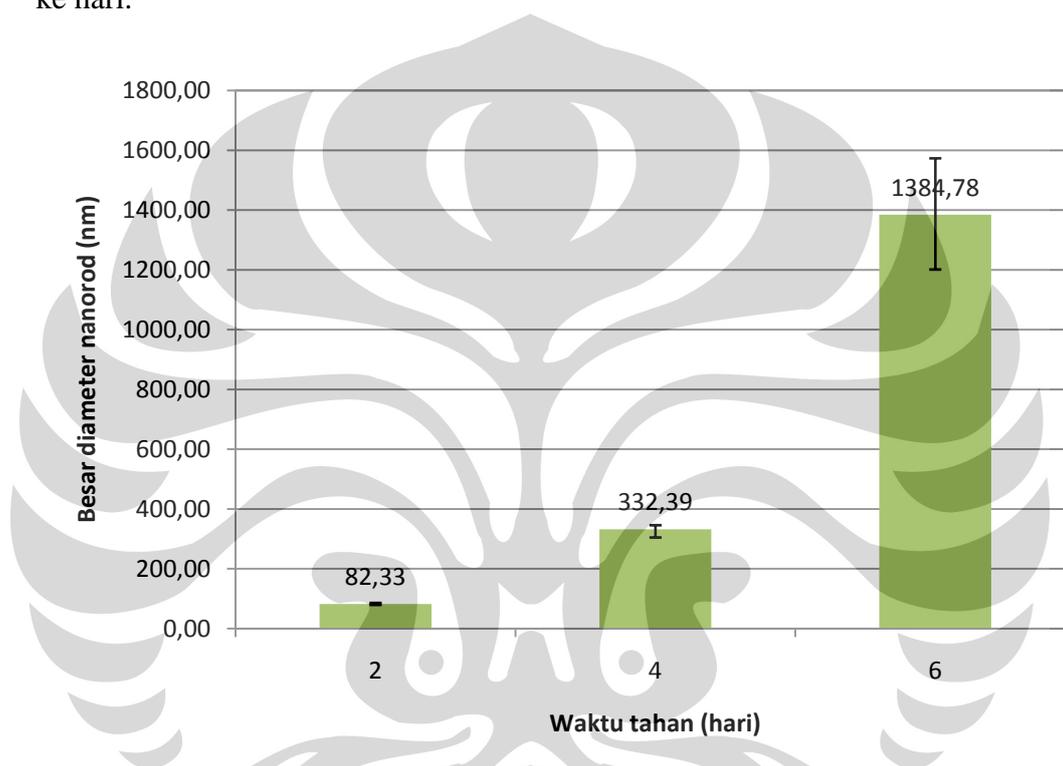
Dari Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa *nanorod* tersebar merata diseluruh bagian. Bentuknya masih berupa batang-batang kecil (*nanorod*). Bentuk *nanorod* ini tidaklah tegak lurus, melainkan agak telungkup.

Dari Gambar 4.3, terlihat bahwa *nanorod* sudah mulai berkaitan atau saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya, selain itu diameternya pun 4x (kali) lebih besar dibandingkan dengan yang berada pada Gambar 4.2. Bentuk dari *nanorod* pun sudah mulai tidak menyerupai batangan, melainkan mulai membentuk suatu jaringan.

Dari Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa *nanorod* yang terbentuk sudah cukup besar yaitu 4x (kali) lebih besar dibandingkan yang terdapat pada Gambar 4.3, selain itu *nanorod* yang satu dengan yang lain saling bertumpuk dan bentuk *nanorod* pun tidak beraturan. Namun, fenomena unik terjadi disini, yaitu *nanorod* yang terbentuk membentuk suatu jaringan *nanorod* kecil di dalam *nanorod* yang besar. *Nanorod* yang kecil-kecil ini berikatan antara satu dengan yang lainnya sehingga membentuk suatu rod yang baru, *nanorod* kecil ini hampir serupa dengan yang ada pada Gambar 4.3, akan tetapi *nanorod* kecil ini bertumpuk antara satu dengan yang lainnya sehingga lebih padat dibandingkan *nanorod* yang terdapat pada sub bab 4.3.

4.5.2 Analisis ukuran diameter dan distribusi ukuran *nanorod* ZnO

Dari penjelasan pada subbab 4.5, diketahui bahwa dengan meningkatnya waktu tahan terhadap nanoseed, maka akan menyebabkan diameter nanorod bertambah besar. Berdasarkan Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa perbesaran yang terjadi membentuk grafik eksponensial. Hal ini mengindikasikan bahwa besar *nanorod* akan menjadi jauh lebih besar secara eksponensial dari hari ke hari.



Gambar 4.5 Variasi waktu tahan larutan terhadap diameter *nanorod*.

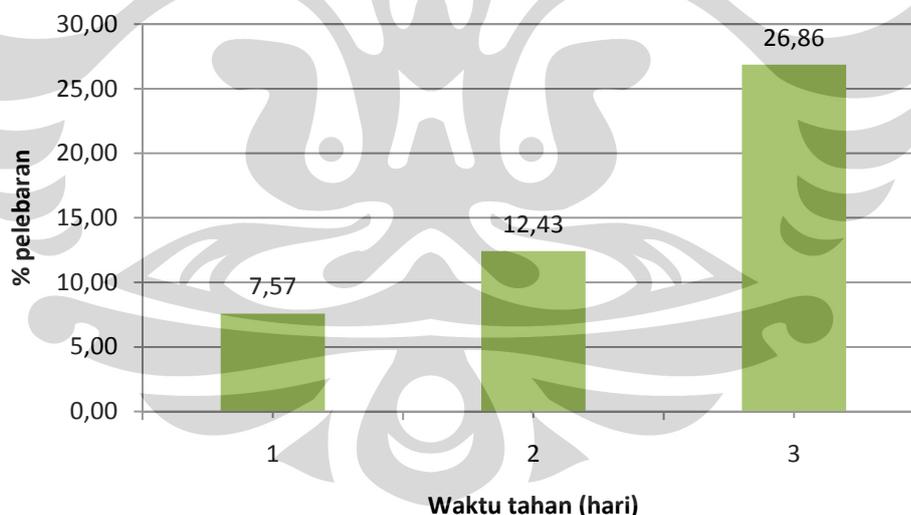
Dari Tabel 4.1 terdahulu dapat terlihat bahwa adanya perbedaan hasil dari pengukuran di dalam 1 foto SEM untuk masing-masing waktu tahan. Sehingga dapat dilakukan analisis tentang seberapa besar terjadi serta kecenderungan sifat dari efek waktu tahan *nanoseed*. Dari Gambar 4.6 dan data di Tabel 4.2, terlihat bahwa persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata dari 2, 4, dan 6 hari adalah 7,57; 12,43; dan 26,86%. Dari hasil data tersebut dapat diketahui bahwa perbandingan persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata antar 2, 4, dan 6 hari mempunyai kelipatan hampir 2 kalinya, sehingga persentase perbedaan diameter maksimum

dan minimum terhadap nilai rata-rata pada waktu tahan 4 hari, lebih besar 2 kali lipat dibandingkan waktu tahan 2 hari. Hal ini juga terjadi pada waktu tahan 6 hari terhadap 4 hari. Perbandingan antara waktu tahan 2, 4, dan 6 hari adalah 1 : 1,65 : 3,55.

Tabel 4.2 Data persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata

waktu tahan (hari)	diameter (nanometer)			% perbedaan diameter
	terbesar	terkecil	rata-rata	
2	85,91	79,68	82,33	7,57
4	346,09	304,79	332,39	12,43
6	1573,17	1201,18	1384,78	26,86

Data mengenai tabel diatas dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata

Dan dari Gambar 4.6, diketahui bahwa persentase perbedaan diameter maksimum dan minimum terhadap nilai rata-rata berbanding lurus dengan waktu tahan. Hal ini menandakan bahwa dengan semakin lamanya waktu tahan, maka

diameter dari *nanorod* menjadi semakin tidak seragam / tidak sama. Sehingga akan semakin sulit untuk melakukan penelitian selanjutnya, karena *nanorod* yang terbentuk mempunyai range diameter yang berbeda jauh antara satu dengan yang lainnya.

4.6. Hasil pengukuran tegangan terbuka (Voc) DSSC

Dalam penelitian ini, dilakukan di dalam 2 kondisi, yaitu

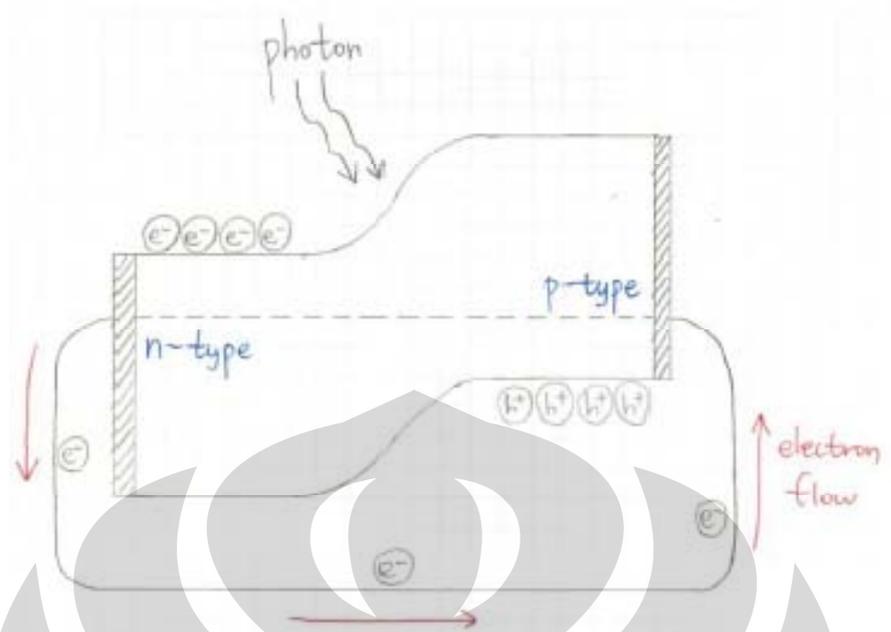
1. Di bawah penyinaran cahaya lampu yang terfokus. Lampu ini berada di sisi atas, sehingga sel uji diletakkan di bagian bawah dengan sisi variabel semikonduktor menghadap ke atas.
2. Pada kondisi dengan cahaya lampu di ruangan terbuka, dengan penyinaran lampu neon ruangan.

