



**PENGARUH PROSES *HYDROTHERMAL NANOFIBER ZnO*
TERHADAP UNJUK KERJA *DYE – SENSITIZED SOLAR
CELL (DSSC)***

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh :
Dimas Ilham Rasyid
131910101088

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**



**PENGARUH PROSES *HYDROTHERMAL NANOFIBER ZnO*
TERHADAP UNJUK KERJA *DYE – SENSITIZED SOLAR
CELL (DSSC)***

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh :
Dimas Ilham Rasyid
131910101088

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Dengan segala puja dan puji syukur kepada Tuhan yang Maha Esa dan atas dukungan dan do'a dari orang – orang tercinta, akhirnya skripsi ini dapat dirampungkan dengan baik dan tepat pada waktunya. Oleh karena itu, dengan rasa bangga dan bahagia saya khaturkan rasa syukur dan terimakasih saya kepada:

1. Tuhan YME, karena hanya atas izin dan karuniaNya maka skripsi ini dapat dibuat dan selesai pada waktunya. Puji syukur yang tak terhingga pada Tuhan penguasa alam yang meridhoi dan mengabulkan segala do'a.
2. Bapak dan Ibu saya, yang telah memberikan dukungan moril maupun materi serta do'a yang tiada henti untuk kesuksesan saya, karena tiada kata seindah lantunan do'a dan tiada do'a yang paling khusuk selain do'a yang terucap dari orang tua. Ucapan terimakasih saja takkan pernah cukup untuk membalas kebaikan orang tua, karena itu terimalah persembaha bakti dan cinta ku untuk kalian bapak ibuku.
3. Bapak dan Ibu Dosen pembimbing, penguji dan pengajar, yang selama ini telah tulus dan ikhlas meluangkan waktunya untuk menuntun dan mengarahkan saya, memberikan bimbingan dan pelajaran yang tiada ternilai harganya, agar saya menjadi lebih baik. Terimakasih banyak Bapak dan Ibu dosen, jasa kalian akan selalu terpatri di hati.
4. Saudara saya (Kakak dan Adik), yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, senyum dan do'anya untuk keberhasilan ini, cinta kalian adalah memberikan kobaran semangat yang menggebu, terimakasih dan sayang ku untuk kalian.
5. Sahabat dan Teman Tersayang, tanpa semangat, dukungan dan bantuan kalian semua tak kan mungkin aku sampai disini, terimakasih untuk canda tawa, tangis, dan perjuangan yang kita lewati bersama dan terimakasih untuk kenangan manis yang telah mengukir selama ini. Dengan perjuangan dan kebersamaan kita pasti bisa! Semangat!!

Terimakasih yang sebesar-besarnya untuk kalian semua, akhir kata saya persembahkan skripsi ini untuk kalian semua, orang-orang yang saya sayangi. Dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna untuk kemajuan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang, Aamiinnn.



MOTO

"Kemenangan yang seindah-indahnya dan sesukar-sukarnya yang boleh direbut oleh manusia ialah menundukkan diri sendiri." (Ibu Kartini)

"Pendidikan merupakan perlengkapan paling baik untuk hari tua." (Aristoteles)

"Hanya kebodohan meremehkan pendidikan." (P.Syrus)

"Ketergesaan dalam setiap usaha membawa kegagalan." (Herodotus)

"Dia yang tahu, tidak bicara. Dia yang bicara, tidak Tahu." (Lao Tse)

"Kegagalan hanya terjadi bila kita menyerah." (Lessing)

"Kesopanan adalah pengaman yang baik bagi keburukan lainnya." (Cherterfield)

"Siapa yang kalah dengan senyum, dialah pemenangnya." (A. Hubard)

"Kebijakan dan kebajikan adalah perisai terbaik." (Aspinal)

"Bunga yang tidak akan layu sepanjang jaman adalah kebajikan." (William Cowper)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dimas Ilham Rasyid

NIM : 131910101088

Judul Skripsi : “Pengaruh proses hydrothermal nanofiber ZnO terhadap unjuk kerja *dye – sensitized solar cells* (DSSC)”

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan skripsi ini dengan judul Pengaruh proses *hydrothermal nanofiber* ZnO terhadap unjuk kerja *dye – sensitized solar cells* (DSSC) berdasarkan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli dari saya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya belum pernah diajukan pada insitusi manapun dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan an kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 15 Desember 2017

Menyatakan,

Dimas Ilham Rasyid

131910101088

SKRIPSI

**PENGARUH PROSES *HYDROTHERMAL* NANOFIBER ZnO TERHADAP
UNJUK KERJA *DYE – SENSITIZED SOLAR CELL* (DSSC)**

Oleh

Dimas Ilham Rasyid

NIM 131910101088

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Harry Sutjahjono, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Imam Sholahuddin, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Pengaruh Proses *Hydrothermal* Nanofiber ZnO terhadap Unjuk Kerja *Dye – Sensitized Solar Cell* (DSSC)” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Kamis, 30 November 2017

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Sekretaris,

Hary Sutjahjono, S. T., M. T.
NIP 19681205 199702 1 002

Imam Sholahuddin, S. T., M. T.
NIP 19811029 2008 12 1 003

Anggota I,

Anggota II,

Dr. R. Koekoeh KW., S. T., M. Eng.
NIP 19670708 199412 1 001

Dr. Nasrul Ilminnafik, S. T., M. T.
NIP 19711114 199903 1 002

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.
NIP 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Pengaruh Proses Hydrothermal Nanofiber ZnO terhadap Unjuk Kerja Dye Sensitized Solar Cell (DSSC); Dimas Ilham Rasyid, 131910101088; 51 halaman, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Energi surya dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan, karena energi fosil yang semakin menipis dan juga ramah lingkungan. Dalam hal ini perangkat fotovoltaic DSSC digunakan untuk mengkonversi energi foton menjadi listrik. DSSC dalam penelitian ini terdiri dari *dye* ekstrak daun alfafa, semikonduktor *nanofiber* dan *nanofiber/nanowire* ZnO, elektrolit iodine, dan kaca konduktif FTO. Metode yang digunakan dalam fabrikasi *nanofiber* ZnO menggunakan metode *electrospinning*, sedangkan untuk fabrikasi *nanofiber/nanowire* ZnO menggunakan metode *electrospinning* dan dilanjutkan dengan proses *hydrothermal*. Proses *hydrothermal* menumbuhkan *nanowire* pada *nanofiber* ZnO, sehingga luasan aktif pada semikonduktor ZnO meningkat. Dengan luasan aktif yang besar akan meningkatkan efisiensi dari DSSC. Morfologi *nanofiber* ZnO dan *nanofiber/nanowire* ZnO dikarakterisasi menggunakan SEM, sedangkan unjuk kerja DSSC diuji dibawah lampu halogen 1000W. DSSC dibuat dengan lapisan *nanofiber* 2 layer, 3 layer, 4 layer dan 5 layer menghasilkan efisiensi berturut – turut sebesar 0,0030%, 0,0076%, 0,0103% dan 0,0082%. Sedangkan DSSC dengan semikonduktor *nanofiber/nanowire* ZnO 2 layer, 3 layer, 4 layer dan 5 layer menghasilkan efisiensi berturut turut sebesar 0,0067%, 0,0163%, 0,0747%, 0,0025%. Hasil akhir menunjukkan bahwa semikonduktor dengan luasan aktif yang meningkat pada struktur *nanofiber/nanowire* ZnO akan meningkatkan unjuk kerja DSSC.

SUMMARY

The Influence of Hydrothermal Nanofiber ZnO on Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) Performance; Dimas Ilham Rasyid, 131910101088; 2017; 51 pages; Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Jember University.

Solar energy can be utilized as renewable energy, because fossil energy is increasingly depleted and also environmentally friendly. In this case DSSC photovoltaic devices are used to convert photon energy into electricity. The DSSC in this study consisted of alfafa leaf extract dye, nanofiber and nanowire ZnO semiconductor, iodine electrolyte, and FTO conductive glass. The method used in fabrication of ZnO nanofiber using electrospinning method, while for fabrication of nanofiber / nanowire ZnO using electrospinning method and continued with hydrothermal process. The hydrothermal process generates nanowire in ZnO nanofiber, so the active area of the ZnO semiconductor increases. With a large active area will increase the efficiency of the DSSC. ZnO nanofiber monomers and nanofiber / nanowire ZnO were characterized using SEM, while DSSC performance was tested under a 1000W halogen lamp. The DSSC is made with 2 layer, 3 layer, 4 layer and 5 layer nanofiber layers resulting in efficiency of 0.0030%, 0.0076%, 0.0103% and 0.0082% respectively. While DSSC with semiconductor nanofiber / nanowire ZnO 2 layer, 3 layer, 4 layer and 5 layer yield efficiency consecutively equal to 0,0067%, 0,0163%, 0,0747%, 0,0025%. The final results show that semiconductors with an increased active area on the ZnO nanofiber / nanowire structure will improve DSSC performance.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “*Pengaruh proses hydrothermal nanofiber ZnO terhadap unjuk kerja dye – sensitized solar cells (DSSC)*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan nikmat dan karunia yang tidak pernah henti dalam hidup ini.
2. Ayah dan ibu yang telah menjadi orang tua yang sangat baik dalam hal mendidik, mengarahkan, memberi nasehat demi kehidupan yang lebih baik, kasih sayang, perhatian, materi, dan yang terpenting adalah doa yang selalu beliau panjatkan setiap saat untuk penulis dan keluarga.
3. Adik dan kakak, yang selalu memberi semangat baik moral, motivasi, serta do'a nya.
4. Bapak Harry Sutjahjono, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing Utama, Bapak Imam Sholahuddin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Koekoeh S. T., M. Eng. selaku Dosen Penguji Utama dan Bapak Dr. Nasrul Iminnafik, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah banyak sekali memberikan saran dan berbagai pertimbangan menuju ke arah yang benar dalam penulisan skripsi ini.
6. Bapak Imam Sholahuddin. S.T., M.T selaku dosen pembimbing tim *Material Research Group* UNEJ yang selalu memberikan motivasi dan arahan yang lebih baik lagi.
7. Seluruh dosen Universitas Jember khususnya Jurusan Teknik Mesin yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;

8. Teman – teman PPM Syafi'ur rahman yang selalu memberikan semangat, motivasi.
9. Komunitas RA 3 yang selalu memberikan hiburan disela – sela penulisan skripsi.
10. Sahabatku Ghopur, Singit, Nopal, Hanip, Lila, Yenol, Oca, Rima, Huda, Mamad, Biji, dll. yang selalu mendukung dalam penyelesaian tugas akhir ini
11. Rekan tim skripsi MRG yang telah banyak membantu dan memberi masukan tentang penyelesaian skripsi.
12. Saudara teknik mesin 2013 semoga persaudaraan ini tetap terjaga hingga akhir waktu.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 2 Februari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO.....	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
HALAMAN PEMBIMBING	vii
HALAMAN PENGESAHAN.....	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Hipotesa.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sel Surya Fotovoltaik	5
2.1.1 Pengertian Sel Surya Fotovoltaik	5
2.1.2 Performansi Sel Surya Fotovoltaik	5
2.2 DSSC (<i>Dye – Sensitized Solar Cell</i>).....	6
2.2.1 Prinsip Kerja DSSC	8
2.2.2 Material DSSC.....	9
2.3 Nanomaterial	12
2.4 Zinc Oxide (ZnO)	13
2.5 Serat Nano (Nanofiber).....	14
2.5.1 Serat Nano ZnO (ZnO Nanofiber).....	16

2.5.2 Serat Nano – nanowire	18
2.6 Electrospinning.....	19
2.7 Proses Hydrothermal	20
2.8 Karakterisasi Material.....	20
2.8.1 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1 Metode Penelitian.....	24
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	24
3.3 Alat dan Bahan	24
3.4 Pelaksanaan Penelitian	24
3.5 Langkah – Langkah Pengujian sampel DSSC.....	26
3.6 Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM).....	28
3.7 Analisa Data.....	28
3.8 Diagram Alir Penelitian.....	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Pengujian Resistansi Kaca FTO	32
4.2 Hasil Fabrikasi Nanofiber ZnO	33
4.3 Pengujian Efisiensi DSSC.....	35
4.3.1 Pengaruh Variasi Lapisan	35
4.4 Hasil Proses Hydrothermal Terhadap Morfologi	39
4.4.1 Pengujian SEM (Scanning Electron Microscopy).....	40
BAB 5 PENUTUP.....	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	46
LAMPIRAN.....	51