Pengujian luar ruang di bawah cahaya matahari tidak memungkinkan dilakukan karena kondisi cuaca yang berubah-ubah dan sinar cahaya matahari yang tidak stabil sehingga menyulitkan untuk mencapai tegangan terbuka pada titik puncaknya. Namun, untuk pengaplikasiannya, pengujian perlu dilakukan di bawah penyinaran cahaya matahari yang sebenarnya untuk mengetahui kemampuan sel surya di kondisi pemakaian yang sebenarnya. Data diambil dari pengujian untuk tegangan sirkuit terbuka (*open circuit voltage*, Voc) dengan memastikan tegangan tertinggi yang muncul. Namun, sering kali voltase yang keluar dari alat yang di uji coba bukanlah Voc, melainkan *short circuit voltage* (Jsc). Hal ini disebabkan oleh lapisan *nanorod* yang sangat tipis sehingga yang terjadi adalah loncatan elektron dengan elektrolit sehingga tidak terjadi perpindahan elektron. Hal ini dapat diketahui melalui besarnya arus dan ketika di berikan cahaya pada kondisi gelap, apakah terdapat voltase yang tinggi atau tidak. Untuk menguji besar arus yang mengalir sangatlah sulit, karena arus yang mengalir sangatlah kecil, sehingga sulit untuk terdeteksi dengan menggunakan AVometer biasa. Untuk mendeteksi arus yang mengalir diperlukan alat Mikro Ampere Meter.

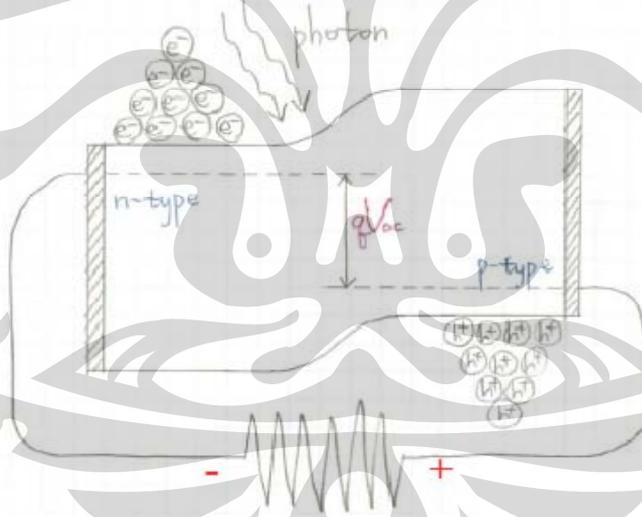
Apabila dalam kondisi cahaya minim tidak terdapat voltase yang cukup besar, maka hal itu cukup untuk menandakan tidak terjadi short circuit voltage. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 (a) untuk gambar rangkaian yang tidak ada cahaya maka tidak akan ada arus atau elektron yang mengalir, sedangkan pada Gambar 4.7 (b) untuk gambar rangkaian yang mengalami *short circuit voltage* dimana tidak terjadi loncatan elektron dari sisi positif ke sisi negatif ketika diberikan sinar cahaya matahari yang memberikan foton untuk menyebabkan material semikonduktor bersifat negatif dan positif pada masing-masing kutub, dan Gambar 4.7 (c) menjelaskan tentang proses terjadinya tegangan terbuka, dimana terjadi loncatan elektron dari sisi positif ke sisi negatif ketika dikenai oleh energi foton.



Gambar 4.7 (a) Rangkaian yang tidak diberi cahaya.



Gambar 4.7 (b) Rangkaian yang mengalami *short circuit voltage*.



Gambar 4.7 (c) Rangkaian yang mengalami *open circuit voltage*.

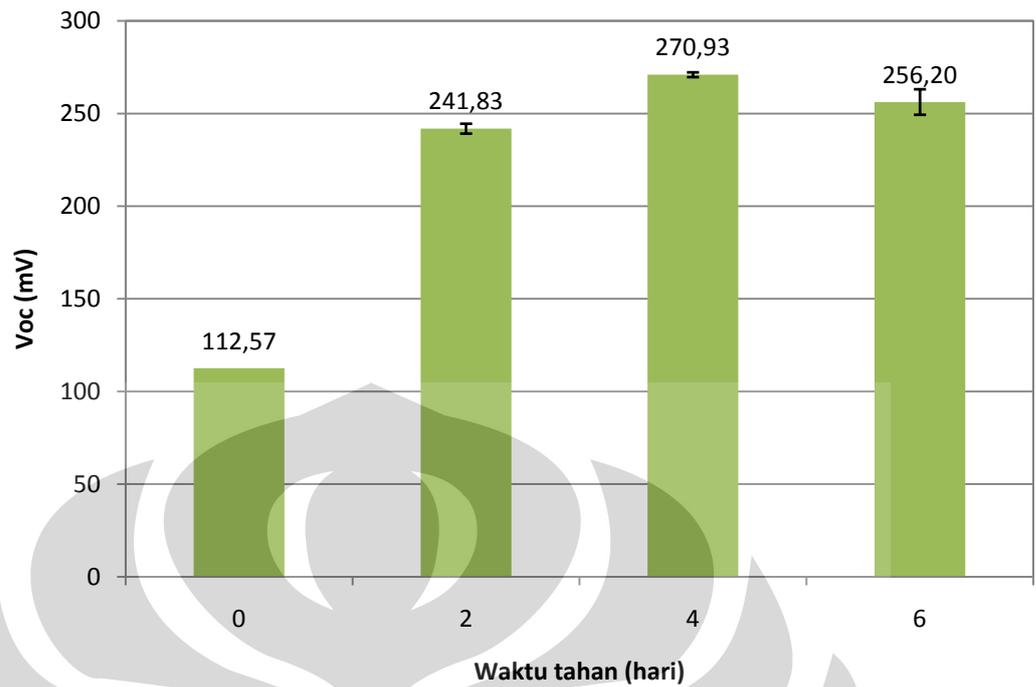
Data dari tegangan terbuka hasil dari pengujian dengan menggunakan alat DSSC terhadap sel surya dapat dilihat pada Tabel 4.3 dimana dilakukan pengujian pada masing-masing sampel sebanyak 3 kali menggunakan 2 kondisi yang berbeda seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Tabel 4.3 Data hasil pengukuran Voc DSSC pada kondisi sebelum dan sesudah pemfokusan cahaya

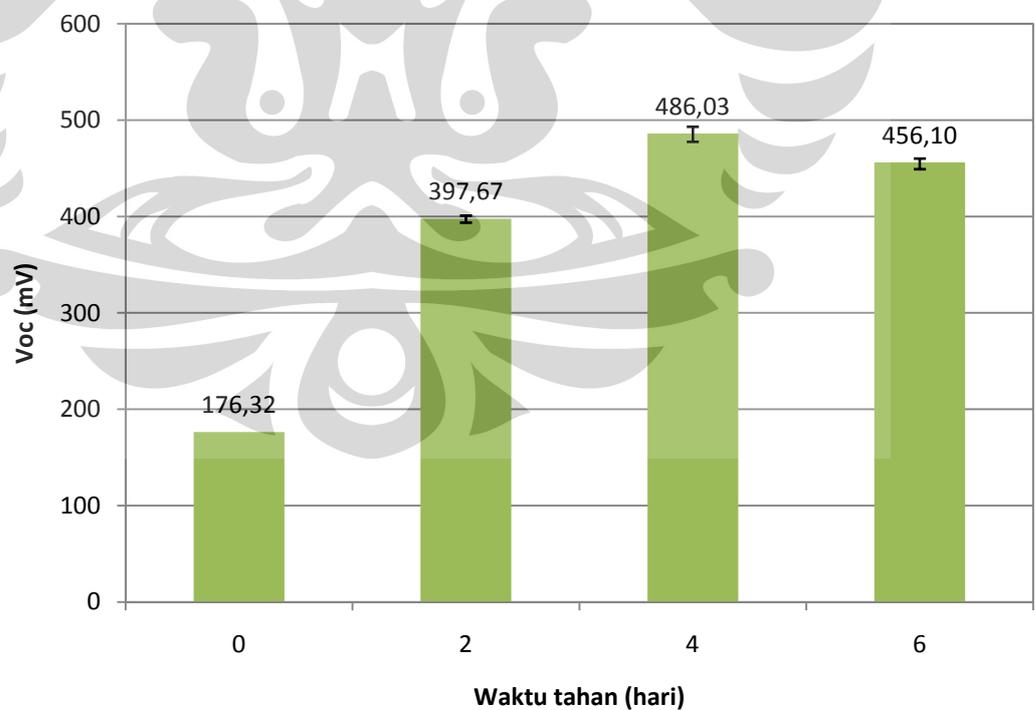
waktu tahan (hari)	Voc sebelum pemfokusan cahaya (mVolt)				Voc sesudah pemfokusan cahaya (mVolt)			
	1	2	3	rata-rata	1	2	3	rata-rata
0				112,57				176,32
2	242,2	238,8	244,5	241,83	401	393,7	398,3	397,67
4	272,2	269,1	271,5	270,93	487,3	493,2	477,6	486,03
6	263,1	255,4	250,1	256,20	460,2	449,2	458,9	456,10

4.6.1 Pengaruh waktu tahan terhadap open circuit voltage (Voc)

Pada bagian ini akan dibahas pengaruh waktu tahan *nanoseed* terhadap tegangan terbuka yang terjadi pada saat pengujian yang dilakukan. Pola efek waktu tahan terhadap tegangan terbuka dapat dilihat pada Gambar 4.8 untuk kondisi DSSC diaplikasikan pada kondisi cahaya ruang, sedangkan Gambar 4.9 untuk kondisi DSSC yang diaplikasikan pada kondisi diberikan cahaya yang terpusat. Pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa Voc yang terbesar setelah diperoleh setelah dilakukan penahanan larutan selama 4 hari, dan ada sedikit kenaikan setelah 4 hari, namun setelah itu terdapat penurunan Voc yang cukup besar. Hal ini menandakan bahwa waktu penahanan larutan yang baik adalah berkisar 4 (96 jam) untuk mendapatkan Voc dengan cahaya ruang saja. Dari Gambar 4.8 tersebut juga dapat dilihat pada garis pelebaran bahwa Voc cenderung stabil ketika saat maksimum dibandingkan dengan pada saat 6 hari yang sangatlah lebar bahkan apabila dibandingkan pelebaran pada saat waktu tahan 2 hari. Hal ini menandakan bahwa kestabilan Voc semakin sulit didapatkan setelah melewati Voc maksimum.



Gambar 4.8 Voc terhadap waktu tahan sebelum pemberian cahaya lampu.



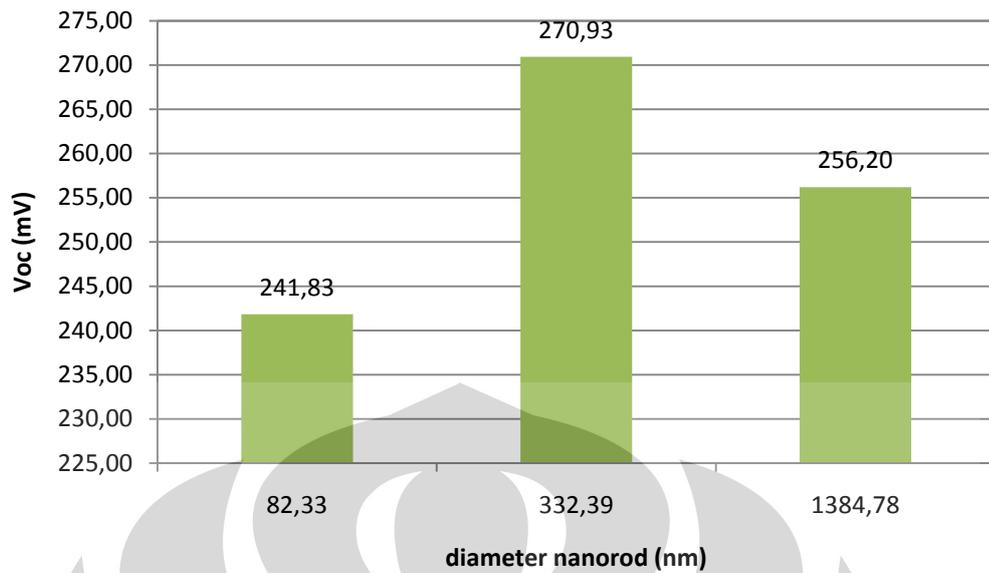
Gambar 4.9 Voc terhadap waktu tahan setelah pemberian cahaya lampu.

Pada Gambar 4.9 memperlihatkan hasil pengukuran DSSC setelah dilakukan pemfokusan cahaya yang memperlihatkan kecenderungan yang tidak terlalu berbeda dengan Gambar 4.8. Hal ini menandakan bahwa waktu tahan yang cocok baik untuk mendapatkan Voc maksimum, baik pada saat kondisi cahaya ruang maupun dengan pemberian cahaya yang terpusat ke sel surya adalah berkisar 4 hari (96 jam) dengan Voc tertinggi dari hasil percobaan pada saat dengan pemfokusan cahaya berkisar antara 486,03 Volt dan untuk Voc pada cahaya lampu ruang adalah 270,93 Volt. Gambar 4.9 mempunyai sifat yang berkebalikan dari Gambar 4.8. Apabila pada Gambar 4.8 Voc cenderung stabil saat mencapai Voc maksimum, Gambar 4.9 Voc cenderung mempunyai pelebaran Voc yang paling besar jika dibandingkan dengan waktu tahan saat 2 dan 6 hari. Hal ini mungkin terjadi disebabkan oleh panas yang ditimbulkan oleh pemfokusan cahaya. Hal ini diketahui karena setelah pemfokusan cahaya, ketika dipegang, sel surya terasa hangat. Hal ini menyebabkan ketidak stabilan ketika mencapai maksimum. Karena seperti yang kita ketahui bahwa suhu juga termasuk salah satu faktor yang akan mempengaruhi kemampuan dari sel surya.

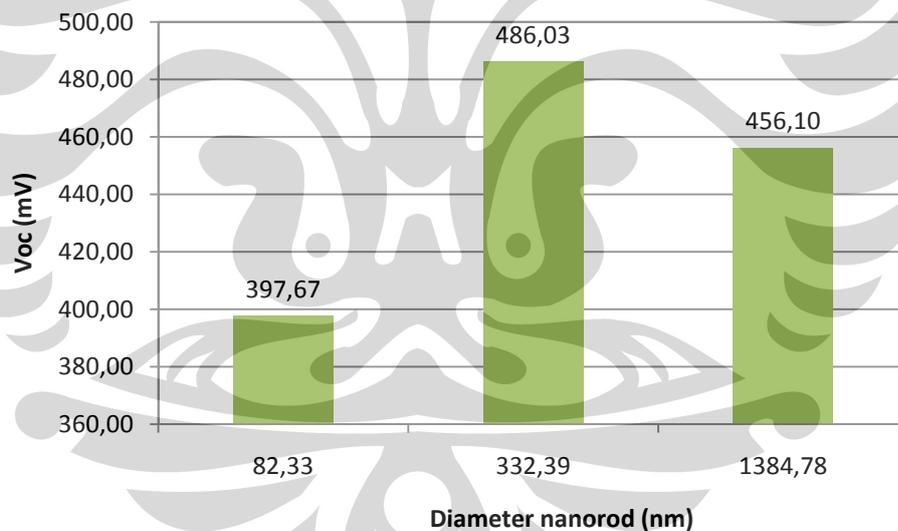
4.6.2 Pengaruh diameter *nanorod* terhadap open circuit voltage (Voc)

Pada subbab ini akan dibahas pengaruh diameter nanorod terhadap tegangan terbuka dari DSSC. Dengan membandingkan efek 2 kondisi dimana tidak terdapat dan terdapat cahaya yang terfokus pada pengaplikasiannya. Pada Gambar 4.10 menunjukkan grafik Voc terhadap diameter *nanorod* sebelum pemberian cahaya lampu terpusat, sedangkan pada Gambar 4.10 grafik Voc terhadap diameter *nanorod* setelah pemberian cahaya lampu terpusat.

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya diameter, maka Voc juga meningkat, sampai titik optimum yaitu berkisar antara 290 mV dengan diameter *nanorod* 750 nm. dan akan kembali mengalami pengurangan Voc dengan meningkatnya diameter *nanorod*.



Gambar 4.10 Voc terhadap diameter *nanorod* sebelum pemberian cahaya lampu terpusat.



Gambar 4.11 Voc terhadap diameter *nanorod* setelah pemberian cahaya lampu terpusat.

Pada Gambar 4.11 juga mempunyai grafik yang hampir sama dengan grafik yang pada Gambar 4.10, yaitu mempunyai titik tertinggi pada *nanorod* berdiameter 750 nm dengan Voc maksimum sekitar 550mV.

Perbedaan dari grafik pada Gambar 4.10 dan 4.11 adalah tingkat kemiringan yang ada. Dimana Gambar 4.10 grafik lebih landai sehingga meningkatnya diameter *nanorod* tidak terlalu berpengaruh terhadap besarnya Voc yang didapatkan. Sedangkan pada Gambar 4.11 grafik cenderung curam sehingga dengan meningkatnya ukuran diameter, juga akan menaikkan Voc yang didapatkan.

Peningkatan Voc yang terjadi baik pada cahaya lampu ruang dan cahaya yang terpusat disebabkan oleh diameter *nanorod*. Pada saat waktu tahan 2 hari, diameter *nanorod* adalah 80,33 nm, sedangkan besar logam Ruthenium di dalam dye yang digunakan mempunyai besar partikel sebesar 10-20 nm^[42]. Karena besar *nanorod* hanya sekitar 4x lebih besar daripada besar partikel dye, maka sulit agar dye dapat menempel di dinding *nanorod* tersebut. Sedangkan pada waktu tahan 4 hari, besar *nanorod* sesuai dengan besar 332,39 nm yang mempunyai besar sekitar 15x besar dari besar partikel dye. Sehingga dye berfungsi secara optimal dan dapat mencapai kemampuan terbaiknya. Disisi lain pada waktu tahan 6 hari, diameter *nanorod* memang besar, namun terjadi penempelan antar *nanorod* yang satu dengan yang lainnya sehingga partikel dye sulit untuk masuk ke dalam ruang yang terdapat di dalam *nanorod*. Hal ini menyebabkan, turunnya kemampuan dari sel surya ini.