DAFTAR GAMBAR

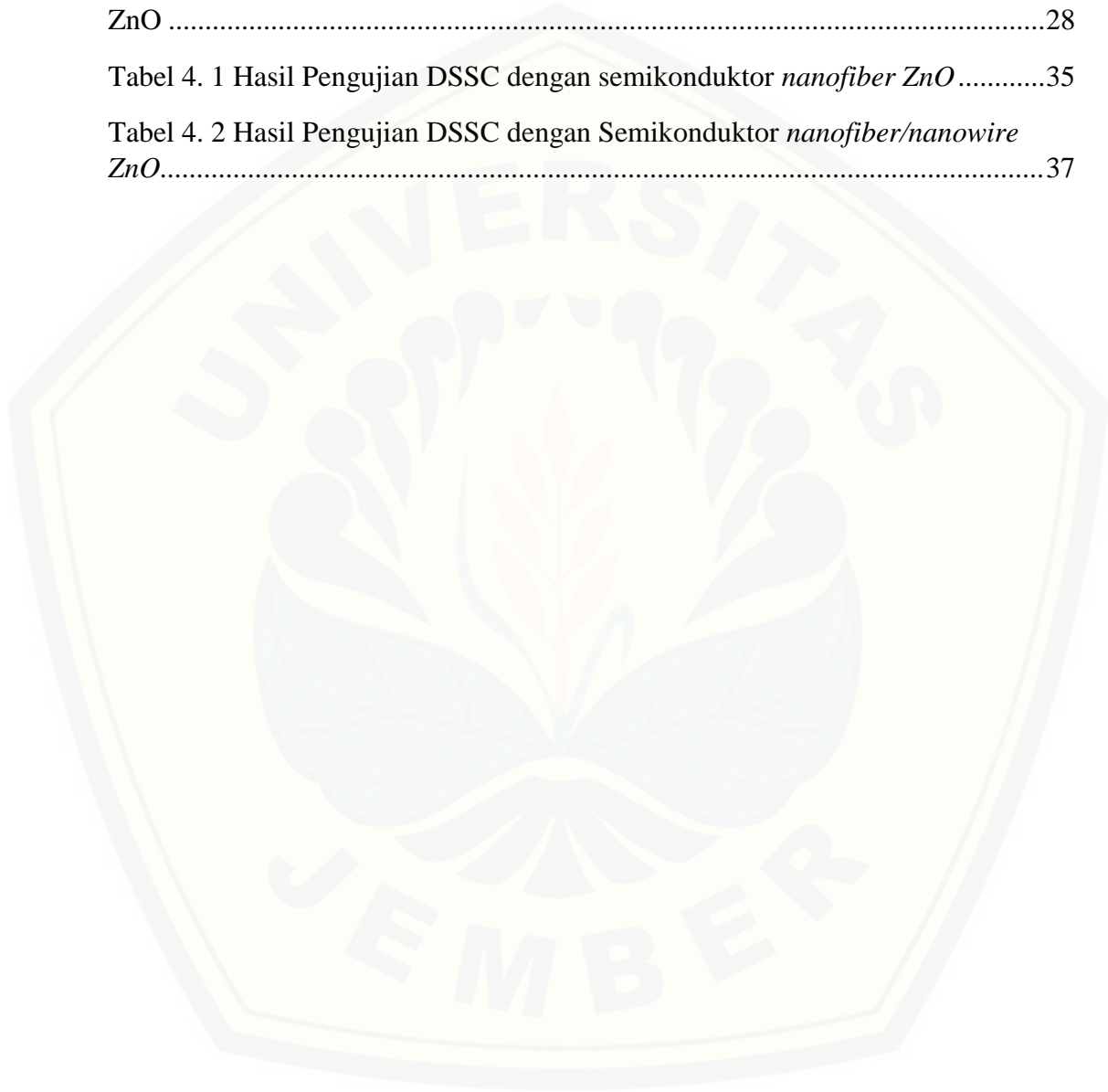
Gambar 2. 1 Karakteristik Kurva I -V Pada Sel Surya (Halme,2002).....	5
Gambar 2. 2 Struktur Komponen DSSC (Sastrawan, 2006).....	7
Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Fotokatalis (Subiyanto H., 2009).....	8
Gambar 2. 4 Ilustrasi Kerja dari DSSC (Halme, 2012).....	9
Gambar 2. 5 Perbandingan Serat Nano terhadap Rambut Manusia (Abhisek Dwivedi, 2012).....	16
Gambar 2. 6 <i>ZnO Nanofibers</i> (Park et al., 2009)	17
Gambar 2. 7 Serat nano – nanowire (Mccune et al., 2012).....	18
Gambar 2. 8 Skema Alat <i>Electrospinning</i> (Sholahuddin & H, 2015).....	19
Gambar 2. 9 Mekanisme Scanning Electron Microscopy (SEM).....	21
Gambar 2. 10 SEM Micrograph of ZnO/PVP Composite Fiber (Jin – Ah Park, 2009)	22
Gambar 2. 11 SEM Micrograph of ZnO Nanofibers annealed at 400°C (Jin – Ah Park 2009)	22
Gambar 2. 12 SEM micrograph of ZnO nanofibers annealed at 600°C (Jin – Ah Park, 2009)	23
Gambar 2. 12 SEM micrograph of ZnO nanofibers annealed at 800°C (Jin – Ah Park, 2009)	23
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 4. 1 Grafik Resistansi Kaca FTO	32
Gambar 4. 2 (a) Kaca Preparat; (b) Kaca FTO	33
Gambar 4. 3 (a) Nanofiber PVA/ZnAc; (b) Nanofiber ZnO.....	34
Gambar 4. 4 Grafik hubungan arus terhadap voltase dari unjuk kerja DSSC menggunakan semikonduktor nanofiber ZnO.....	36
Gambar 4. 5 Grafik Hasil pengujian I – V pada DSSC semikonduktor <i>nanofiber/nanowire</i> ZnO.....	38
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan unjuk kerja DSSC dengan semikonduktor <i>nanofiber ZnO</i> dan <i>nanofiber/nanowire ZnO</i>	39
Gambar 4. 7 Nanofiber ZnO 25.000× perbesaran.....	40

Gambar 4. 8 <i>Nanofiber/nanosheet/nanoflower ZnO</i>	41
Gambar 4. 9 Nanoflower ZnO	42
Gambar 4. 10 Dimensi Nanosheet ZnO	42



DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan	24
Tabel 3. 2 Hasil Pengujian DSSC dengan Semikonduktor <i>nanofiber ZnO</i>	27
Tabel 3. 3 Hasil Pengujian DSSC dengan Semikonduktor <i>nanofiber/nanowire ZnO</i>	28
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian DSSC dengan semikonduktor <i>nanofiber ZnO</i>	35
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian DSSC dengan Semikonduktor <i>nanofiber/nanowire ZnO</i>	37



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, jumlah energi fosil yang ada di alam semakin menipis. Kondisi tersebut telah mendorong masyarakat untuk mencari cara alternatif dalam pengolahan dan pemanfaatan sumber energi terbarukan yang berasal dari angin, panas bumi, energi surya, biomassa, dll. Energi surya dapat dimanfaatkan dengan menggunakan serangkaian teknologi seperti pemanas surya, fotovoltaiik surya, listrik panas surya, fotosintesis buatan dan *dye – sensitized solar cells* (DSSC) (Yandri & Andalas, 2012). Pada tahun 1991, Brian Oregan dan Michael Gratzel mengembangkan *dye – sensitized solar cells* (DSSC). Dalam pembuatannya, DSSC memerlukan biaya yang murah, selain itu juga ramah lingkungan. DSSC tersusun atas beberapa komponen yaitu semikonduktor oksida, pewarna, *counter electrode* dan elektrolit (Vittal & Ho, 2016).

Teknologi nano 1 D seperti *nanofibers*, *nanowires*, *nanoparticles* mempunyai karakteristik yang khas dan merupakan bidang yang akhir – akhir ini menarik perhatian para peneliti (Park, Moon, Lee, Lim, & Zyung, 2009). Penggunaan *nanofiber* ZnO sebagai material semikonduktor oksida dalam teknologi nano memberikan jalan alternatif untuk meningkatkan efisiensi DSSC (Imran, Haider, Ahmad, Mahmood, & Al-masry, 2017). *Nanowire* yang tumbuh di permukaan *nanofiber* dapat meningkatkan luasan aktif semikonduktor ZnO (McCune, Zhang, & Deng, 2012; Chen, Xu, Yao, & Shi, 2010). Sehingga kondisi tersebut dapat meningkatkan daya serap energi foton yang terdapat dalam DSSC. Penumbuhan nanomaterial berbasis ZnO dalam DSSC dapat dibuat dengan beberapa macam metode, diantaranya *magnetron sputtering* (Lupan, Guérin, Ghimpu, Tiginyanu, & Pauporté, 2012), *including electrodeposition* (Lupan et al., 2012)(Wong et al., 2012), *hydrothermal synthesis* (Dong, Yang, & Shi, 2014)(Hu, Huang, Deng, Chen, & Qian, 2007), *vapor – liquid – solid* (VLS), *vapor – solid* (VS) (Kang, Lee, Park, Yoo, & Yi, 2012), *process, metal – organic chemical vapor deposition* (MOCVD) (Endres & Mazumder, 2011), *chemical vapor deposition*

(CVD) (Wu & Liu, 2002), dll. Metode *hydrothermal* dapat menumbuhkan nano material yang ideal dengan morfologi yang bagus karena biaya yang murah, temperatur rendah, keuntungan tinggi, dan proses yang berkelanjutan (Hu et al., 2007).

Pada penelitian sebelumnya, Suh dan baxter mensintesis *dendritic ZnO nanowires DSSC* dengan metode *chemical vapor deposition* dan menunjukkan efisiensi yang rendah (0.5 %), karena luasan aktifnya kurang. Wong, K. K., et al. mensintesis DSSC berbasis nanopartikel ZnO dengan efisiensi yang rendah (1.5%). Zang W. et al. mensintesis DSSC berbasis *nanofiber ZnO* dengan metode *electrospinning* menunjukkan peningkatan efisiensi (3.02%) karena luasan aktif meningkat. Mallarie, et al. mensintesis *multilayer 3D ZnO nanofiber – nanowire* dengan metode *electrospinning* dan dilanjutkan dengan proses *hydrothermal* menunjukkan efisiensi yang tinggi (5.2%). Hal ini dikarenakan dengan tumbuhnya *nanowire 360°* di sepanjang *nanofiber* dan semakin banyak lapisan akan meningkatkan luasan aktif ZnO, dan meningkatkan daya serap energi foton.

Topik penelitian energi terbarukan khususnya bidang material maju penghasil energi terbarukan masih sedikit jumlahnya dibandingkan dengan ragam topik energi terbarukan yang ada pada saat ini. Mengacu pada penelitian (Miao et al., 2012; Dong et al., 2014; Sutanto et al., 2016; Mccune et al., 2012; Sholahuddin & H, 2015) yang menjadi target dalam penelitian ini yaitu *prototype* material fotoelektrik seng oksida berbasis serat *nano – nanowire ZnO* sebagai material utama dalam penyusunan komponen DSSC. Produk luaran dari penelitian ini diharapkan menjadi kontribusi yang positif dalam perkembangan ilmu pengetahuan di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah seperti di atas, maka dirumuskan masalah seperti berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi lapisan *nanofiber ZnO* terhadap unjuk kerja *dye – sensitized solar cells (DSSC)*?

2. Bagaimana pengaruh proses *hydrothermal* terhadap morfologi *nanofiber ZnO*?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mencapai tujuan penelitian yang diinginkan, maka penelitian ini akan diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Sintesis *nanofiber ZnO* menggunakan metode *electrospinning*.
2. Penumbuhan *nanowire ZnO* menggunakan metode proses *hydrothermal*.
3. Suhu ruangan pada proses pembuatan dianggap sama.
4. *Nanofiber* dideposisikan pada kaca FTO hingga lima lapis.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh proses *hydrothermal nanofiber ZnO* terhadap unjuk kerja *dye – sensitized solar cell (DSSC)*.
2. Mengetahui pengaruh variasi lapisan *nanofiber ZnO* terhadap unjuk kerja *dye – sensitized solar cell (DSSC)*.
3. Mengetahui bentuk morfologi *nanofiber ZnO* setelah proses *hydrothermal*.
4. Mengetahui dimensi struktur *nanosheet* yang terbentuk setelah proses *hydrothermal nanofiber ZnO*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai fabrikasi *dye – sensitized solar cells* dengan semikonduktor *ZnO nanofiber* dan *ZnO nanofiber – nanowire*.
2. Memberi keragaman dan pengembangan topik penelitian tentang *dye – sensitized solar cells*.

1.6 Hipotesa

Hipotesa yang dibuat pada penelitian ini sebagai berikut :

Proses *hydrothermal* akan meningkatkan luasan aktif area dengan cara menumbuhkan *nanowire* pada permukaan *nanofiber* ZnO, Hal ini akan meningkatkan unjuk kerja dari DSSC. Selain itu, semakin banyak lapisan *nanofiber* ZnO maupun *nanofiber* – *nanowire* ZnO juga akan meningkatkan unjuk kerja dari DSSC.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya Fotovoltaik

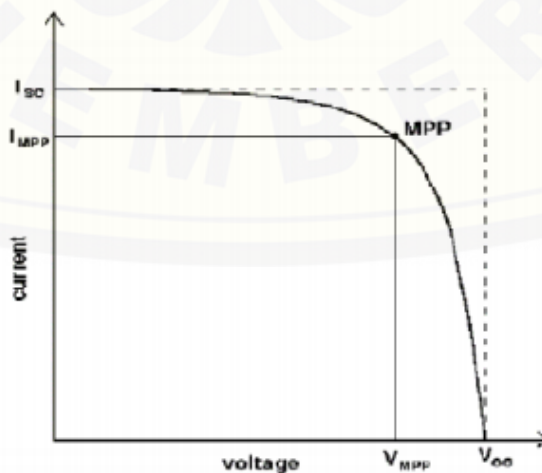
2.1.1 Pengertian Sel Surya Fotovoltaik

Sel surya fotovoltaik merupakan sebuah alat yang dapat mengkonversi energi panas menjadi energi listrik. Sel surya pada dasarnya merupakan suatu diode semikonduktor yang bekerja pada suatu proses yang tidak seimbang (*non – equilibrium process*) dan berlandaskan efek fotovoltaik (*photovoltaic effect*) (Istiyono, 2004).

Dalam sel – sel fotovoltaik, energi cahaya yang mengenai permukaan sel menghasilkan gerak elektromotor (e.m.f) atau tegangan fotovoltaik yang timbul terhadap dua bahan semikonduktor yang berbeda jenis atau pada permukaan semikonduktor dengan lapisan konduktor (Soedjojo P. 1999). Efek fotovoltaik ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, dimana Becquerel mendeteksi adanya tegangan foto ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit.

2.1.2 Performansi Sel Surya Fotovoltaik

Perangkat sel surya ketika mendapat cahaya dan memproduksi tegangan ketika diberi beban dan arus pada waktu yang sama akan menghasilkan daya listrik. Kemampuan ini dipresentasikan dalam kurva arus – tegangan (I – V).



Gambar 2. 1 Karakteristik Kurva I - V Pada Sel Surya (Halme, 2002)

Ketika sel dalam kondisi *short circuit*, maka arus maksimum (I_{SC}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimum, hal ini disebut tegangan *open circuit* (V_{OC}). Titik pada kurva I – V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut dengan titik daya maksimum (MPP).

Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut titik daya maksimum (MPP). Karakteristik penting lainnya dari sel surya yaitu fill factor (FF), dengan persamaan (Green, 1982) :

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.1)$$

Menggunakan Fill Factor daya maksimum dapat didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$P_{MAX} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2.2)$$

Sehingga efisiensi sel surya dapat dihasilkan dan didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel P_{MAX} dibagi dengan daya dari cahaya yang datang P_{Light} .

$$h = \frac{P_{MAX}}{P_{Light}} \quad (2.3)$$

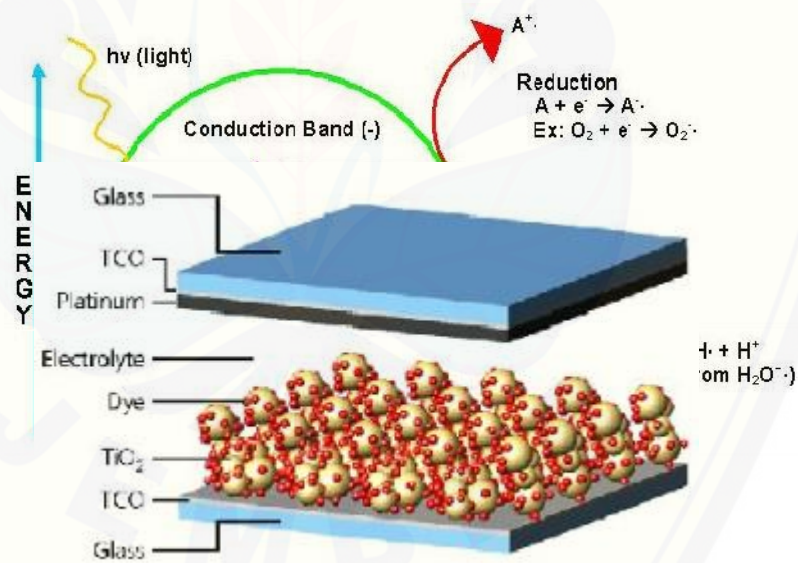
Nilai dari efisiensi menentukan kualitas performansi sel surya secara global. Tinggi rendahnya efisiensi dari solar sel tergantung dari temperatur pada sel, dan yang lebih penting adalah kualitas dari cahaya, energi foton, dll. misalnya total intensitas cahaya dan intensitas spektrum yang terdistribusi, maka dari itu, standart pengukuran harus dikembangkan sejalan dengan pengujian sel surya di laboratorium (Kim et al., 2007)

2.2 DSSC (*Dye – Sensitized Solar Cell*)

Dye – sensitized solar cell pertama kali dikemukakan dan ditemukan oleh Professor Michael Gratzel pada tahun 1991, dan menjadi salah satu topik penelitian yang mana secara intensif dilakukan oleh peneliti di seluruh dunia. DSSC menjadi terobosan dalam teknologi surya setelah sel surya silikon. Beberapa keuntungan

dari sistem sel surya tersensitasi *dye* ini adalah proses fabrikasinya yang sederhana tanpa menggunakan peralatan yang rumit dan mahal, sehingga proses fabrikasi DSSC memerlukan biaya yang murah, selain itu efisiensi dari sel surya tersensitasi *dye* telah mencapai 10 – 11 %. Namun sel surya ini mempunyai beberapa kelemahan yaitu stabilitasnya rendah karena penggunaan elektrolit cair yang mudah terdegradasi atau kebocoran (Hu et al., 2007).

DSSC berbeda dengan sel surya konvensional, DSSC menerapkan prinsip kinerja fotoelektrokimia sehingga DSSC menggunakan cairan elektrolit sebagai media transport elektron (Grätzel, 2003). Selain komponen elektrolit, DSSC terbagi dalam beberapa komponen lainnya yang diantaranya adalah semikonduktor, molekul *dye* yang teradsorpsi di permukaan semikonduktor, larutan elektrolit dan elektroda lawan yang diberi lapisan katalis (Grätzel, 2003). Semua komponen DSSC tersebut diseposisikan diantara dua kaca konduktif, seperti gambar 2.2.



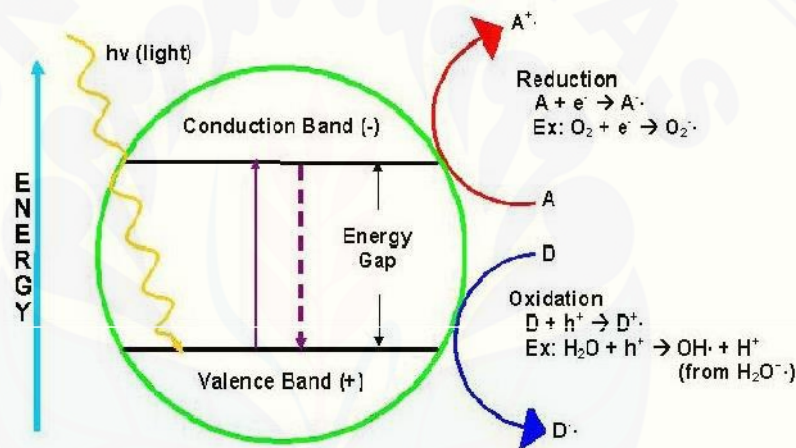
Gambar 2. 2 Struktur Komponen DSSC (Sastrawan, 2006)

Struktur atas dari DSSC adalah kaca konduktif atau *glas* yang telah dilapisi oleh TCO (*Transparent Conducting Oxide*) yang biasanya adalah ITO. TCO berfungsi sebagai elektroda dan counter – elektroda. Pada TCO ini *counter* – elektroda dilapisi katalis yang fungsinya adalah untuk mempercepat reaksi redoks dengan elektrolit. Pasangan redoks umumnya yang dipakai adalah I^-/I^{3-}

(iodide/triiodide). Pada permukaan elektroda dilapisi oleh lapisan semikonduktor (TiO_2) yang mana *dye* akan teradsorpsi dalam lapisan semikonduktor. *Dye* yang umum dipakai dalam komponen DSSC yaitu *dye* jenis ruthenium complex.

2.2.1 Prinsip Kerja DSSC

Pada dasarnya prinsip kerja dari DSSC merupakan reaksi transfer elektron. Proses pertama dimulai dengan terjadi eksitasi elektron pada molekul *dye* yang diakibatkan oleh adsorpsi energi foton, dimana ini merupakan salah satu peran dari semikonduktor yaitu fotokatalis. Ilustrasi proses fotokatalis TiO_2 dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Fotokatalis (Subiyanto H., 2009)

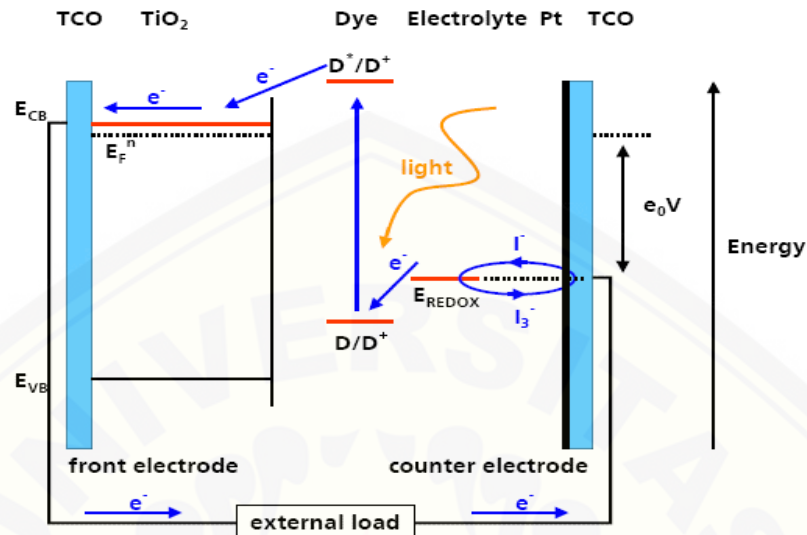
Elektron kemudian akan tereksitasi dari *ground state* (D) menuju ke *excited state* (D^*)



Elektron dari *excited state* selanjutnya langsung terinjeksi menuju conduction band (E_{CB}) titania, sehingga molekul *dye* teroksidasi (D^*). Dengan adanya donor elektron dari oleh elektrolit (I^-) maka molekul *dye* kembali dalam keadaan awal (*ground state*) dan mencegah penangkapan kembali elektron oleh *dye* yang teroksidasi.



Ilustrasi kinerja dari DSSC dijelaskan pada gambar berikut:



Gambar 2. 4 Ilustrasi Kerja dari DSSC (Halme, 2012)

Setelah elektron mencapai elektroda TCO glass, kemudian elektron akan ditransferkan menuju *counter* – elektroda melalui rangkaian eksternal. dengan adanya katalis yang berupa platina atau karbon pada *counter* – elektroda maka elektron ditangkap oleh elektrolit, sehingga hole yang terbentuk pada elektrolit (I_3^-) akibat dari donor elektron pada proses sebelumnya,berkombinasi dengan elektron membentuk iodida (I^-).



Iodida yang terbentuk dari reaksi ini digunakan untuk mendonor elektron kembali terhadap *hole*. Dengan begitu akan terbentuk suatu siklus yang *continue* sehingga akan terjadi konversi dari energi foton menjadi listrik (Halme, 2012).

2.2.2 Material DSSC

a. Substrat

Substrat pada DSSC terbuat dari kaca konduktif yang telah dilapisi oleh *transparent conductive oxide* (TCO). *TCO glass* diantaranya yaitu FTO, SnO₂, atau ITO. Kaca konduktif ini berfungsi sebagai penghantar arus listrik dan pada

umumnya bahan pelapis kaca ini dibagi menjadi dua jenis. Jenis – jenis pelapis kaca tersebut diantaranya yaitu *Fluorine doped Thin Oxide* (FTO) dan *Indium Thin Oxide* (ITO). *Dye – sensitized solar cells* memerlukan dua buah elektroda, yaitu elektroda kerja dan elektroda lawan (*counter electrode*). *Counter electrode* dilapisi oleh katalis (karbon atau platina) yang berfungsi untuk mempercepat proses reduksi triiodida pada TCO (Handini, 2008).

b. Semikonduktor

Semikonduktor ZnO secara luas digunakan sebagai *photoelectrode* dalam DSSC (K. Keis, 2002). Penggunaan semikonduktor dalam fotoelektrokimia dikarenakan kestabilannya menghadapi fotokorosi. Selain itu, lebar pita energi ZnO yang besar (3,37 eV) dibutuhkan dalam DSSC untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari (Su Li, 2011). Selain semikonduktor ZnO, semikonduktor lain yang dapat digunakan adalah TiO₂, CdSe, CdS, WO₃, Fe₂O₃, SnO₂, Nb₂O₅, dan Ta₂O₅. Semikonduktor ZnO digunakan dan menarik perhatian karena lebar celah pita yang tinggi dapat diaplikasikan dalam *solar cells* (Pan, 2001).

ZnO merupakan salah satu bahan kandidat yang telah menarik banyak perhatian karena memiliki lebar celah pita energi tinggi dan energi ikat eksitasi 60 meV pada suhu kamar (Khan, Al-Mamun, Halder, & Aziz, 2017). Maka dari itu, ZnO merupakan bahan yang penting untuk laser UV dan devais optoelectronik, dan juga ZnO memiliki sifat listrik dan optik, sehingga material ZnO banyak digunakan sebagai fotokonduktor, sensor terintegrasi (Suwanboon dkk, 2008)

Kristal dari seng oksida terbagi dalam dua bentuk utama, yaitu *wurtzite* heksagonal dan *sengblende* kubus. Struktur *wurtzite* sangat stabil pada kondisi biasa, sedangkan bentuk *sengblende* kubus dapat distabilkan dengan menumbuhkan seng oksida (ZnO) pada substrat dengan struktur kisi kubus. Selain dalam bentuk *wurtzite* dan *sengblende*, ZnO dapat mengkristal dengan bentuk gram batuan pada tekanan yang relatif tinggi sekitar 10 Gpa.

c. Elektrolit

Penggunaan elektrolit berfasa cair dalam DSSC dianggap sebagai salah satu cara untuk meningkatkan *interface* antara elektroda, *counter electrode*, dan *electrolyte*. Dengan adanya kontak permukaan yang optimal pada elektrolit menyebabkan performa DSSC menjadi lebih baik (Alias and Mohamad, 2012). Sedangkan elektrolit cair itu mempunyai beberapa kerugian, diantaranya bisa mengakibatkan kebocoran, mendegradasi pewarna, mudah menguap, dan menyebabkan terjadinya korosi pada *counter electrode* (Alias and Mohamad, 2012). Maka dari itu untuk mengurangi kerugian terhadap elektrolit cair diperlukan cara alternatif lain terhadap elektrolit cair, yaitu dengan menggunakan elektrolit *solid-state* (Akhtar, et al. 2008), *quasi-solid-state* (Yang, Guo, and Zhao, 2012), dan *gel-polymer-electrolyte*.

Elektrolit dalam DSSC berfungsi sebagai lapisan *buffer*, dimana reaksi redoks terjadi. Terdapat banyak zat yang digunakan sebagai larutan elektrolit dalam DSSC, diantaranya KI/I_2 (Kalaighan, et al., 2006), NaI/I_2 (Kima, et al., 2005), LiI/I_2 (Luque and Hegedus, 2003), $PMII/I_2$, NH_4I (Lee, et al. 2010), dan lain sebagainya. Elektrolit tersebut digunakan dalam DSSC berfasa cair yang berfungsi sebagai mediator reaksi redoks dan pada umumnya elektrolit yang sering digunakan adalah pasangan Iodida / Triiodida (I^-/I_3^-) (Gratzel, 2003).

d. Dye (Pewarna)

Proses fotosintesis pada tumbuhan telah membuktikan bahwa terdapat senyawa yang terkandung dalam tumbuhan yang mana dapat digunakan sebagai *dye*. Zat-zat tersebut ditemukan dalam daun atau buah, yaitu antosianin, klorofil, dan xantofil. Pada penelitian sebelumnya telah dibuktikan bahwa antosianin, klorofil maupun xantofil dapat tereksitasi dengan adanya penyinaran terhadap *dye*. Peneliti telah mendapatkan nilai efisiensi konversi energi yang paling baik terdapat pada klorofil, karena di dalam klorofil terdapat gugus *carboxylate* (Jiang, Sun, Lo, Kwong, & Wang, 2007).

Salah satu macam dari *dye Amarthus Hybridus L.* Atau daun bayam, yang merupakan bahan penyusun warna hijau pada tanaman bayam. Senyawa dalam tumbuhan ini berperan sebagai pengkonversi dari energi foton menjadi kimia. Pigmen utama dalam fotosintesis adalah klorofil, lebih banyak menyerap cahaya biru dan merah, dimana pigmen asesoris seperti karotenoid dan fikoblin dapat meningkatkan penyerapan spectrum hijau biru dan kuning. Sifat atraktif pada pigmen fotosintetik inilah yang diaplikasikan seperti dalam *solar cells* (Nygren, 2010).