4.6.3 Pengaruh waktu tahan terhadap persentase kenaikan open circuit voltage (Voc)

Pada analisis waktu tahan terhadap persentase kenaikan open circuit voltage (Voc) didapatkan peningkatan yang cukup besar yaitu 64,44; 79,39; dan 78,02 % untuk masing-masing 2, 4, dan 6 hari seperti yang terdapat pada Tabel 4.4. Dimana kenaikan tegangan terbuka yang paling besar terjadi ketika pada waktu tahan 4 hari dimana kenaikan yang terjadi sebesar 215,10 Volt dengan persentase kenaikan 79,39 %. Lalu kemudian akan mengalami penurunan setelah mencapai titik maksimum. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.12 bahwa peningkatan Voc sebelum dan sesudah diberikan cahaya yang terpusat.

Tabel 4.4 Data waktu tahan dengan persentase selisih Voc

waktu tahan (hari)	open circuit Voltage (Voc)			% selisih Voc
	sebelum	sesudah	selisih	
0	112,57	176,32	63,75	56,63
2	241,83	397,67	155,83	64,44
4	270,93	486,03	215,10	79,39
6	256,20	456,10	199,90	78,02

**Gambar 4.12** Waktu tahan terhadap persentase peningkatan Voc.

Pada Gambar 4.12 terlihat bahwa peningkatan Voc sebelum dan sesudah diberikan cahaya yang terpusat. Dimana peningkatan yang terbesar terjadi ketika pada waktu tahan 4 hari dimana kenaikan yang terjadi sebesar 215,10 Volt dengan persentase kenaikan 79,39 %. Lalu kemudian akan mengalami penurunan setelah mencapai titik maksimum.

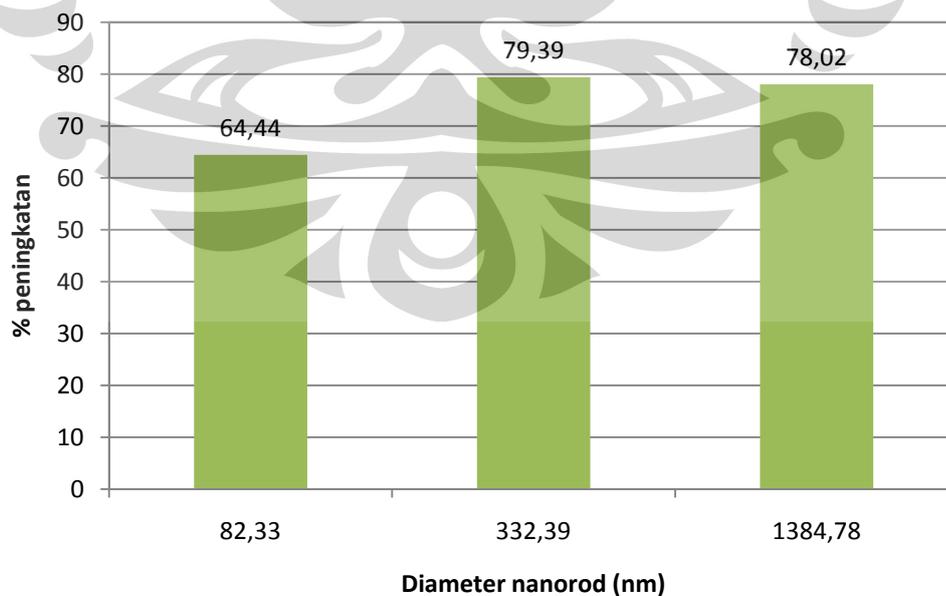
Hal ini tidak berbeda terlalu jauh dengan hasil yang didapatkan pada hasil yang didapatkan pada bagian 4.6.1 dan sama-sama mengalami penurunan kemampuan setelah mencapai titik maksimumnya.

4.6.4 Pengaruh diameter *nanorod* terhadap persentase kenaikan open circuit voltage (Voc)

Dari hasil analisis diameter *nanorod* terhadap persentase kenaikan tegangan terbuka, maka didapatkan hasil persentase kenaikan tegangan terbuka adalah 64,44; 79,39; dan 78,02 % untuk masing-masing besar diameter *nanorod* 82,33; 332,39; 1384,78 nm yang mana data terdapat pada Tabel 4.5. Dimana persentase kenaikan yang tertinggi terjadi pada diameter *nanorod* 332,39 nm dengan persentase kenaikan sebesar 79,39 %. Hal ini sesuai dengan hasil yang didapatkan pada subbab 4.6.3, dimana didapatkan hasil tegangan terbuka maksimum dihasilkan dari waktu tahan 4 hari.

Tabel 4.5 Data *nanorod* dengan % kenaikan kenaikan open circuit voltage (Voc)

diameter <i>nanorod</i> (nm)	open circuit Voltage (Voc)			% kenaikan
	sebelum	sesudah	selisih	
82,33	241,83	397,67	155,83	64,44
332,39	270,93	486,03	215,10	79,39
1384,78	256,20	456,10	199,90	78,02



Gambar 4.13 Diameter *nanorod* terhadap persentase peningkatan Voc.

Dari hasil pada Tabel 4.5, dapat diketahui bahwa dengan terdapat diameter optimum seperti yang tunjukan pada Gambar 4.13. Gambar 4.13 menunjukkan terjadi peningkatan Voc dengan bertambahnya diameter tegangan terbuka. Peningkatan tertinggi terjadi pada diameter *nanorod* 332,39 nm. namun setelah mencapai titik maksimum, maka tegangan terbuka akan mengalami penurunan.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan pada ZnO *nanorod* menggunakan metode hidrothermal dengan efek waktu tahan larutan *nanoseed* terhadap besarnya *open circuit voltage* (Voc) yang dapat dihasilkan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa, :

1. Kehadiran *nanoseed* diperlukan sebagai benih untuk tumbuhnya *nanorod*.
2. Diperlukan lapisan yang sangat tipis agar *nanorod* dapat tumbuh.
3. Waktu tahan yang lama akan meningkatkan ukuran diameter dari ZnO *nanorod*, yaitu pada waktu tahan 2 hari didapatkan *nanorod* dengan diameter 82,33 nm, untuk waktu tahan 4 hari didapatkan 332,39 nm, sedangkan untuk waktu tahan 6 hari adalah 1384,78 nm
4. Ditinjau secara visual, waktu tahan 2 hari akan memberikan bentuk *nanorod* yang lebih baik dibandingkan dengan waktu tahan 4, dan 6 hari.
5. Semakin besar diameter *nanorod*, maka besar diameter *nanorod* cenderung tidak stabil.
6. Didapatkan Voc tertinggi ketika waktu tahan 4 hari, dan setelah 4 hari terjadi penurunan Voc, baik untuk yang memakai cahaya ruang, maupun cahaya yang terpusat yaitu sebesar 270,93 mV pada kondisi cahaya ruang dan 486,03 pada kondisi cahaya yang terpusat.

5.2 Saran

Beberapa saran untuk yang ingin melanjutkan penelitian tentang ZnO *nanorod* pada DSSC, adalah :

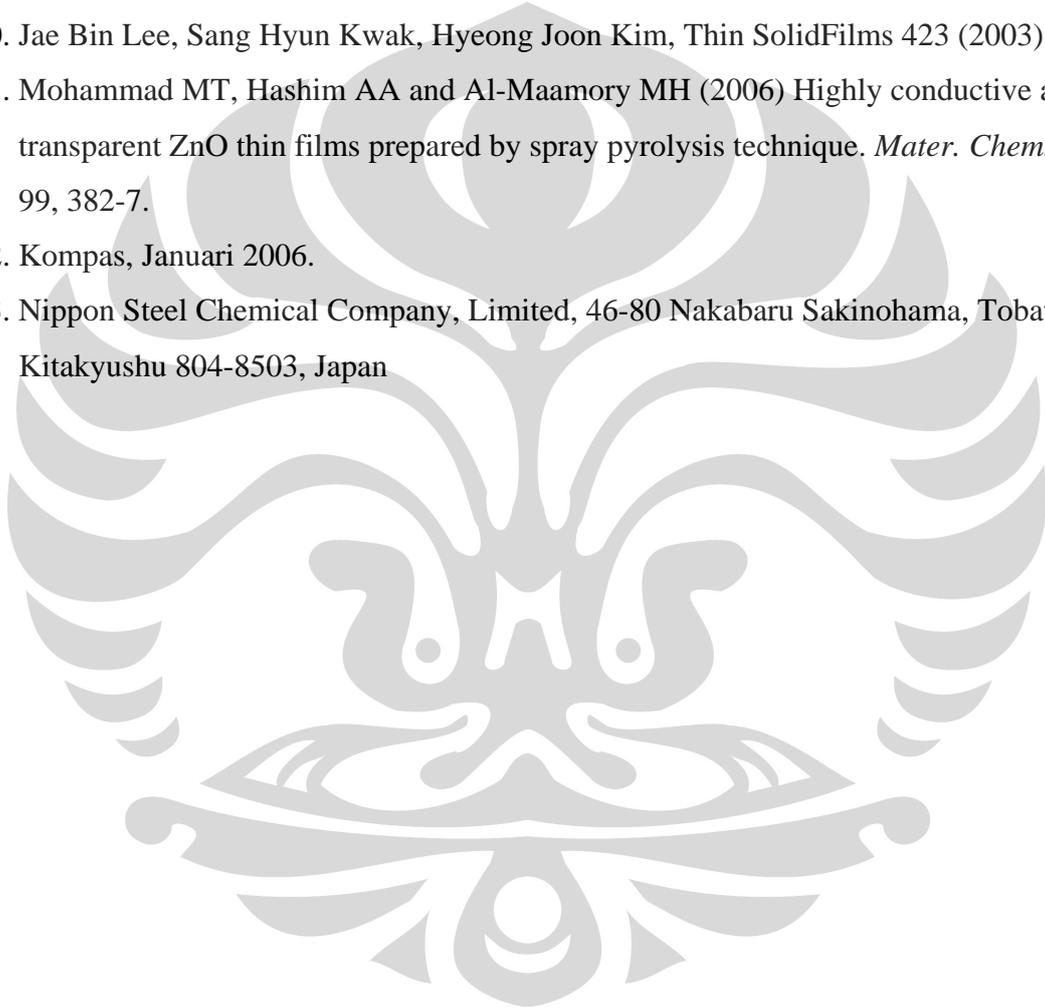
1. Untuk menghasilkan *nanorod* yang tegak lurus, diperlukan tekanan yang cukup saat autoclave digunakan .
2. Pengujian DSSC sebaiknya menggunakan alat DSSC yang memenuhi standar agar hasil pengujian ini serupa dengan hasil yang didapatkan oleh peneliti-peneliti sebelumnya.
3. Permasalahan dasar dalam pengujian DSSC ini adalah mudah menguapnya larutan iodine yang berfungsi sebagai elektrolit sehingga diperlukan seal yang dapat menutup pinggiran DSSC, agar iodine tidak menguap, karena dengan penambahan iodine akan menyebabkan berkurangnya efisiensi DSSC sebab *dyanya* ikut terbawa oleh iodine.
4. Pada penggunaan secara luas, DSSC ini akan menggunakan cahaya matahari, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut apabila DSSC digunakan pada cahaya matahari
5. *Nanorod* di dalam DSSC hanya dapat menyerap panjang gelombang tertentu, dan untuk mendapatkan efisiensi yang maksimum, diperlukan data mengenai efek dari besar panjang gelombang cahaya yang digunakan pada DSSC ini.

DAFTAR PUSTAKA

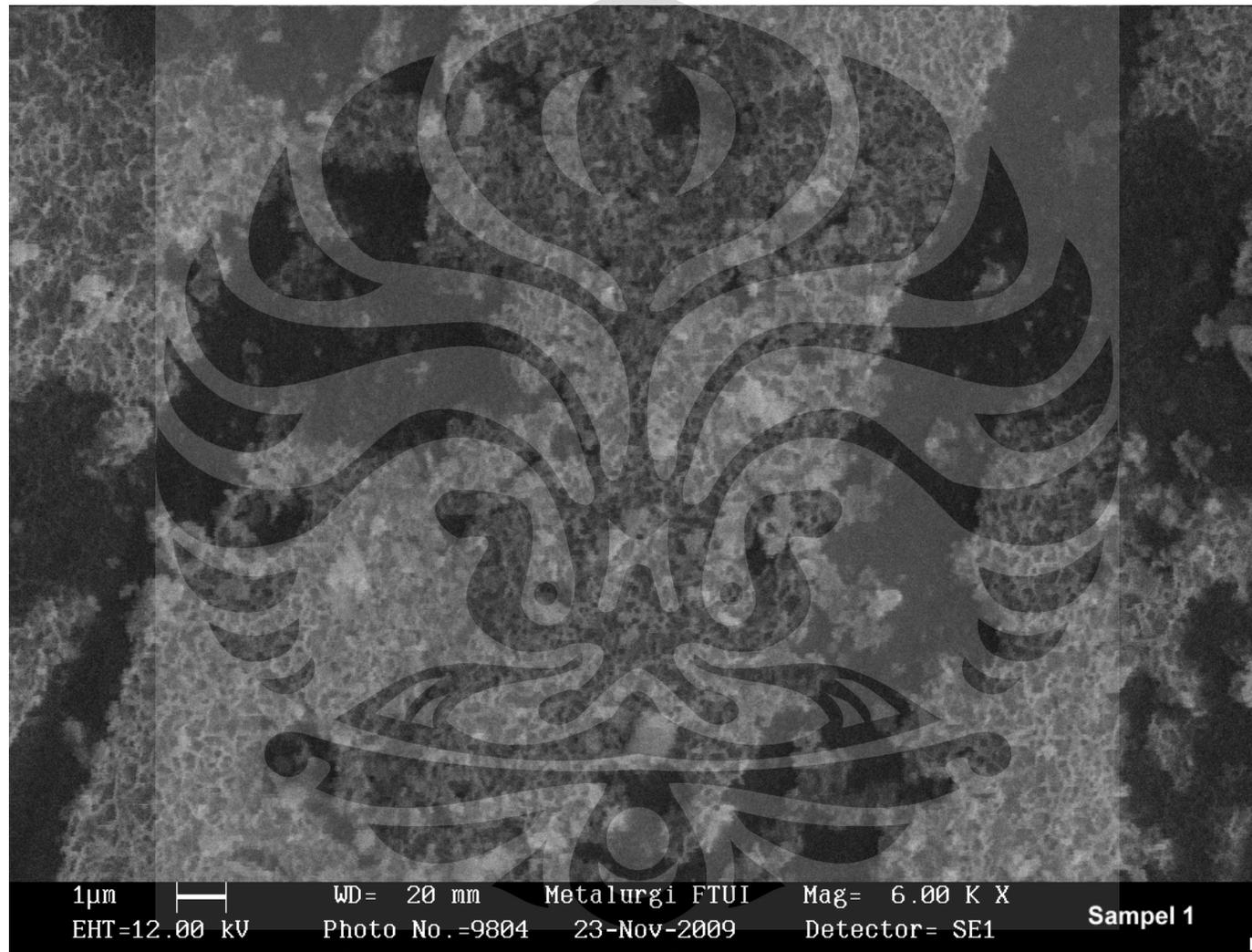
1. URL : <http://www.csa.com/discoveryguides/nano/overview.php> pada 21 maret 2009
2. URL : www.cnms.ornl.gov/nanosci/lp14.shtm pada 21 maret 2009
3. VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, "Hydrothermal Growth of Periodic, Single-Crystal ZnO Microrods and Microtunnels", *Adv. Mater.* 2006, 18, 2453–2457
4. Hongxia Zhang, Jing Feng, Jun Wang, Minlin Zhang, "Preparation of ZnO nanorods through wet chemical method", *Materials Letters* 61 (2007) 5202–5205
5. Service, R. F. (2005). "Solar energy - Is it time to shoot for the Sun?", *Science* 309(5734): 548-551
6. en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell pada 21 maret 2009
7. Goetzberger, A., Hoffmann, V. U. (2005). "Photovoltaic Solar Energy Generation", Freiburg: Springer
8. URL : http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process pada 23 maret 2009
9. D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, *A New Silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power*, *J. Appl. Phys.* 25 (1954) 676.
10. Adolf Goetzberger, Christopher Hebling, Hans-Werner Schock, *Photovoltaic materials, history, status and outlook*, *Materials Science and Engineering R* 40 (2003) 1–46.
11. URL : <http://102fm-itb.org/?s=devais> pada tanggal 25 maret 2009
12. Lawrence L. Kazmerski, *Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview*, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150 (2006) 105–1
13. O'Regan, B., Grätzel, M. (1991) *Nature* 353 737
14. LJ LE ROUX, S HIETKAMP, F CUMMINGS (2006). *Dye solar cells: A different approach to solar energy*, CSIR Materials Science and Manufacturing.
15. Akhmad Herman Yuwono, Alfian Ferdiansyah, dan Arif Rahman, *Sel surya tersensitasi zat pewarna berbasis nanokristalin ZnO dan TiO₂*, Laporan Hibah Strategis Nasional 2009, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2009
16. Gregg, B. A. (2003) "Excitonic Solar Cell", *J. Phys. Chem. B.* 107:4688-4698
17. G. K. R. Senadeera and K-J. Jiang, "Synthesis of Triphenylamine Trisazo Dye and Study of its Uses in DyeSensitized Solar Cells", *Sri Lankan Journal of Physics*, Vol. 6 (2005) 43-50

18. MICHAEL GRÄTZEL dan JAMES R. DURRANT, “*DYE-SENSITISED MESOSCOPIC SOLAR CELLS*”, *Imperial College, London SW7 2AZ, UK*
19. Durstock, M. F., et al. 2001, Electrostatic self-assembly as a means to create organic photovoltaic devices, *Synthetic Metals*, 116, 373-377
20. Grünwald R., Tributsch H., 1997, Mechanism of Instability in Ru-Based Sensitization Solar Cells, *J. Phys. Chem. B*, 101, 2564-2575
21. URL : <http://www.solaronix.ch/products/rutheniumdyes> pada tanggal 11 April 2009
22. Hiramoto, M., et al., 1991, Three-layered organic solar cell with a photoactive interlayer of codeposited pigments, *Appl. Phys. Lett.*, 58, 10, 1062-1064
23. URL : <http://acronyms.thefreedictionary.com/P3HT> pada tanggal 11 April 2009
24. M. Quintana, T. Edvinsson, A. Hagfeld and G. Boschloo, *J. Phys. Chem. C*, 2007, 111, 1035.
25. K. Keis, C. Bauer, G. Boschloo, A. Hagfeldt, K. Westermark, H. Rensmo and H. Siegbahn, *J. Photochem. Photobiol., A*, 2002, 148, 57.
26. L. E. Greene, M. Law, J. Goldberger, F. Kim, J. C. Johnson, Y. Zhang, R. J. Saykally and P. Yang, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, 2003, 42(26), 303
27. A. B. F. Martinson, J. E. McGarrah, M. O. K. Parpia and J. T. Hupp, *Phys. Chem. Chem. Ph.*, 2006, 8, 4655.
28. Ph. Mavropoulos, O. Wunnicke, and P. H. Dederichs. Ballistic spin injection and detection in Fe/semiconductor/Fe junctions. *Physical Review B*, 66:024416, 2002.
29. X. Wang, D.-S. Wang, R. Wu, and A. J. Freeman. Validity of the force theorem for magnetocrystalline anisotropy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 159:337, 1996.
30. Kaneko, I., Okura, M. “*Photocatalysis: Science and Technology*”, Springer, 2002
31. *Keld West*, “*Dye-Sensitised Solar Cells*” Dansk Polymercenter
32. Phalippou, J. (2000), “*Sol-Gel: A Low Temperature Process for The Materials of The New Millenium*”,
33. Guozhong Cao, “*Growth of Oxide Nanorod Arrays through Sol Electrophoretic Deposition*”, *J. Phys. Chem. B* 2004, 108, 19921-19931
34. Gonzalez-Valls, I., Lira-Cantu, M. (November 2008). “*Vertically-aligned Nanostructures of ZnO for Excitonic Solar Cells: a Review*”. *Energy Environ. Sci.*, RSC Publishing
35. Wesley Tennyson, “*X-ray Diffraction*”