2.3 Nanomaterial

Nanomaterial dapat didefinisikan sebagai material yang memiliki ukuran dalam skala nanometer, yaitu skala yang berkisar antara 1 hingga 100 nm. Dengan ukuran seperti ini, nanomaterial mempunyai karakteristik yang khas dan unik serta akan lebih menguntungkan dari pada material yang berukuran besar. Karakteristik material ketika menjadi skala nano dapat menjadi berbeda dengan sebelumnya.

Nanomaterial memiliki keistimewaan sifat, diantaranya mampu melakukan penetrasi yang lebih cepat dan sifatnya sangat berbeda dengan sifat ketika saat dalam ukuran lebih besar. Sebagai contoh tembaga (Cu) memiliki sifat yang lebih keras dan ferromagnetik akan menjadi supermagnetik pada ukuran 20 nm.

Menurut hasil riset yang telah dilakukan, material ukuran nanometer memiliki sifat kimia dan fisika yang lebih unggul dari pada material yang memiliki ukuran besar, termasuk dalam ukuran mikro. Sifat – sifat tersebut dapat dirubah dengan pengontrolan ukuran material, pengaturan komposisi kimiawi, modifikasi permukaan, dan pengontrolan interaksi antar partikel. Sehingga dengan adanya karakteristik yang bisa dirubah menjadikan nano material dapat diterapkan pengaplikasiannya secara luas.

Nanomaterial dapat dibagi menjadi 4 golongan, yaitu nol dimensi yang meliputi nanopartikel; satu dimensi seperti *nanotubes*, *nanorods*, *nanowires*, *nanofibers*; dua dimensi seperti *thin films* (*multilayer*, *moolayer*, *self – assembled*,

mesoporous); tiga dimensi seperti nanokomposit, *nanograined*, *mikroporous*, *mesoporous*, *interkalasi*, *organic – anorganic hybrids*.

Banyak nanoteknologi dan *nanoscience* dilakukan untuk memproduksi nanomaterial, seperti teknik *up down* dan *bottom up*, dimana *top down* merupakan pembuatan struktur kecil dari struktur yang lebih besar sedangkan *bottom up* merupakan teknik yang dilakukan untuk menggabungkan atom – atom atau molekul menjadi sebuah partikel yang berukuran lebih besar.

2.4 Zinc Oxide (ZnO)

Seng merupakan logam yang berwarna kebiruan, berkilau, dan bersifat diamagnetik. Namun seng dengan mutu komersial tampak tidak berkilau. Seng kurang padat dari pada besi dan seng sendiri berstruktur kristal heksagonal.

Zinc oxide merupakan senyawa anorganik dengan rumus kimia ZnO dan termasuk dalam material semikonduktor (Ozgur, 2005). *Zinc oxide* bersifat keras dan rapuh pada kebanyakan suhu, namun logam ini dapat ditempa pada suhu antara $100^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$. Logam ini mempunyai transmisi optik yang tinggi serta mampu menghantarkan listrik. Sifat yang unik tersebut menjadikan lapisan tipis ZnO menjadi pilihan utama untuk berbagai aplikasi konduktor transparan, seperti sel surya, layar komputer, serta aplikasi lainnya seperti sensor gas, transduser, *piezoelektrik*, *thermoelektrik*, maupun *photoelektrik*. Untuk mendapatkan konduktivitas listrik serta transparansi yang baik maka pada material ZnO dapat dilakukan penambahan doping atom logam seperti L, Sn, Cd, Ga, In, dll pada lapisan tipis ZnO. Pada pertama kali ZnO ditemukan oleh ahli kimia dari prancis yang bernama Charles Adholf Wurtzt.

Zinc oxide merupakan bubuk berwarna putih yang hampir tidak larut dalam larutan netral. Akan tetapi dapat larut di dalam basa atau asam. ZnO sendiri merupakan material unik dan menarik, sehingga material ini banyak diteliti dan dikembangkan seperti evaluasi sifat listrik, sifat fisis, struktur kristal dan struktur mikro. *Zinc oxide* akan berwarna kuning jika dipanaskan dan akan kembali berwarna putih jika didinginkan. ZnO berada di kerak bumi dalam bentuk mineral *zincite*.

Struktur ZnO terbagi dalam 3 bentuk, yaitu *hexagonal wurtzite*, *cubic zinblende*, dan *cubic roksalt*. Struktur wurzite sangat stabil pada suhu kamar dan paling umum pada kondisi sekitarnya.

Dalam ilmu material *zinc oxide* merupakan semikonduktor dengan dengan golongan II – VI, karena seng dan oksigen berada dalam golongan II dan VI di dalam tabel periodik dan mempunyai nilai band – gap yang tinggi (3,37eV) dan *exitacion binding* yang kuat (60 meV). Material semikonduktor ini mempunyai beberapa sifat yang menguntungkan, diantaranya mampu tembus yang baik, mobilitas electron yang tinggi, tahan terhadap temperature tinggi, dapat memadarkan cahaya, dsb. ZnO juga mempunyai sifat lain seperti *catalytic*, *optoelectronic* dan *piezoelectric propeties* (Wikipedia, 2011). Terkait dengan sifat sifat tersebut, maka ZnO diteliti dan dikembangkan untuk pengaplikasian dalam *microwave absorber*, *light emiting diodes*, *optical swithes*, *solar cells*, *photovoltaic devices*, *varistors*, dan *sensors*.

Keuntungan zinc okside dari bahan semikonduktor adalah selain bisa dioperasikan dalam lingkungan yang keras dan bersuhu tinggi, resistansi tinggi untuk keadaan radiasi energi tinggi (P, 2004).

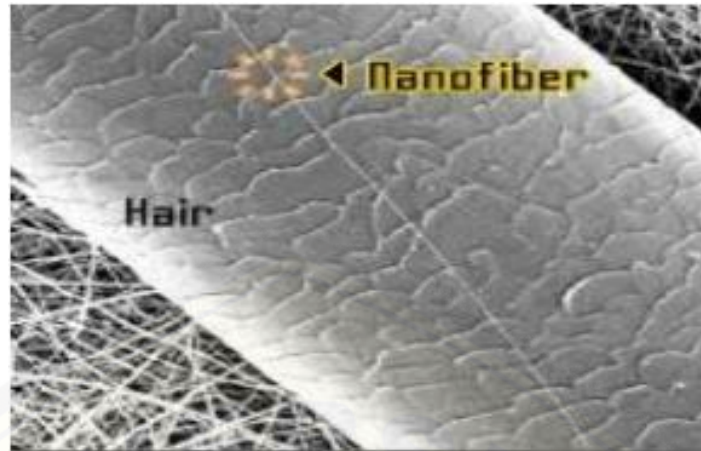
2.5 Serat Nano (*Nanofiber*)

Serat nano atau *nanofiber* adalah serat yang mempunyai diameter yang sangat kecil dan kurang dari 1 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) (Wallace, 2004). Menurut sebagian besar kalangan industri, serat yang mempunyai diameter kurang dari satu micron sudah dianggap sebagai serat nano, akan tetapi berbeda dengan pendapat *The National Science Foundation(NSF)*. *National Science Foundation (NSF)* mendefinisikan bahwa serat nano atau *nanofiber* adalah suatu serat yang mempunyai diameter di bawah 100 nano meter (Zubaidi, 2008). Penggunaan dan pengaplikasian dari serat nano sangatlah luas dan meliputi pada berbagai bidang seperti halnya tekstil militer (*protective clothing*), farmasi, kesehatan, kedokteran, pertanian, automotif, optic, elektronika, olah raga, kosmetik, dan lain – lain (Wahyudi & Sugiyana, 2011).

Nanofiber berasal dari nama serat yang berukuran sangat kecil, yaitu sepermilyar meter atau seperseribu micron. Diameter dari serat sangat bervariasi, mulai dari yang paling besar hingga yang terkecil, sehingga dikenal dengan beberapa istilah penting, seperti : *monofilament*, *denier*, *densitex*, *microfiber*, dan serat nano (*nanofiber*). *Monofilament* merupakan serat yang mempunyai diameter paling besar jika dibandingkan dengan yang lain, yang mana diukur dalam skala micron hingga inci, atau biasa dinyatakan dalam satuan denier. *Denier* merupakan ukuran berat (g) atau dalam linier persatuan panjang (9000 m). Serat yang lebih halus yaitu *microfiber*. Serat mikro mempunyai ukuran kurang dari 0,3 denier. Untuk lebih tepatnya mengenai ukuran tersebut dinyatakan dalam satuan micron (10^{-6} meter). Secara luas serat mikron digunakan sebagai tekstil sandang, tekstil rumah tangga, dan tekstil sejenisnya.

Dalam beberapa tahun terakhir, *nanofiber* dibuat melalui proses *electrospinning*. Prinsip kerjanya adalah larutan polimer dimasukkan dalam tabung syringe dan disemprotkan secara konstan. Polimer dilewatkan melalui lubang spinneret (*jet*) dan selanjutnya ditarik dengan energi elektrostatik dengan tegangan tinggi arus searah (*DC / Direct Current*) yang berkekuatan sekitar 30 kV dan seratnya ditampung dalam pelat kolektor (*collector screen*) (Zulkifili, Kento, Daiki, & Fujiki, 2015).

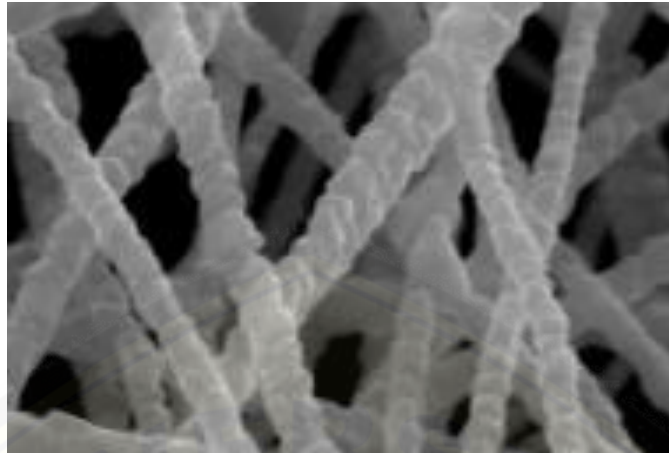
Pemahaman awal mengenai serat dalam skala nano (*nanoscale*) adalah sekitar seribu kali lebih kecil dari skala micro atau jika dibandingkan dengan helai rambut manusia sebesar 1/80.000 garis tengahnya atau atom sebanyak 3 hingga 6 atom bisa terdapat dalam nanometer. Perbandingan antara nanofiber dengan satu helai rambut manusia diperlihatkan pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 2.5 Perbandingan Serat Nano terhadap Rambut Manusia (Abhishek Dwivedi, 2012)

2.5.1 Serat Nano ZnO (*ZnO Nanofiber*)

Serat nano seng oksida (ZnO) yang telah diaplikasikan dalam kain dapat menghasilkan energi dan mengumpulkan energi dari gesekan atau getaran frekuensi rendah. Sehingga dengan material serat nano seng oksida dalam pakaian dapat berfungsi sebagai penyedia energi (nature, 2008). Serat nano seng oksida ini telah dibuat oleh Xianghua Yang bersama timnya, dengan menggunakan metode *electrospinning* yang dilanjutkan dengan proses *heat treatment*. Serat nano yang difabrikasi dengan elektrospining terbuat dari prekursor polyvinyl alcohol (PVA) dan zinc acetate (ZnAc) yang mana PVA dilarutkan dalam air distilasi. Kristal nano ZnO akan terbentuk pada suhu diatas 600 derajat celcius dengan ditandai pertumbuhan butir. Pengujian dengan berkas sinar – x (XRD) yang dilakukan oleh Jin – Ah Park menjelaskan bahwa butir – butir seng oksida (ZnO) tumbuh disepanjang *nanofibers* (Park et al., 2009). Serat nano seng oksida (ZnO) diperlihatkan pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. 6 *ZnO Nanofibers* (Park et al., 2009)

Ukuran diameter dan morfologi serat nano seng oksida (ZnO) yang dihasilkan dari proses *electrospinning* dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya: tegangan yang diterapkan, jarak antara ujung jarum hingga pelat kolektor, jenis polimer, viskositas larutan, tegangan permukaan, dan kecepatan laju larutan (Thangavel, Balamurugan, Venkatachalam, & Ranjith Kumar, 2016). Karakterisasi morfologi permukaan dari serat nano ZnO diuji dengan non destructive test (NDT), diantaranya menggunakan *Field Emmission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) dengan perbesaran 1.0 nm dan tegangan hingga 30 V, *High Resolution Transmission Electron Microscopy* (HRTEM) dengan perbesaran kisi hingga 0,14 nm. Serat nano seng oksida yang dibuat oleh Thangvel K. menunjukkan fasa kristal *wurtzite* dengan struktur *hexagonal*. Peningkatan temperatur pada saat *annealing* berpengaruh pada ukuran kristal yang meningkat dari 21,79 nm menjadi 29,86 nm dan pada waktu yang sama nilai tegangan dan regangan menurun dari 0.0013 menjadi 0.0009 dan 0.0059 menjadi 0.0050, berturut – turut.

Teknologi nano 1 dimensi khususnya pada serat nano seng oksida memiliki peranan penting dalam pengaplikasiannya untuk kemaslahatan manusia, salah satunya dapat diterapkan sebagai *dye – sensitized solar cells* (DSSC) untuk menyerap energi surya dan nantinya dikonversikan ke energi listrik. Selain

pengaplikasian dalam *dye – sensitized solar cell* (DSSC), *ZnO nanofibers* juga dapat diaplikasikan dalam peralatan elektronik skala nano.

2.5.2 Serat Nano – nanowire

Serat nano yang difabrikasi oleh Charles M Lieber dari Havard University mampu mempertahankan kelenturan serat kevlar meskipun telah disusupi oleh kristal seng oksida (ZnO). Kunci dari serat *nano – nanowire* yaitu serat nano atau *nanofiber* yang dikelilingi oleh lapisan tipis kristal ZnO yang berfungsi sebagai benih yang nantinya kawat berukuran nano (*nanowire*) tumbuh dari benih tersebut. (Mccune et al., 2012) menjelaskan bahwa semakin tipis kawat yang terdapat dalam permukaan serat nano maka akan semakin fleksibel serat yang dapat dihasilkan. Penerapan aplikasi dari serat *nano – nanowire* mencakup luas, yaitu sebagai penghasil listrik dari nanogenerator, pemanen energi surya, dan lain lain. Struktur morfologi dari serat *nano – nanowire* diilustrasikan pada gambar berikut ini.