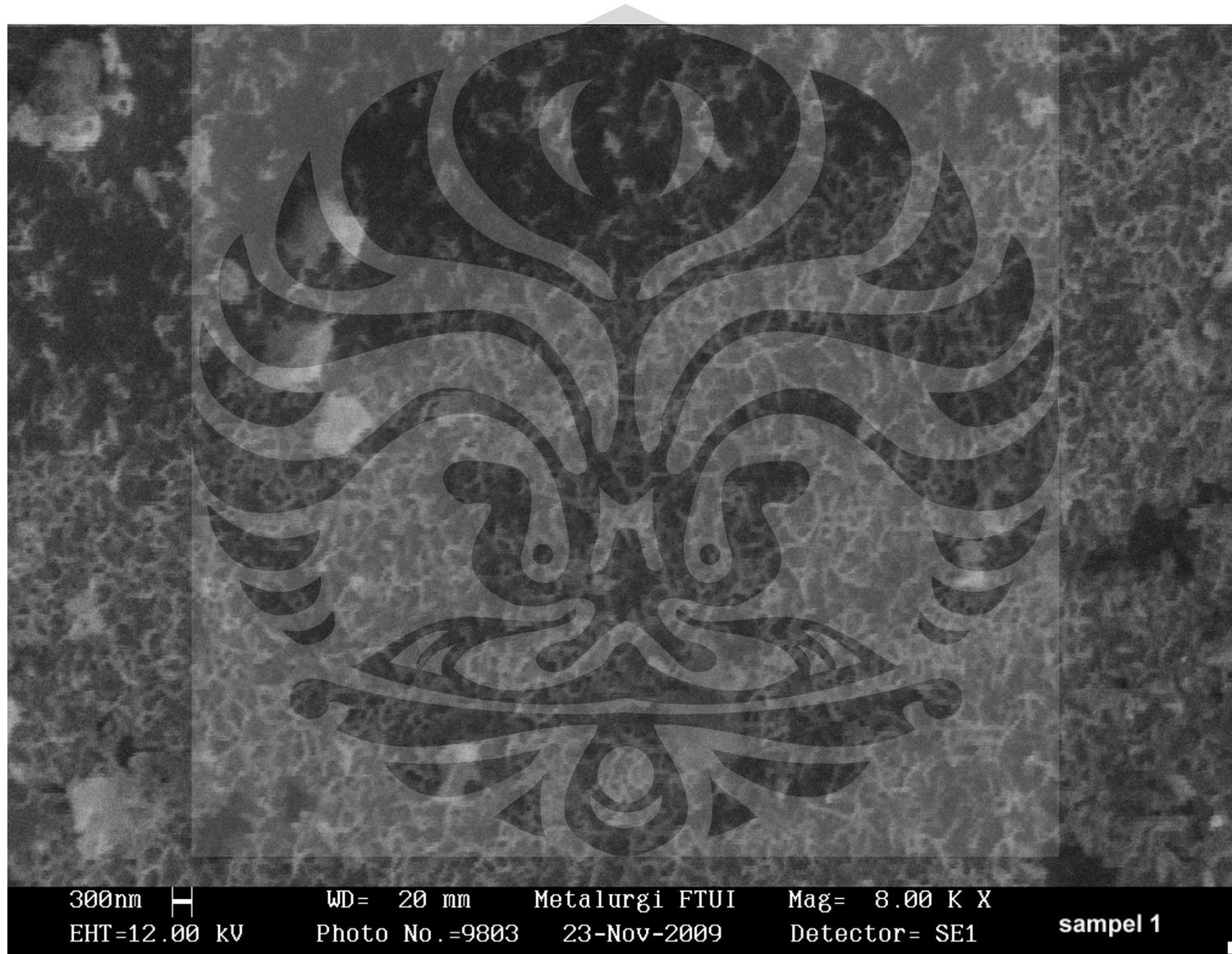
36. L. E. Greene, M. Law, D. H. Tan, M. Montano, J. Goldberger, G. Somorjai, and P. D. Yang, "General route to vertical ZnO nanowire arrays using textured ZnO seeds," *Nano Letters*, vol. 5, pp. 1231- 1236, Jul 2005.
37. Jing-Shun Huang¹ and Ching-Fuh Lin, "Controlled Growth of Zinc Oxide Nanorod Array in Aqueous Solution by Zinc Oxide Sol-gel Thin Film in Relation to Growth Rate and Optical Property", Taipei, 106 Taiwan, R.O.C.
38. J.A. Sans, A. Segura, M. Mollar, B. Mari, *Thin Solid Films* 453-454 (2004) 251.
39. G.H. Lee, *SolidState Commun.* 128 (2003) 351.
40. Jae Bin Lee, Sang Hyun Kwak, Hyeong Joon Kim, *Thin SolidFilms* 423 (2003) 262.
41. Mohammad MT, Hashim AA and Al-Maamory MH (2006) Highly conductive and transparent ZnO thin films prepared by spray pyrolysis technique. *Mater. Chem. Phys.* 99, 382-7.
42. Kompas, Januari 2006.
43. Nippon Steel Chemical Company, Limited, 46-80 Nakabaru Sakinohama, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8503, Japan



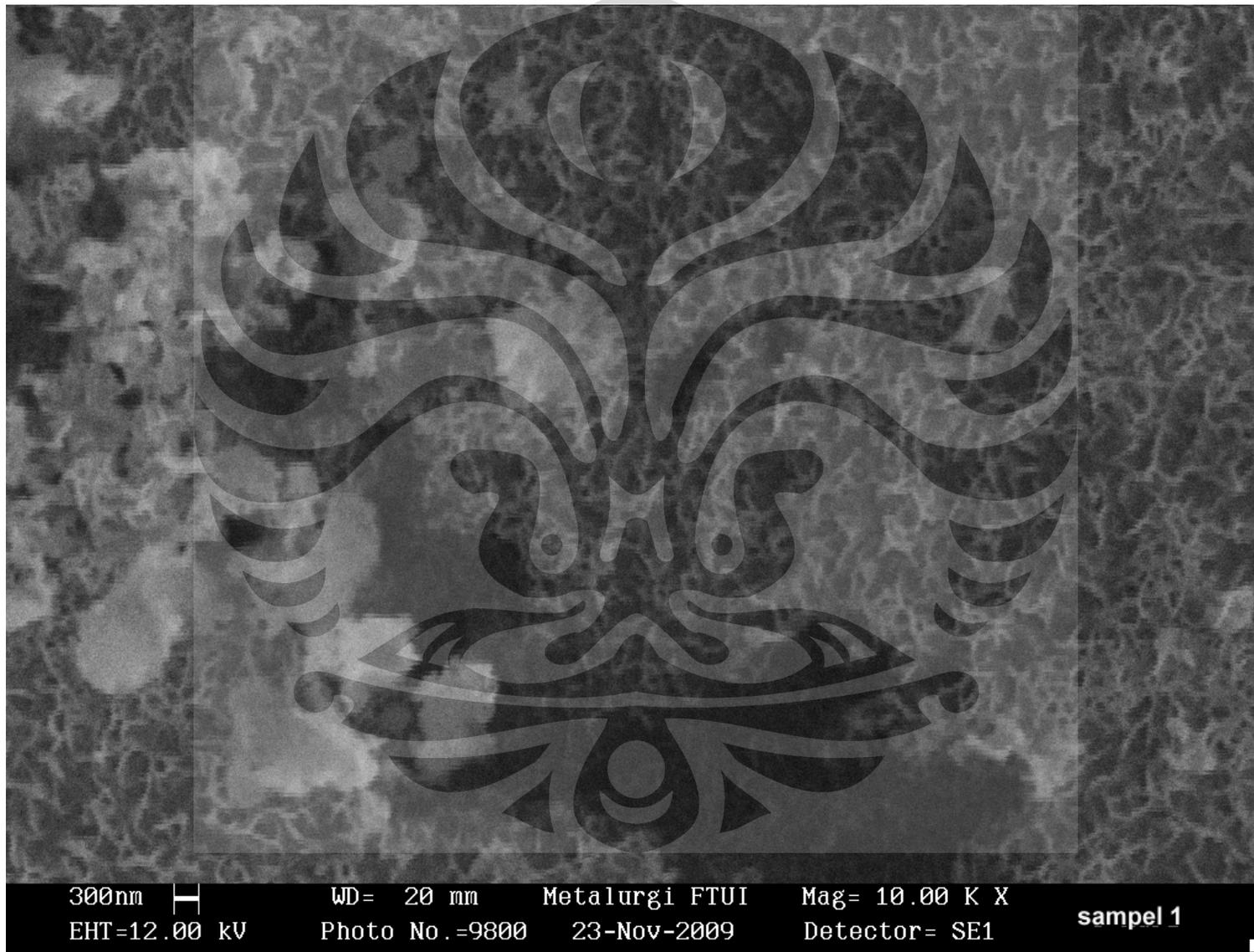
LAMPIRAN 1

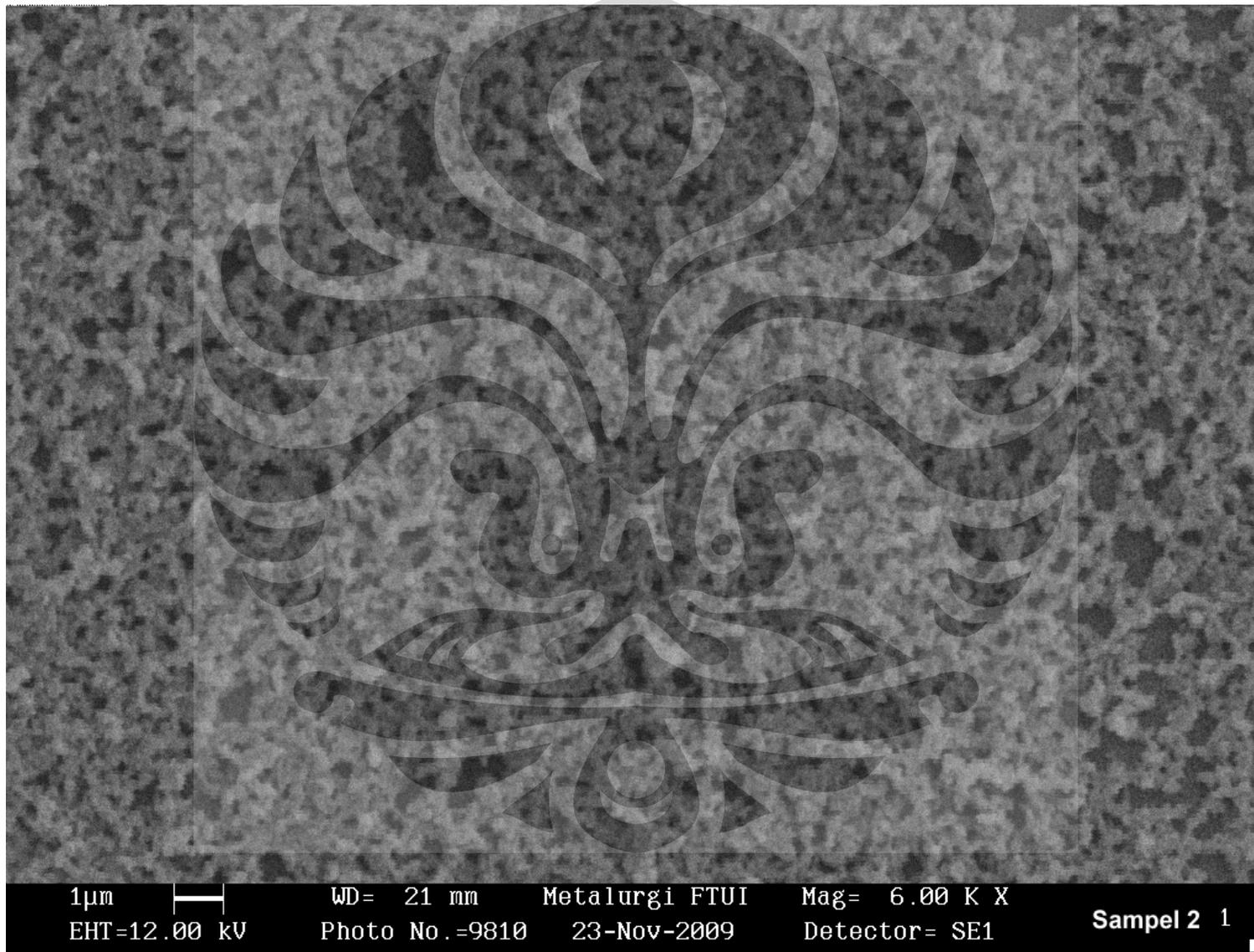


LAMPIRAN 1 (lanjutan)

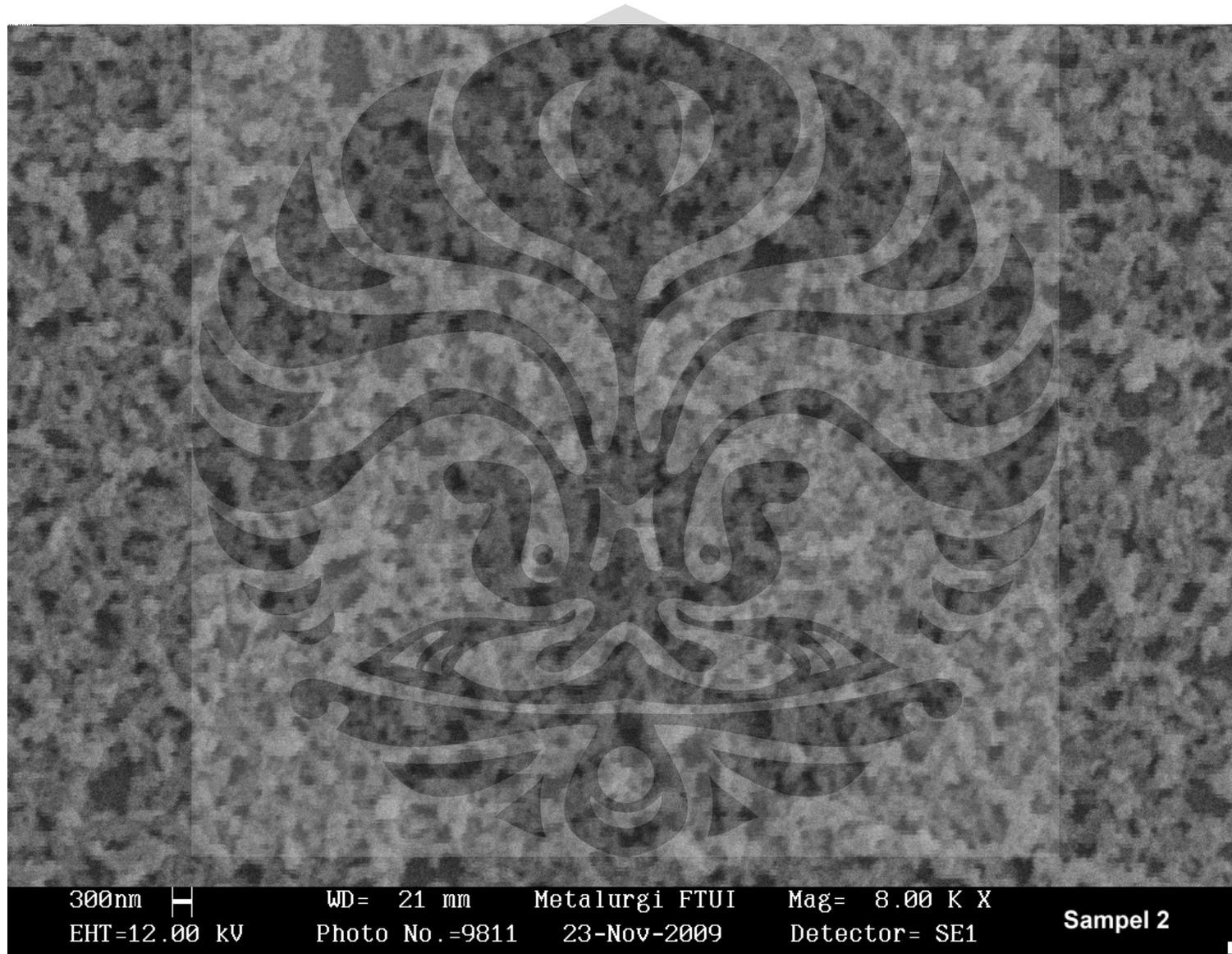


LAMPIRAN 1 (lanjutan)