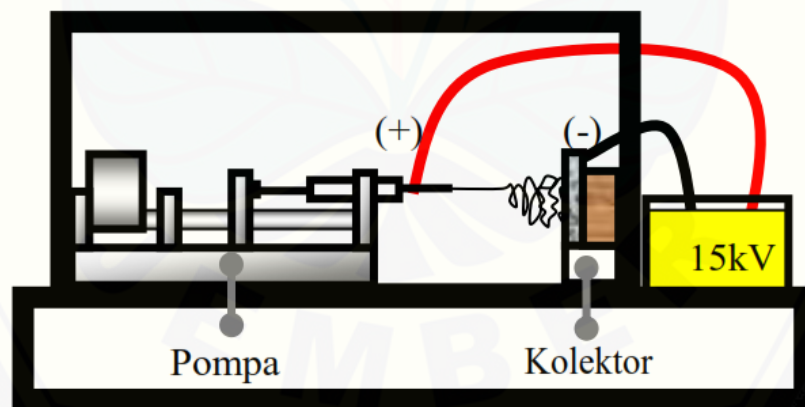
Gambar 2. 7 Serat nano - *nanowire* (Mccune et al., 2012)

Saat terjadinya difusi serat pada pelat kolektor serta pada saat proses dekomposisi thermal dan diikuti dengan pembentukan nukleasi kristal ZnO memiliki peranan yang sangat penting terhadap morfologi bentuk akhir serat nano. Pada saat inilah terjadi pertumbuhan *nanowire* pada permukaan serat nano yang berawal dari nukleasi kristal ZnO. Hal ini dikarenakan tekanan udara alamiah serta keberadaan oksigen pada udara bebas saat proses sintering tanpa menggunakan

katalis, mengakibatkan kristal ZnO tumbuh dengan sendirinya dan membentuk *nanowire* (Sholahuddin & H, 2015). Dengan demikian *nanofiber/nanowire* dapat diaplikasikan dalam *dye – sensitized solar cell* (DSSC), karena karakteristiknya yang unik seperti ulat bulu dan bersifat fotoelektrik serta luasan aktif area dapat meningkatkan daya absorpsi energi surya (Mccune et al., 2012).

2.6 *Electrospinning*

Pada dasarnya *electrospinning* adalah metode untuk memfabrikasi *nanofiber*. Pada prinsipnya *electrospinning* menerapkan gaya *electrostatic* yang muncul dari partikel bermuatan yang dikarenakan adanya tegangan tinggi di antara ujung tip (jarum tabung *syringe / spinneret*) dengan plat kolektor. Bagian utama dari alat *electrospinning* tersusun atas sumber tegangan tinggi DC, tabung syringe, jarum, dan plat kolektor. Pada ujung jarum dari tabung syringe dihubungkan dengan elektroda positif sehingga larutan bermuatan positif, sedangkan plat kolektor fiber dihubungkan dengan elektroda negatif. Skema susunan alat *electrospinning* sederhana ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 8 Skema Alat *Electrospinning* (Sholahuddin & H, 2015)

Pada dasarnya proses *electrospinning* terbagi menjadi tiga tahapan yang mana diperkenalkan sebagai jet modeling. Tahap pertama merupakan proses inisiasi, yaitu terbentuknya tetesan larutan prekursor pada ujung jarum, hingga larutan terbawa oleh gaya elektrostatis ke pelat kolektor fiber (Akrem, 2011). Tahap kedua merupakan proses penipisan diameter serat, semakin jauh jarak antara

ujung jarum dan pelat kolektor maka diameter nanofiber yang dihasilkan akan semakin menurun (Istiyono, 2004; Voight, 2009). Sedangkan tahap ketiga adalah proses dimana larutan telah menguap dan mengalami pembekuan serat (*jet solidification*). Parameter – parameter yang perlu diperhatikan dalam hasil morfologi dan keseragaman ukuran serat dikelompokkan menjadi dua kategori (C. J. Thompson, 2007), yaitu : penggunaan sifat polimer (berat molekul, konsentrasi larutan, viskositas, konstanta dielectric, dan tegangan permukaan) dan parameter dari electrospinning yang meliputi besar medan listrik, besar beda potensial, laju aliran (*flow rate*) larutan, dan jarak yang menghubungkan ujung tip ke kolektor (TCD = *tip to collector distance*).

2.7 Proses Hydrothermal

Salah satu strategi mensintesis *nanowire* yang murah dan efisien adalah dengan metode proses *hydrothermal*, yang mana tidak memerlukan suhu tinggi atau pun media yang kompleks. Proses *hydrothermal* menumbuhkan kristal secara *epitaxial* dengan sifat anisotropik (Ionel Vayssieres, 2001). Proses *hydrothermal* mengontrol pertumbuhan *nanowire* sehingga morfologi dari *nanowire* tampak lebih baik (Sugunan A, 2006). Telah dilaporkan bahwa *nanowire* ZnO telah berhasil ditumbuhkan pada substrat, seperti Si (Wang Y C, 2008), kaca (Wei M, 2005), TCO (Tang Y, 2007), kain karbon dan aluminium foil.

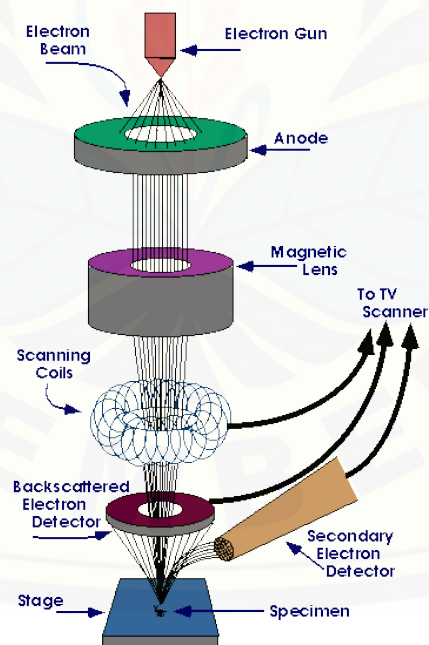
Proses *hydrothermal* pertama kali dicetuskan oleh Vayssieres et al menggunakan larutan ekuimolar *zinc nitrate hexahydrate* dan *hexamethylene tetramine* atau yang biasa disebut dengan *hexamine* yang digunakan untuk menumbuhkan *nanowire* secara *epitaxial* pada berbagai substrat.

2.8 Karakterisasi Material

2.8.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning electron microscopy (SEM) merupakan sejenis mikroskop yang menggunakan electron sebagai pengganti cahaya untuk melihat benda dengan resolusi yang tinggi. Analisis SEM digunakan untuk mengetahui mikrostruktur

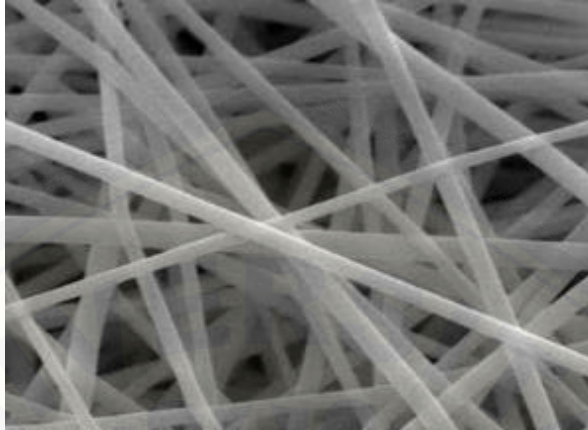
benda padat. Pada dasarnya SEM menggunakan electron yang dihamburkan untum menggambarkan bentuk suatu permukaan benda atau material yang dianalisis. Pada sistem ini berkas sinar elektron dikonsentrasikan pada spesimen, dan bayangannya diperbesar dengan lenda objektif dan diproyeksikan pada layar (Gabriel, 1993). Berkas elektron dipantulkan dengan energi tinggi. Permukaan material yang terkena berkas elektron akan memantulkan kembali berkas elektron ke segala arah (elektron sekunder). Namun dari banyaknya elektron sekunder yang dipantulkan, terdapat elektron yang terhamburkan dengan intensitas yang paling tinggi. Kemudian detektor yang terdapat dalam SEM akan mendeteksi berkas sinar elektron berintensitas tinggi yang dipantulkan oleh benda atau material yang telah dianalisis. Gambar yang dihasilkan terdiri dari ribuan titik berbagai intensitas di permukaan Cathode Ray Tube (CRT) sebagai topografi gambar (Kroscheitz, 1990). Skema dari *scanning electron microscopy* (SEM) diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 2. 9 Mekanisme *Scanning Electron Micoscopy* (SEM)

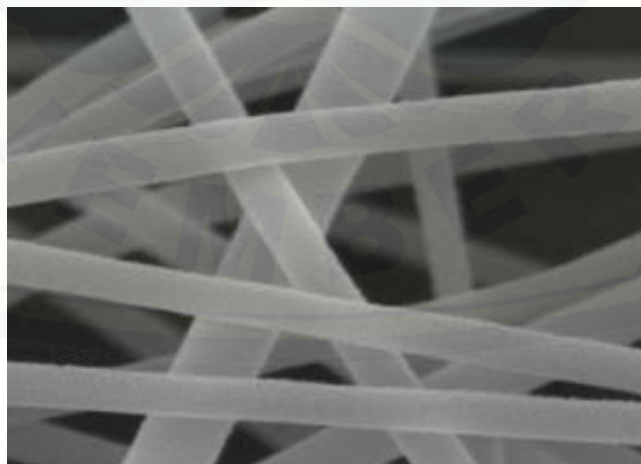
Pada tahun 2009, Jin – Ah Park, et al. membuat dan mengkarakterisasi *nanofiber* ZnO dengan metode *electrospinning*, morfologi dari *nanofiber* sendiri

dianalisis menggunakan *scanning electron microscopy*. Hasil dari *scanning electron microscopy* pada *nanofiber* diilustrasikan pada gambar berikut ini.



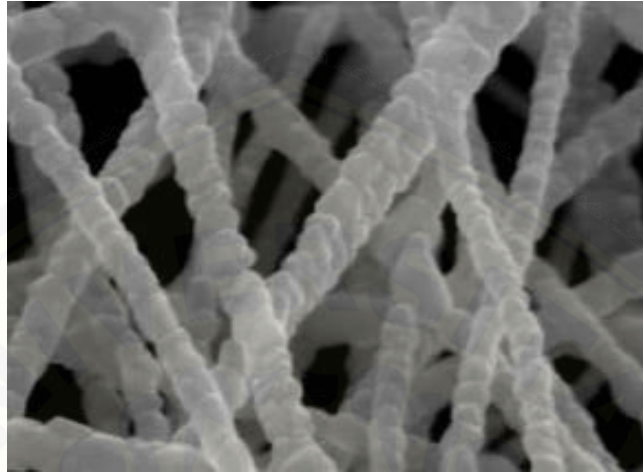
Gambar 2. 10 SEM Micrograph of ZnO/PVP Composite Fiber (Jin - Ah Park, 2009)

Gambar diatas menunjukkan morfologi serat komposit ZnO/PVP. Morfologi *nanofiber* komposit ZnO / PVP menunjukkan permukaan yang tampak relatif halus, karena sifat dari polimer dan bersifat amorf. Diameter dari hasil pengujian SEM untuk serat komposit PVP / ZnO berkisar antara 200 nm sampai 300 nm. Setelah dilakukan *heat treatment annealing* pada suhu 400°C hingga 800°C diameter *nanofiber* komposit PVP / ZnO menyusut drastis hingga 35 – 150 nm, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 sampai 2.9 berikut.

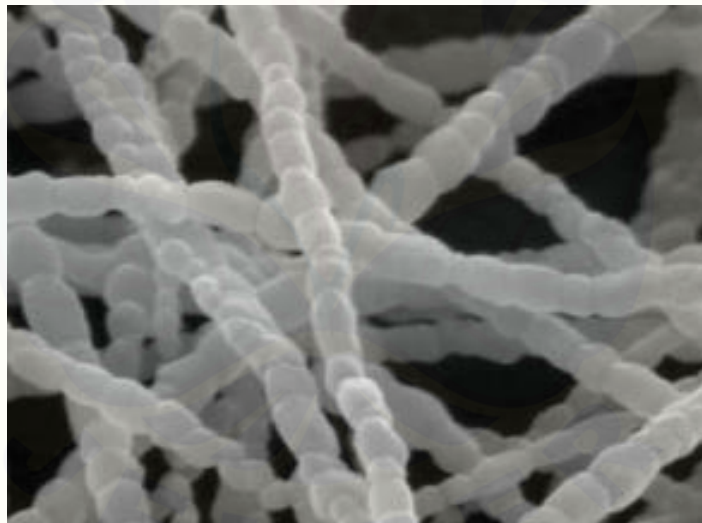


Gambar 2. 11 SEM micrograph of ZnO nanofibers annealed at 400°C (Jin - Ah Park, 2009)

Nanofiber yang telah *diannealing* pada suhu 400°C, permukaannya tampak halus seperti *nanofibers* komposit PVP / ZnO. Karena *nanofibers* pada suhu 400°C mempunyai tingkat kristalinitas yang masih rendah.



Gambar 2. 12 SEM micrograph of ZnO nanofibers annealed at 600°C (Jin - Ah Park, 2009)



Gambar 2. 13 SEM micrograph ZnO nanofibers annealed at 800°C (Jin-Ah Park, 2009)

Nanofiber ZnO didapat setelah disintering pada suhu 600°C - 800°C. morfologi permukaan nanofiber ZnO menunjukkan butir butir kristal ZnO yang saling terhubung disepanjang *nanofiber*. Peningkatan temperatur dari 600°C menjadi 800°C membuat morfologi butiran ZnO yang seragam dan pada rentang suhu sekian diameter *nanofiber* ZnO yang dihasilkan berkisar antara 35 nm – 100 nm.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu sebuah metode untuk mengisolasi dan melakukan kontrol dengan variasi lapisan *ZnO nanofiber* serta pengaruh dari proses *hydrothermal* nanofiber ZnO.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Pembuatan sample nanofibers dilakukan di Laboratorium Teknologi Terapan, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember. Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei 2017 sampai selesai.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang dibutuhkan adalah sebagai berikut

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan

No.	Alat	Bahan
1	Mesin <i>Electrospinning</i>	Polyvinyl alcohol (PVA)
2	Gelas Ukur	Air distilasi (aquadest)
3	Pivet	Zinc Acetate dihydrate
4	Gelas reaksi	Zinc Nitrate Hexahydrate
5	<i>Thermocontrol</i>	Hexamethylenetetramine
6	<i>Strirrer</i>	Polyethyleneimine
7	Furnace	Kaca FTO
8	Heater	Ethanol 96%
9	Timbangan Digital	Grafit / Karbon
10	Multimeter	Klorofil
11	SEM	Resistor
12	XRD	Electrolyte
13		Double tip
14		Tissue

3.4 Pelaksanaan Penelitian

a. Preparasi Prekursor Larutan Komposit PVA/ZnAc

1. Menakar 2 g PVA dan 20 g H_2O dengan gelas ukur(1:10% wt).

2. Mencampurkan polyvinyl alcohol (PVA) dengan air distilasi (H_2O).
 3. Mengaduk larutan PVA disertai mengkalsinasi pada suhu $70^{\circ}C$ selama 4 jam.
 4. Mendinginkan larutan PVA dalam suhu ruang selama 8 jam untuk homogenisasi.
 5. Menakar 2 g $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ dan 8 g H_2O (1:4% wt).
 6. Mencampurkan *zinc acetate dihydrate* dan air distilasi ke dalam gelas reaksi.
 7. Mengaduk larutan ZnAc selama 1 jam pada suhu $70^{\circ}C$ di dalam *heater* yang dikontrol dengan alat *thermocontrol*.
 8. Mencampurkan larutan ZnAc ke dalam larutan PVA (1:4% wt)
 9. Mengaduk larutan PVA/ZnAc pada suhu $70^{\circ}C$ selama 8 jam
 10. Larutan PVA/ZnAc kemudian didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk homogenisasi.
- b. Sintesa *nanofiber* dengan *Electrospinning*.
1. Memasukan larutan bening PVA/ZnAc ke dalam 1 mL pompa suntik (*syringe pump*).
 2. Menghubungkan jarum dan pelat kolektor dengan tegangan tinggi.
 3. Jarum dihubungkan dengan terminal positif dan pelat kolektor dihubungkan dengan terminal negatif.
 4. Mengatur jarak antara ujung jarum dan pelat kolektor sebesar 5 cm dengan arah horizontal.
 5. Mengatur laju larutan bening PVA/ZnAc sebesar $1\mu L/min$ dengan jarak tempuh 5 mm di dalam *syringe* 1 mL.
 6. Mengkalsinasi *nanofiber* yang telah dideposisikan pada TCO pada suhu $100^{\circ}C$ selama satu jam dan dilanjutkan dengan *sintering* pada suhu $600^{\circ}C$ selama satu jam.
 7. Melakukan proses yang sama untuk variasi lapis dua, tiga, empat dan lima lapis.

- c. Sintesa *nanofiber / nanowire* ZnO dengan proses *hydrothermal*.
1. Melarutkan 0,05 M *zinc nitrate hexahydrate*, 0,055 M *hexamethylenetetramine* dan 0,44 g *polyethyleneimine* ke dalam larutan 40 mL air distilasi.
 2. Merendam gelas substrate yang telah dilapisi *nanofiber* ZnO ke dalam larutan yang terdapat dalam sel teflon untuk menumbuhkan *nanowire* ZnO.
 3. Mengatur temperatur sistem pada suhu 95°C selama 6 jam.
 4. Mencuci spesimen dengan air dan ethanol selang beberapa waktu dan dikeringkan di udara pada suhu 60°C.
- d. Fabrikasi DCCS
1. Merendam kaca yang berisi *nanofiber, nanofiber / nanowire* ke dalam klorofil dan dikeringkan di udara
 2. Memberi double tip pada tepi kaca FTO dengan ukuran dalam 1,8 cm × 5 cm dan ukuran luar 2,5 cm × 6 cm.
 3. Melapisi katalis karbon pada bagian dalam kaca FTO (*counter electrode*) menggunakan pensil 6B
 4. Kemudian memberi larutan iodine sebagai *electrolyte* yang terkandung dalam produk bethadine.
 5. Menempelkan kaca FTO yang telah ditetesi bethadine (elektroda lawan) dengan kaca FTO yang telah direndam dalam klorofil (elektroda kerja).

3.5 Langkah – langkah pengujian sampel DSSC

- a. Pengujian Unjuk Kerja DSSC
1. Meletakkan sample DSSC di bawah solar simulator
 2. Menghubungkan arus dan voltase dari AVO meter ke DSSC.
 3. Memberi tahanan terhadap arus dengan menggunakan potensio 1kΩ
 4. Mencatat arus – tegangan (I – V) yang dihasilkan
 5. Menganalisa data yang diambil dari pengujian

Tabel 3.2 Tabel hasil pengujian I – V pada DSSC lapisan *nanofiber* ZnO

No	Lapisan <i>Nanofiber/nanowire</i> ZnO	Isc (μ A)	Voc (mV)	Fill Factor	Efisiensi (%)
1	Lapis 2 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				
2	Lapis 3 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				
3	Lapis 4 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				
4	Lapis 5 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				

Tabel 3.3 Tabel hasil I – V pada pengujian DSSC lapisan *nanofiber / nanowire* ZnO

No	Lapisan <i>Nanofiber/nanowire</i> ZnO	Isc (μ A)	Voc (mV)	Fill Factor	Efisiensi (%)
1	Lapis 2 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				
2	Lapis 3 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				
3	Lapis 4 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				
4	Lapis 5 Spesimen 1 Spesimen 2 Spesimen 3				

3.6 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Hasil penelitian akan disajikan dalam bentuk tabel, foto uji SEM sebelum dan setelah perlakuan proses *hydrothermal* pada *nanofiber* ZnO. Pengamatan pada penelitian ini yaitu pengaruh proses *hydrothermal nanofiber* ZnO terhadap morfologi *nanofiber* ZnO. Pengambilan gambar diambil dengan perbesaran 10.000x dan 25.000x. Alat uji *scanning electron microscopy* (SEM) yang digunakan adalah alat uji SEM merek FEI – Inspect S50 di jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Bentuk morfologi dari *nanofiber / nanowire* dikarakterisasi dengan menggunakan alat uji *scanning electron microscopy* (SEM).

3.7 Analisa Data

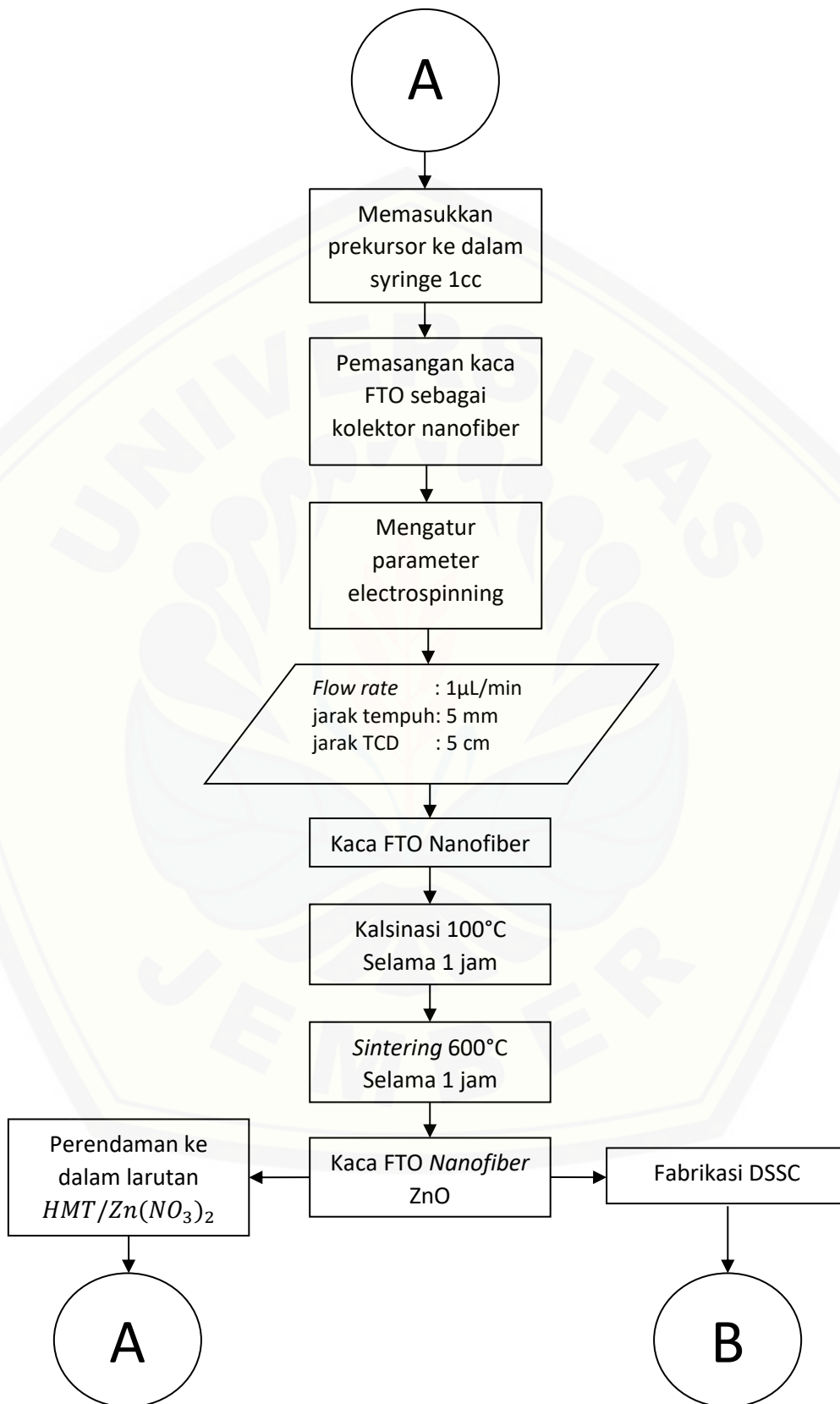
Analisa dilakukan setelah diperoleh hasil pengujian pada DSSC sebagai berikut:

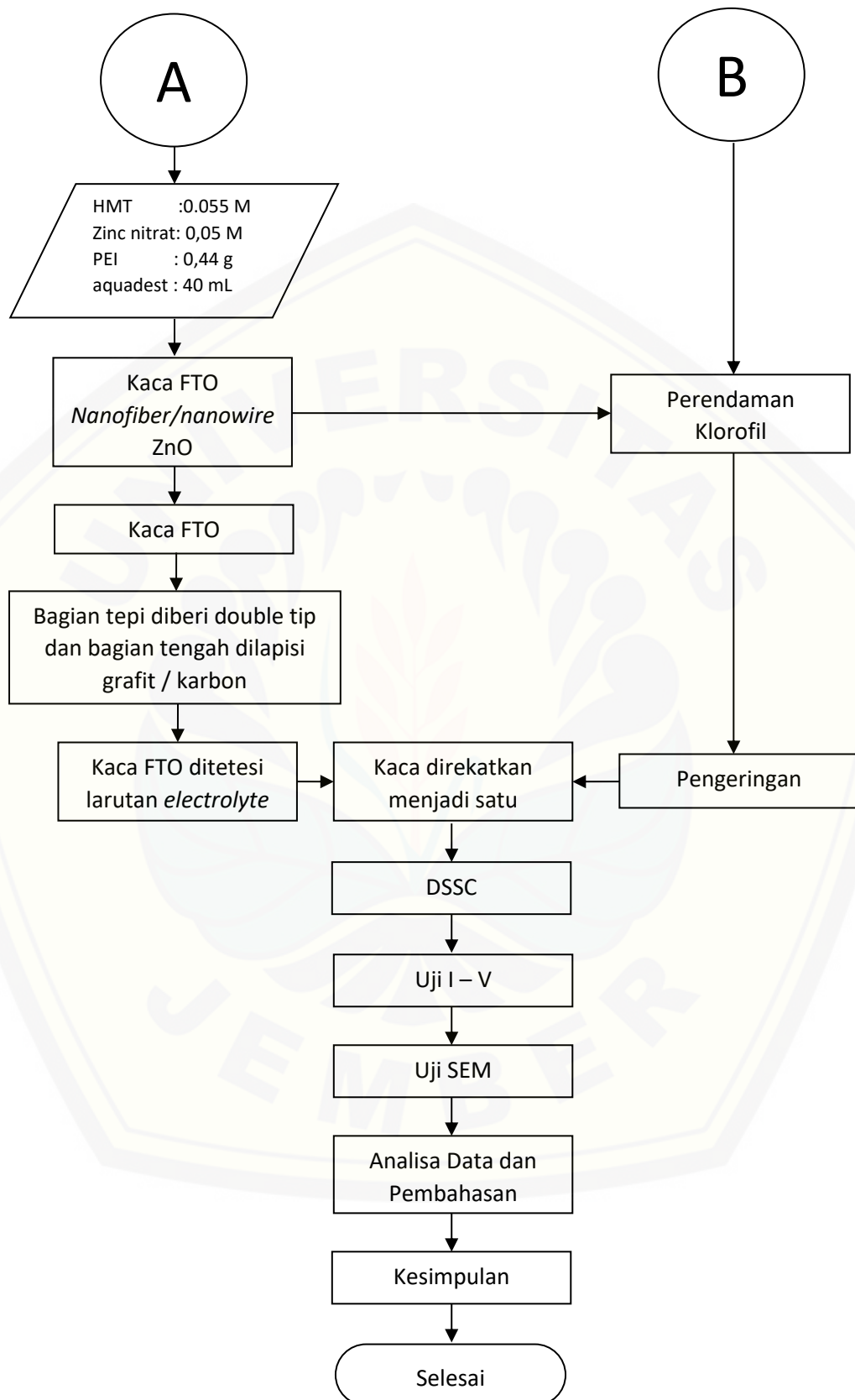
1. Analisa pengaruh proses *hydrothermal* terhadap unjuk kerja DSSC dan morfologi *nanofiber* ZnO.
2. Analisa pengaruh variasi lapisan *nanofiber* dan *nanofiber/nanowire* ZnO terhadap unjuk kerja DSSC dan morfologi nanofiber.