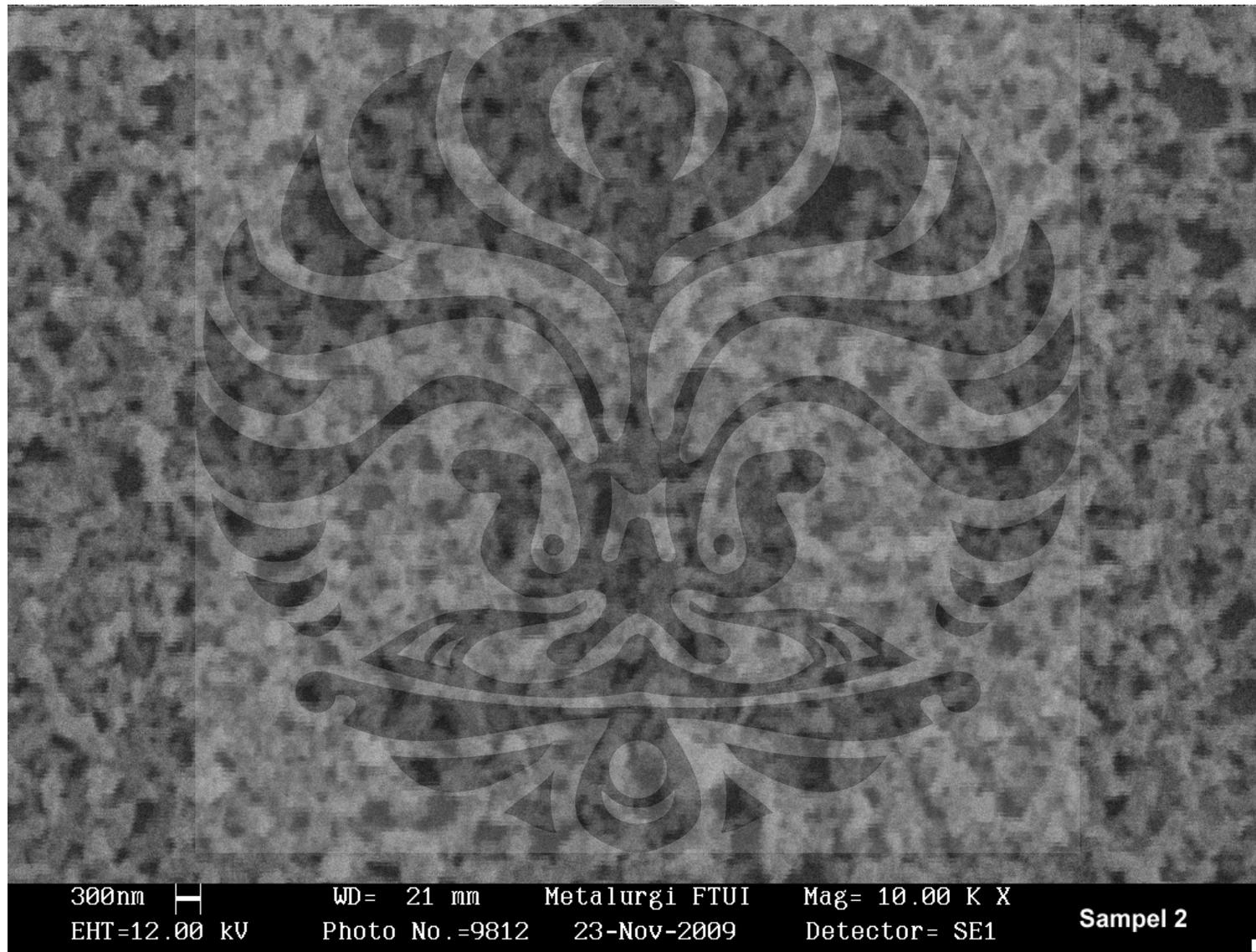




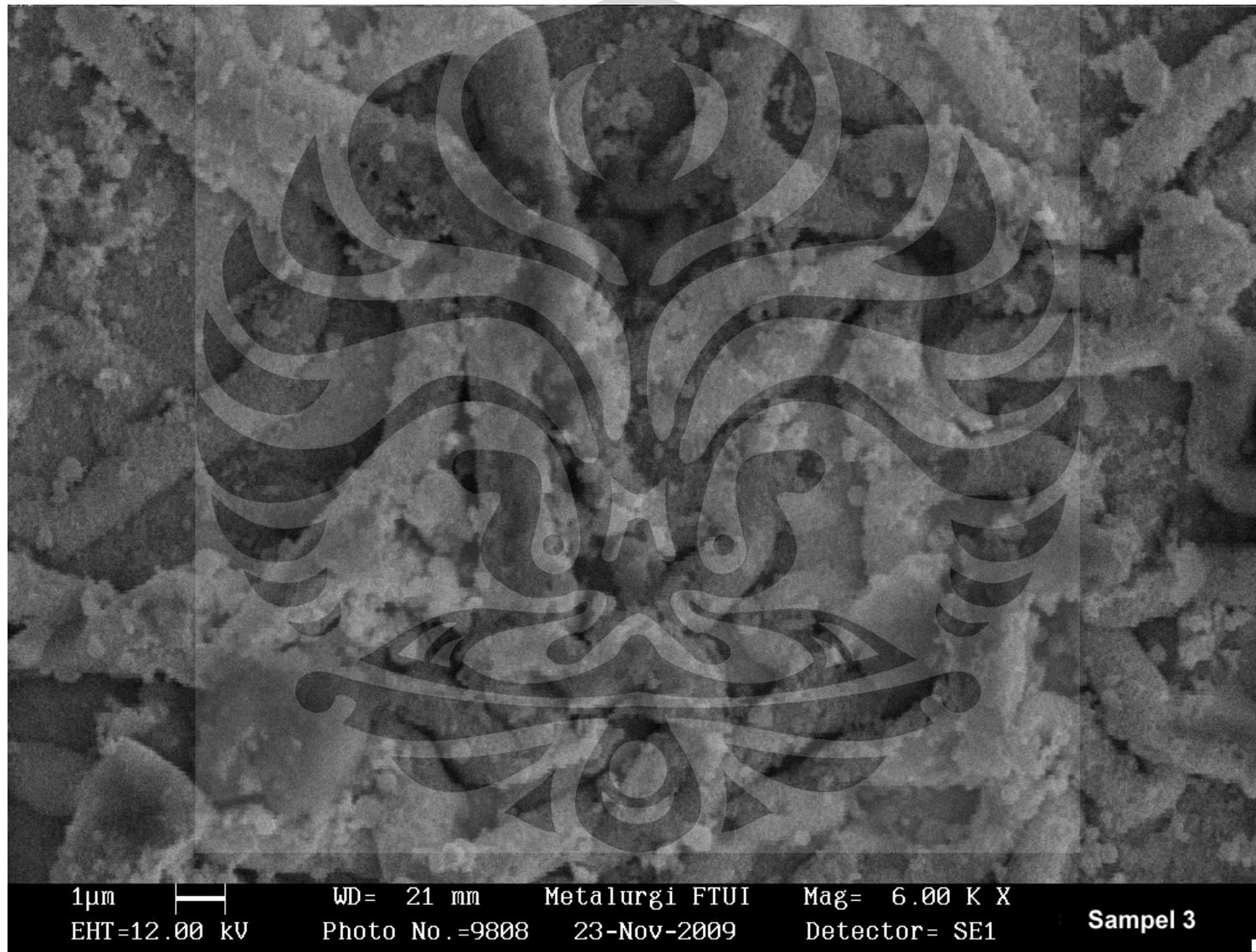
LAMPIRAN 1 (lanjutan)



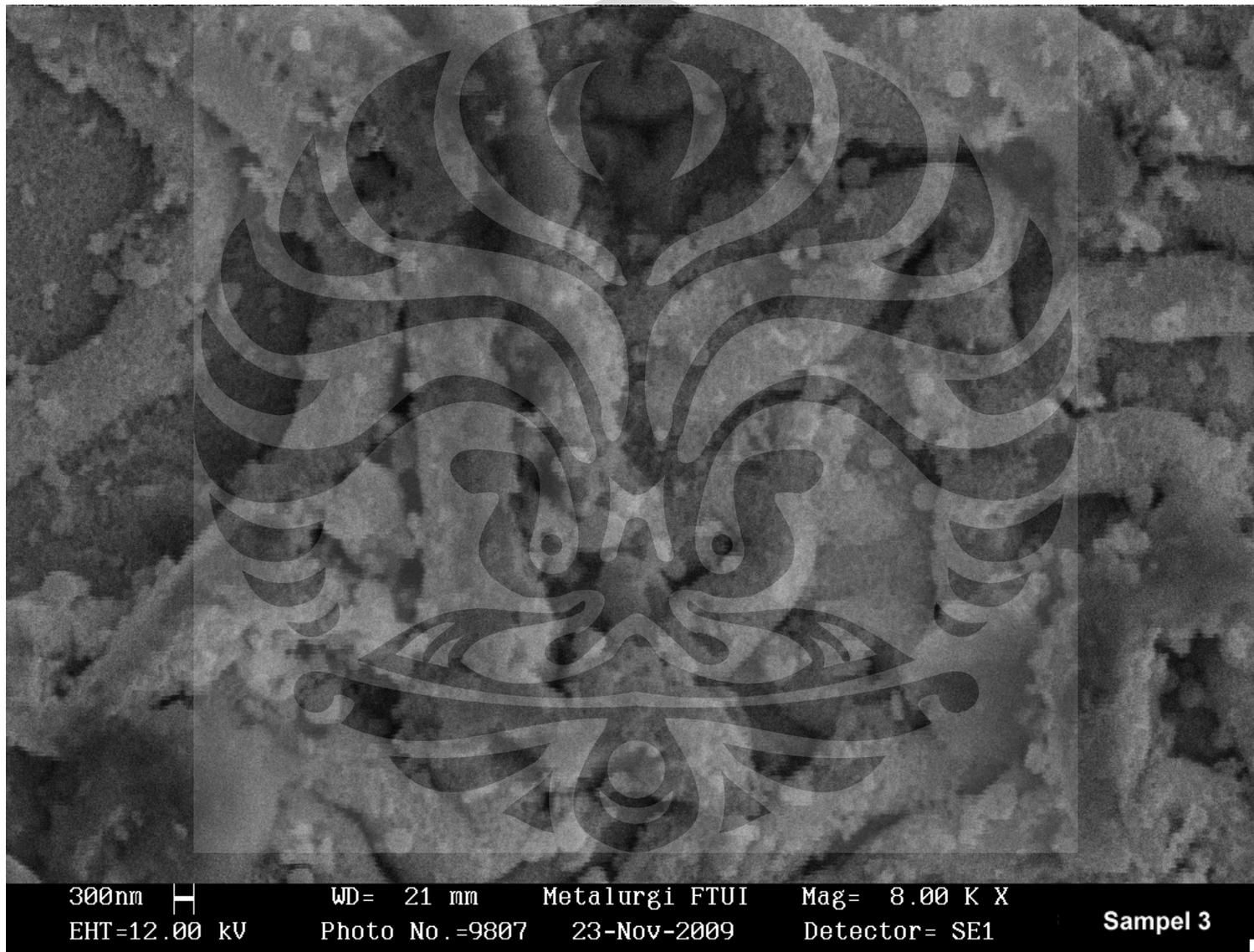
LAMPIRAN 1 (lanjutan)



LAMPIRAN 1 (lanjutan)



LAMPIRAN 1 (lanjutan)



LAMPIRAN 1 (lanjutan)