3.8 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian sebagai berikut:







Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Hasil pembahasan yang telah dilakukan dan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses *hydrothermal nanofiber* ZnO memperbesar luasan aktif dengan cara menumbuhkan struktur baru. Luasan aktif yang besar akan meningkatkan adsorpsi molekul dye, meningkatkan eksitasi elektron sehingga unjuk kerja DSSC akan meningkat.
2. Dengan variasi lapisan semikonduktor ZnO yang dideposisikan dari satu lapis hingga empat lapis mengalami kenaikan yang signifikan, sedangkan untuk ke lima lapis mengalami penurunan tingkat efisiensi yang dikarenakan berkurangnya transparansi dari DSSC.
3. Proses *hydrothermal nanofiber* ZnO dapat menumbuhkan struktur baru ZnO secara *single crystal* pada permukaan *nanofiber* ZnO, dengan tumbuhnya kristal ZnO morfologi *nanofiber* berubah bentuk menjadi *nanofiber/nanosheet/nanowire/nanoflower* ZnO.
4. Struktur *nanosheet* ZnO mempunyai dimensi ketebalan 106 nm dan panjang 1,833 μm .

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk menghasilkan struktur semikonduktor seng oksida yang lebih baik untuk memperbaiki morfologi dari *nanofiber* ZnO dengan cara pendopongan Al ke dalam ZnO. Selain itu dalam pembuatan DSSC, kaca konduktif (*FTO glass*) perlu diteliti untuk resistansi yang semakin kecil untuk meningkatkan eksitasi elektron yang berpengaruh terhadap efisiensi dari DSSC.

DAFTAR PUSTAKA

- Akrem, A. 2011. Nanofibrous Nanocomposites via Electrospinning. Thesis, Bilkent University, Turki .
- C. J. Thompson, G. G. 2007. Effects of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, vol. 48, 6913-6922.
- Chen, X., Xu, S., Yao, N., & Shi, Y. 2010. 1.6 v nanogenerator for mechanical energy harvesting using PZT nanofibers. *Nano Letters*, 10 (6), 2133–2137.
- Dong, X., Yang, P., & Shi, R. 2014. Fabrication of ZnO nanorod arrays via electrospinning assisted hydrothermal method. *Materials Letters*, 135, 96–98.
- Endres, D., & Mazumder, S. 2011. Numerical investigation of pulsed chemical vapor deposition of aluminum nitride to reduce particle formation. *Journal of Crystal Growth*, 335 (1), 42–50.
- Grätzel, M. 2003. Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4(2), 145–153.
- Grigoropoulos, C. P., & Sung, H. J. 2011. Nanoforest of Hydrothermally Grown Hierarchical ZnO Nanowires for, 666–671.
- Hu, H., Huang, X., Deng, C., Chen, X., & Qian, Y. 2007. Hydrothermal synthesis of ZnO nanowires and nanobelts on a large scale. *Materials Chemistry and Physics*, 106(1), 58–62.
- Ilyassov, B. R., Ibraev, N. K., & Abzhanova, D. B. 2015. Effect of morphology of ZnO nanowire arrays on photovoltaic and electron transport properties of DSSC. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 81(1), 12046.
- Imran, M., Haider, S., Ahmad, K., Mahmood, A., & Al-masry, W. A. 2017. Fabrication and characterization of zinc oxide nanofibers for renewable energy applications. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1067–S1072.
- Istiyono, E. 2004. Analisis tegangan elemen foto voltaik dengan variasi daya dan jarak sumber cahaya. *Penelitian Saintek*, 9, 69–81.
- Jiang, C. Y., Sun, X. W., Lo, G. Q., Kwong, D. L., & Wang, J. X. 2007. Improved dye-sensitized solar cells with a ZnO-nanoflower photoanode. *Applied Physics Letters*, 90(26), 3–6.

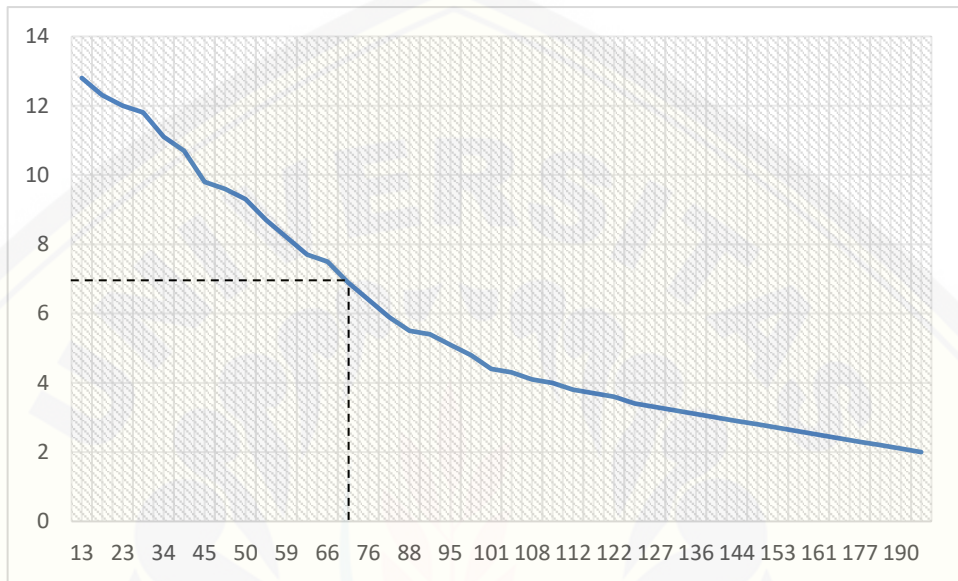
- Kang, M. S., Lee, C. H., Park, J. B., Yoo, H., & Yi, G. C. 2012. Gallium nitride nanostructures for light-emitting diode applications. *Nano Energy*, 1(3), 391–400.
- Kao, M., Chen, H., Young, S., Lin, C., & Kung, C. 2012. Structure and photovoltaic properties of ZnO nanowire for dye-sensitized solar cells, 2–7.
- Khan, M. Z. H., Al-Mamun, M. R., Halder, P. K., & Aziz, M. A. 2017. Performance improvement of modified dye-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(October), 602–617.
- Kim, I. D., Hong, J. M., Lee, B. H., Kim, D. Y., Jeon, E. K., Choi, D. K., & Yang, D. J. 2007. Dye-sensitized solar cells using network structure of electrospun ZnO nanofiber mats. *Applied Physics Letters*, 91(16), 163109.
- Li, H., Zhang, Y., & Wang, J. 2012. ZnO nanosheets derived from surfactant-directed process: Growth mechanism, and application in dye-sensitized solar cells. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(4), 1241–1246.
- Lin, C.-Y., Lai, Y.-H., Chen, H.-W., Chen, J.-G., Kung, C.-W., Vittal, R., & Ho, K.-C. 2011. Highly efficient dye-sensitized solar cell with a ZnO nanosheet-based photoanode. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3448.
- Lupan, O., Guérin, V. M., Ghimpu, L., Tiginyanu, I. M., & Pauporté, T. 2012. Nanofibrous-like ZnO layers deposited by magnetron sputtering and their integration in dye-sensitized solar cells. *Chemical Physics Letters*, 550, 125–129.
- Mccune, M., Zhang, W., & Deng, Y. 2012. High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells Based on Three-Dimensional Multilayered ZnO Nanowire Arrays with “Caterpillar-like” Structure. *Nano Letters*, 12, 3656–3662.
- Miao, L., Zhang, H., Zhu, Y., Yang, Y., Li, Q., & Li, J. 2012. Epitaxial growth of ZnO nanorods on electrospun ZnO nanofibers by hydrothermal method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 23(10), 1887–1890.
- Pan, Z. W. 2001. Nanobelts of Semiconducting Oxides. *Science*, 291(5510), 1947–1949.
- Park, J. A., Moon, J., Lee, S. J., Lim, S. C., & Zyung, T. 2009. Fabrication and characterization of ZnO nanofibers by electrospinning. *Current Applied Physics*, 9(3 SUPPL.), S210–S212.
- Santoso, H., Zharvan, V., Daniyati, R., As, N. I., & Yudoyono, G. 2015. Peningkatan Kinerja Dye-Sensitized Solar Cells menggunakan Metode Ultrasonikasi, (January), 1–4.

- Sholahuddin, I., & H, M. F. R. 2015. FABRIKASI DAN KARAKTERISASI NANOGENERATOR BERBASIS NANOFIBER-NANOWIRE ZnO. *ROTOR*, 8(April), 8–11.
- Sutanto, B., Arifin, Z., Suyitno, Hadi, S., Pranoto, L. M., & Agustia, Y. V. 2016. Enhancement ZnO nanofiber as semiconductor for dye-sensitized solar cells by using Al doped. *AIP Conference Proceedings*, 1717.
- Thangavel, K., Balamurugan, A., Venkatachalam, T., & Ranjith Kumar, E. 2016. Structural, morphological and optical properties of ZnO nano-fibers. *Superlattices and Microstructures*, 90, 45–52.
- Vittal, R., & Ho, K.-C. 2016. Zinc oxide based dye-sensitized solar cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (November), 1–15.
- Wahyudi, T., & Sugiyana, D. 2011. Pembuatan Serat Nano Menggunakan Metode Electrospinning. *Arena Tekstil*, 26(1), 29–34.
- Wong, K. K., Ng, A., Chen, X. Y., Ng, Y. H., Leung, Y. H., Ho, K. H., Phillips, D. L. 2012. Effect of ZnO nanoparticle properties on dye-sensitized solar cell performance. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(3), 1254–1261.
- Wu, J.-J., & Liu, S.-C. 2002. Low-Temperature Growth of Well-Aligned ZnO Nanorods by Chemical Vapor Deposition. *Advanced Materials*, 14(3), 215–218.
- Yandri, V. R., & Andalas, P. U. 2012. PROSPEK PENGEMBANGAN ENERGI SURYA UNTUK, 4(1), 14–19.
- Yang, W., Wan, F., Chen, S., & Jiang, C. 2009. Hydrothermal growth and application of ZnO nanowire films with ZnO and TiO₂ buffer layers in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale Research Letters*, 4(12), 1486–1492.
- Zulkifili, A. N. B., Kento, T., Daiki, M., & Fujiki, A. 2015. The Basic Research on the Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC). *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(5), 382–387.

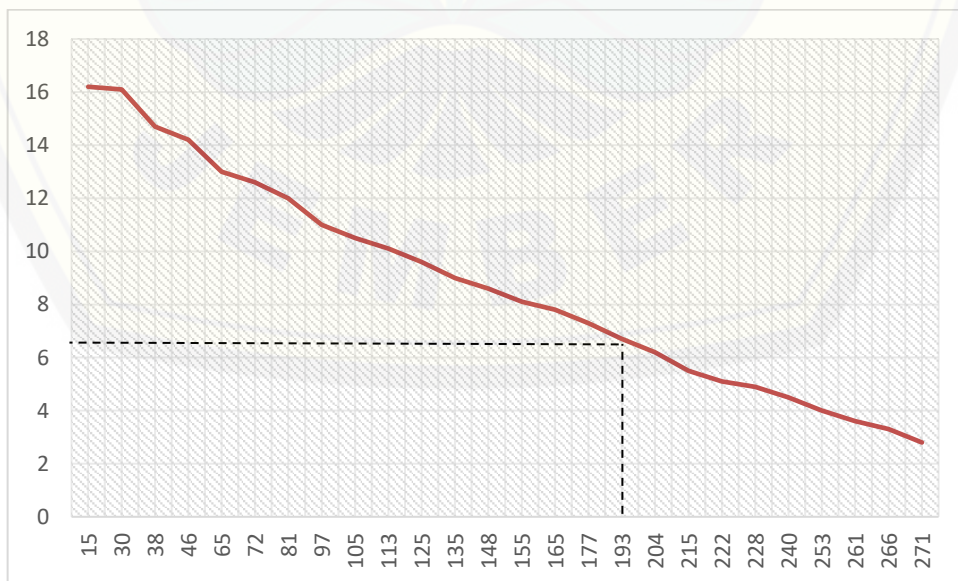
LAMPIRAN

Lampiran A.

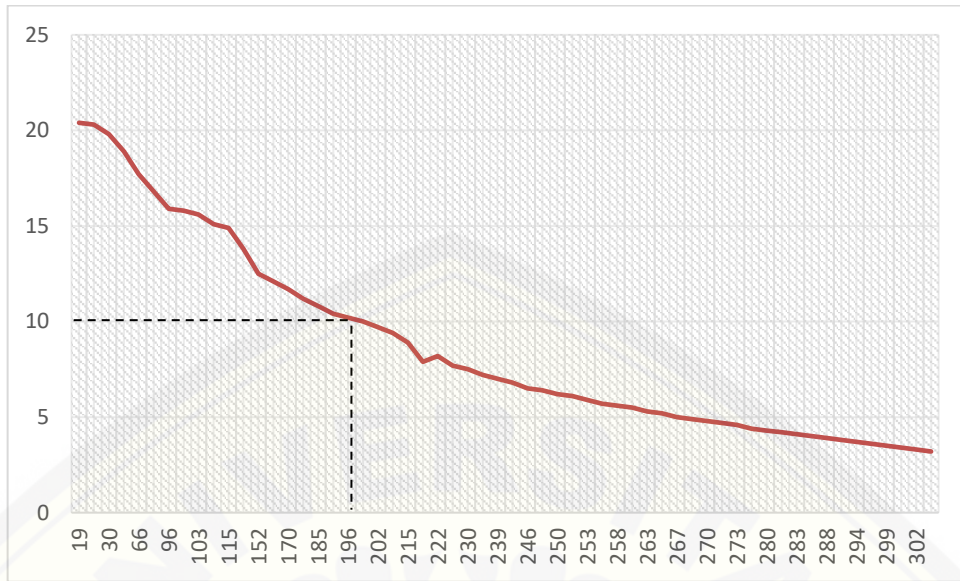
A.1 Daya Output DSSC



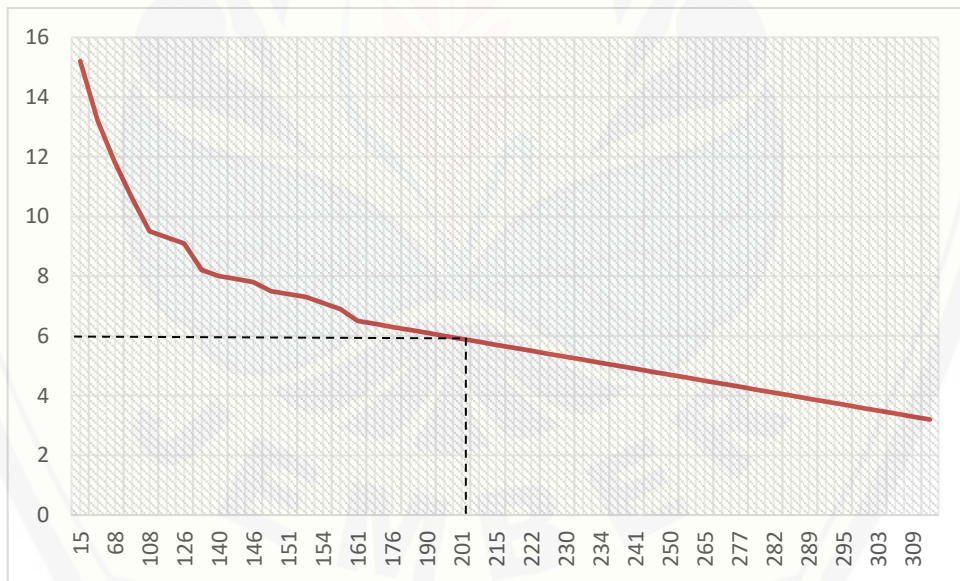
Gamba A.1 Daya output DSSC *Nanofiber* 2 layer



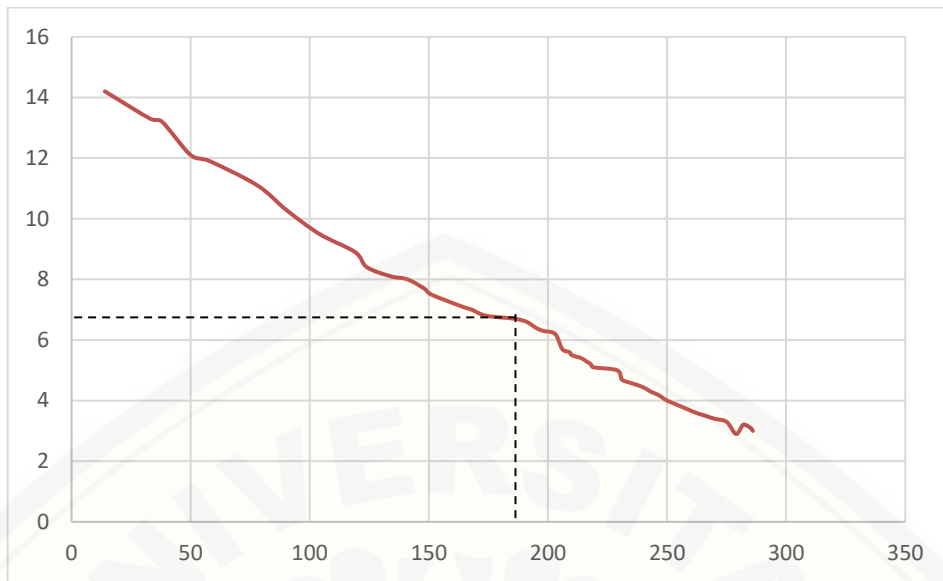
Gambar A.2 Daya Output DSSC *Nanofiber* 3 Layer



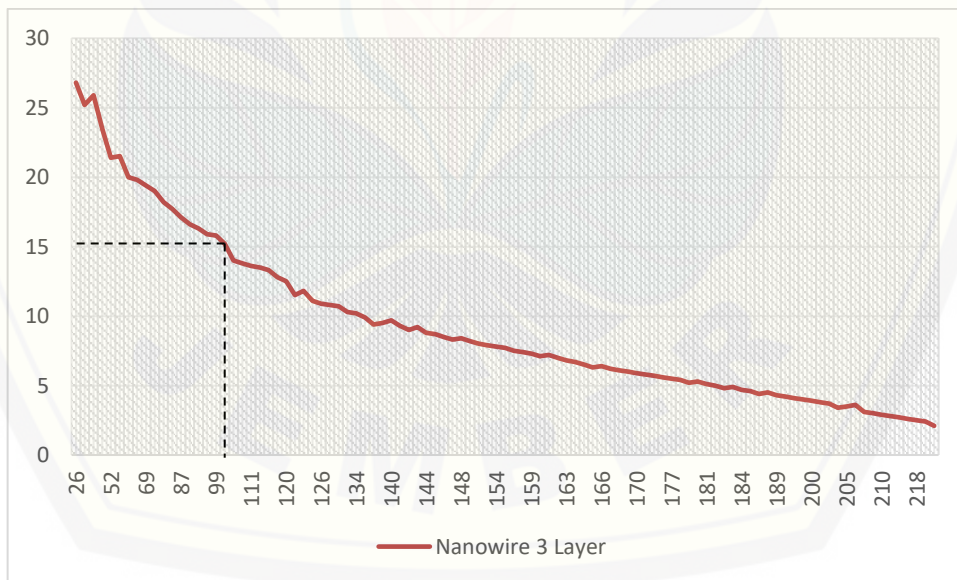
Gambar A.3 Day Output DSSC Nanofiber 4 Layer



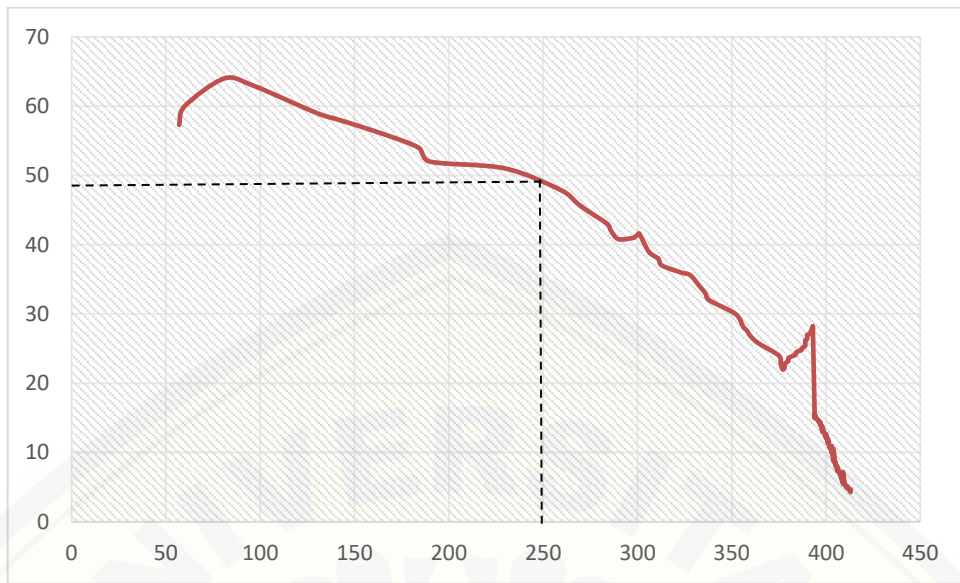
Gambar A.4 Day Output DSSC Nanofiber 5 Layer



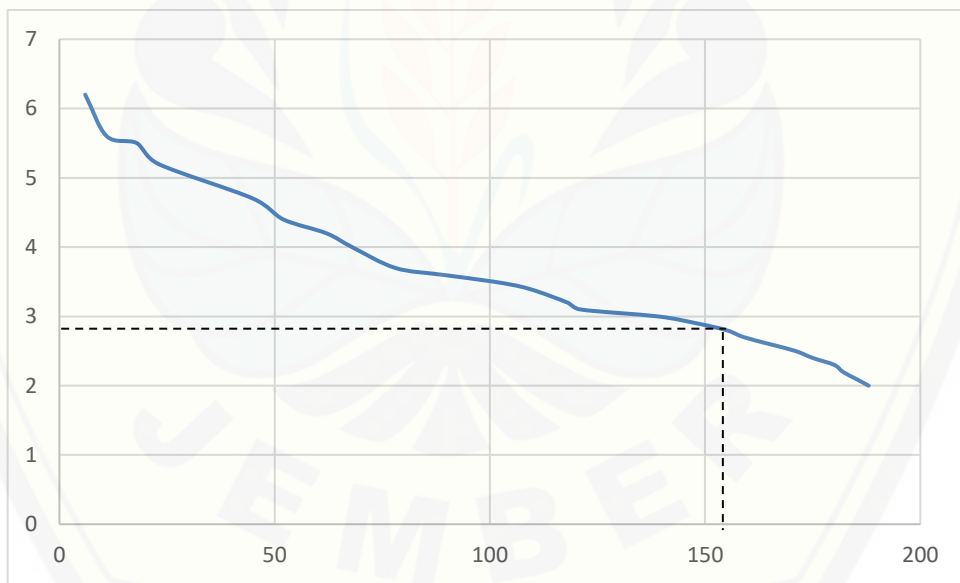
Gambar A.5 Daya Output DSSC Nanofiber/nanowire 2 Layer



Gambar A.6 Daya Output DSSC Nanofiber/nanowire ZnO 3 Layer



Gambar A.7 Daya output DSSC Nanofiber/nanowire 4 Layer



Gambar A.8 Daya Output DSSC Nanofiber/nanowire 5 Layer

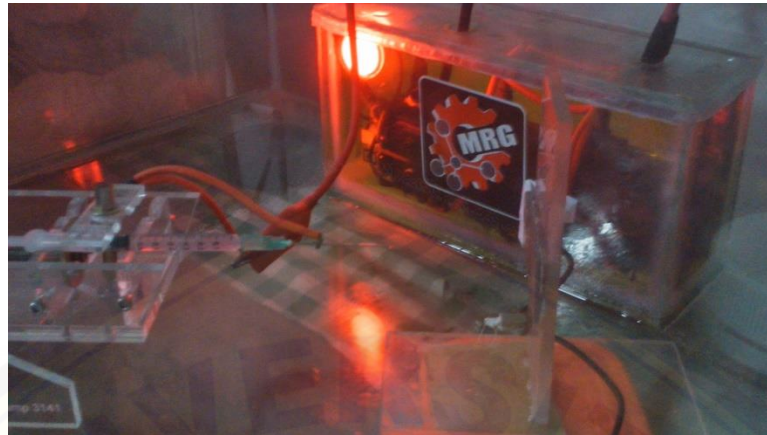
Lampiran B

B.1 Dokumentasi Penelitian



Gambar B.1 Prekursor PVA/ZnAc

Gambar B.2 Pengaturan parameter pada *electrospinning*



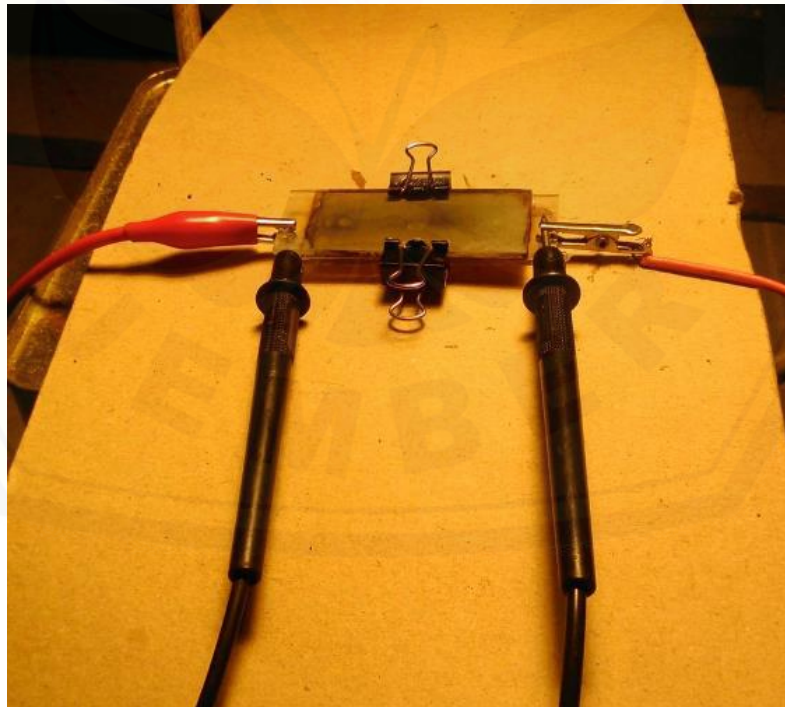
Gambar B.3 Proses *Electrospinning*



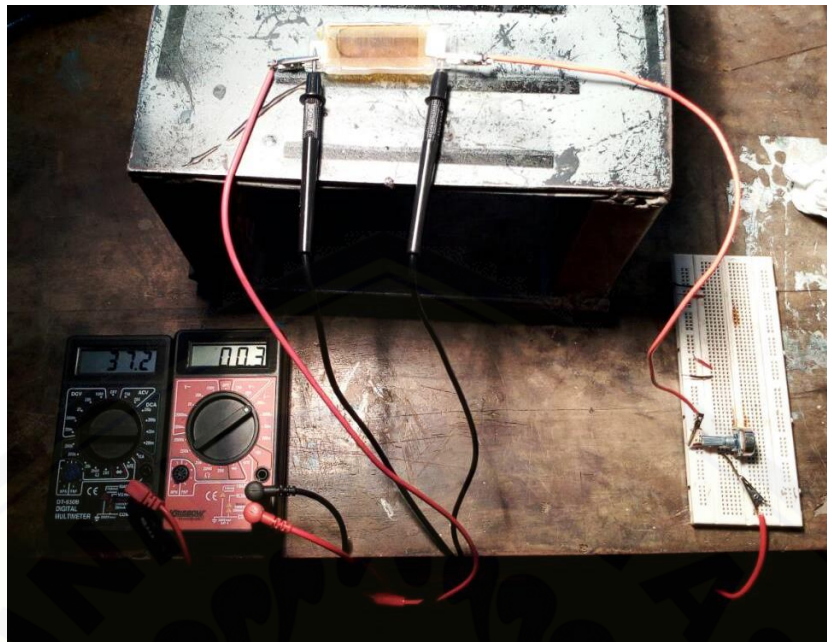
Gambar B.4 Proses Sintesa *Nanofiber ZnO*



Gambar B.5 Sampel DSSC



Gambar B.6 Pengujian DSSC dibawah Solar Simulator (*Halogen lamp*)



Gambar B.7 Pengukuran nilai I – V



Gambar B.8 Alat Uji Karakterisasi NDT SEM FEI – Inspect S50



Gambar B.9 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

